

Desenvolvimento Experimental de um Dispositivo para Aproveitamento de Energia das Ondas no Arquipélago dos Açores

Francisco Pavão Braga

Tese para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Mecânica
(3^o ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor António Carlos Mendes

Júri:

Prof. Doutor Paulo Jorge dos Santos Pimentel de Oliveira
Prof. Doutor Rui Manuel Silva Ralha
Prof. Doutor António Carlos Mendes
Prof. Doutor Jorge Miguel dos Reis Silva
Prof. Doutor Pedro Gabriel de Faria Lapa Barbosa de Almeida
Prof. Doutor Helder Joaquim Dinis Correia
Prof. Doutor João Carlos de Campos Henriques
Prof. Doutor Frederico Miguel Freire Rodrigues

6 de Novembro de 2023

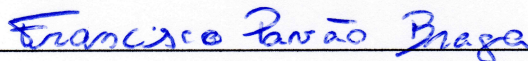
Aos meus pais Fernando e Filomena Braga e restante família, a quem tudo devo e que sempre me apoiaram no meu percurso académico e de crescimento pessoal.

Declaração de Integridade

Eu, Francisco Pavão Braga, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição D2261 do curso de 3º ciclo em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extractos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 06/11/2023



Francisco Pavão Braga

Enquadramento

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Turbomáquinas (*fluidslab*) da Universidade da Beira Interior, na sequência do Projecto PTDC/EME-MFE/111763/2011-16 “Design and Experimental Testing of a Power Take-off System for the *Anaconda* Wave Energy Conversion Device”, que foi co-financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e pela União Europeia/FEDER no âmbito do Programa Operacional Factores de Competitividade COMPETE.

Covilhã, 06 de Novembro de 2023.



Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço ao Professor António Carlos Mendes – Coordenador do Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Turbomáquinas – pela ajuda e orientação na realização deste trabalho. À Universidade da Beira Interior, em particular ao Departamento de Engenharia Electromecânica, desejo expressar o meu reconhecimento por todas as condições necessárias proporcionadas à realização do presente estudo. Ao Sr. António Manuel Pereira Morgado, Técnico do Laboratório, agradeço a amabilidade e dedicação à fabricação dos modelos físicos e apoio na execução da parte experimental. Quero igualmente reconhecer toda a ajuda que me foi prestada pelo meu colega Luís Manuel Andrés Paredes e todos os estudantes que me antecederam na concretização deste trabalho. Por fim agradeço aos meus pais por todo o seu apoio, sem o qual não teria sido possível realizar este trabalho.

Resumo

Este trabalho trata do desenvolvimento de um sistema de recuperação de energia das ondas que seja capaz de fornecer electricidade a pequenas comunidades insulares, como as do arquipélago dos Açores. O tema do trabalho enquadra-se dentro das metas definidas pelas directivas estabelecidas pela União Europeia, complementadas com as directivas Nacionais para o sector energético. Numa primeira fase é analisado o potencial energético das ondas, dedicando especial atenção ao grupo Ocidental do arquipélago. Após uma revisão das principais tecnologias de recuperação de energia das ondas actualmente existentes, o dispositivo atenuador de tubo distensível faz objecto do nosso estudo. Baseado no conceito *Anaconda*, o atenuador de tubo distensível é constituído por um tubo de borracha flutuante cheio de água, cuja proa é fechada por um nariz alinhado segundo a direcção das ondas incidentes. A parte traseira do tubo está acoplada a uma chaminé vertical, de secção circular, através de um cotovelo de 90°. A interacção das ondas com o tubo pressurizado dá origem a pulsos de pressão no seu interior que se deslocam em direcção à chaminé vertical, fazendo oscilar uma coluna de água (OWC) dentro desta. As oscilações são convertidas em energia de pressão numa câmara pneumática, em cujo topo pode ser instalada uma turbina de ar que acciona um gerador eléctrico. A investigação realizada é essencialmente experimental, com base no ensaio em tanque de ondas de dois modelos do dispositivo às escalas 1:50 e 1:20. As condições geradas no tanque de ondas reproduzem aproximadamente o clima de ondas na Ilha do Corvo, Açores. O desempenho deste dispositivo é analisado nestas condições e validado com resultados padrão para outros dispositivos, disponíveis na literatura. O desempenho do sistema com e sem o tubo instalado é também comparado, por forma a avaliar as vantagens introduzidas pelo tubo distensível. Os efeitos não-lineares e de escala são posteriormente discutidos. Dando seguimento às estratégias para melhorar o desempenho do sistema, que vêm sendo introduzidas desde 2014, foram ainda modeladas três situações reais: um sistema deste tipo fixo a uma estrutura em treliças assente no fundo do mar, o mesmo sistema equipado com uma parede reflectora junto à boca da OWC ou equipado com um canal de focagem de fundo inclinado. O estudo realizado permite demonstrar que o tubo distensível acoplado a um sistema OWC é viável e apresenta vantagens substanciais relativamente a muitos dos sistemas que se encontram actualmente numa fase de desenvolvimento pré-comercial.

Palavras-chave

Energia das ondas; Arquipélago dos Açores; Atenuador de tubo distensível; Ensaio em tanque de ondas.

Abstract

This work deals with the development of a wave energy device that is capable of supplying electricity to small island communities like the ones of the Azores archipelago. This subject is in line with the goals defined by the European Union's directives, complemented by the National directives for the energy sector. Firstly the energetic potential of ocean waves is analysed, with special interest in the Occidental group of the Azorean archipelago. A review of the main wave energy technologies is then accomplished, and the distensible tube wave attenuator device becomes the focus of our study. Based on the *Anaconda* concept, this device makes use of a long rubber tube, filled with water, whose nose is closed and aligned head to the incident waves. Its stern is coupled to a vertical circular shaft by means of a 90° elbow. The interaction of the waves with the tube induces pressure bulges inside it that travel along its length towards the vertical shaft, giving rise to oscillations of a water column (OWC) in the shaft. These oscillations are converted into pressure variations in a pneumatic chamber, on top of which an air turbine driving an electric generator can be installed. Given the robustness of the rubber tube and the development stage of the energy conversion technologies used, this system has the potential to reduce the investment and operational costs of wave energy utilization. The present investigation is mainly experimental and is based on the testing of a model of this device in wave-tank, at 1:50 and 1:20 model scales. The wave conditions generated in the tank approximately reproduce the wave climate at Corvo island, which is part of the Occidental group of the Azores. The device performance is analysed under these conditions and later validated against benchmark results that are available in the literature, obtained with other devices. To assess the advantages of using a distensible tube, a comparison between the performance of the device with and without the tube in place is also accomplished. Non-linear and scale effects are then discussed. In addition, following the performance enhancement strategies that have been studied since 2014, three real situations were considered: the system fixed to a bottom-standing jacket structure, the same system equipped with a reflecting wall at the OWC mouth, or equipped with a focusing channel of sloped bottom profile. This study demonstrates that the distensible tube system coupled with an OWC is viable and presents significant advantages relative to several systems that have currently achieved a pre-commercial stage of development.

Keywords

Wave energy; Azores archipelago; Distensible tube Attenuator; Wave-tank tests.

Índice

Lista de Símbolos	xi
Lista de Figuras	xiv
Lista de Tabelas	xxii
Lista de Acrónimos	xxiii
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 A energia das ondas	1
1.1.1 Recurso global	
1.1.2 Potencial na Europa e em Portugal	
1.1.3 Clima de ondas no Arquipélago dos Açores	
1.1.4 O caso da Ilha do Corvo	
1.2 Metas da UE para as energias renováveis	14
1.2.1 LCOE da energia das ondas e marés	
1.2.2 Metas estabelecidas para a Europa	
1.2.3 Metas estabelecidas para Portugal	
1.3 Objectivos gerais do trabalho	17
Capítulo 2 – Tecnologias de Extracção de Energia das Ondas	19
2.1 Sinopsis do estado-da-arte	19
2.1.1 Sistemas pioneiros	
2.1.2 Dispositivos desenvolvidos até finais do Séc. XX	
2.1.3 Protótipos de demonstração mais recentes	
2.1.4 Sistemas actualmente ligados à rede	
2.2 Novos sistemas com geometria variável	35
2.2.1 Sistemas com interface de trabalho rígida	
2.2.2 Sistemas com interface de trabalho distensível	
2.3 Zonas piloto e de teste na Europa	42
2.4 Estado de desenvolvimento das tecnologias (TRL)	44
Capítulo 3 – O Dispositivo Atenuador de Tubo Distensível	45
3.1 Resenha histórica	46
3.1.1 Dispositivos <i>wave-profiling</i>	
3.1.2 Fases posteriores de desenvolvimento	
3.2 Estado de desenvolvimento actual	47
3.2.1 Dinâmica do tubo distensível	
3.2.2 OWC e sistema de extracção de potência	

3.2.3 Metodologia de modelação do sistema PTO	
3.2.4 Desempenho do sistema	
3.3 Determinação do caudal de ar em escoamento compressível	54
3.4 Síntese dos desenvolvimentos mais recentes deste sistema	57
Capítulo 4 – Ensaio Experimental do Dispositivo à Escala 1:50	59
4.1 Instalação experimental	59
4.1.1 Modelo físico	
4.1.2 Tanque hidrodinâmico	
4.1.3 Sistema de aquisição de dados	
4.2 Excitação do modelo e impedância do sistema de extracção	64
4.2.1 Ondas geradas no tanque	
4.2.2 Condições impostas no PTO	
4.3 Resultados experimentais obtidos	67
4.3.1 Factor de amplificação do sistema	
4.3.2 Potência extraída pelo PTO e comprimento de captura	
4.3.3 Comparação entre os modelos incompressível e compressível	
4.4 Síntese das principais conclusões	72
Capítulo 5 – Ensaio Experimental do Dispositivo à Escala 1:20	73
5.1 Modelo físico e condições impostas	73
5.1.1 OWC e tubo distensível	
5.1.2 Ondas geradas no tanque e análise de reflexão	
5.1.3 Características do PTO	
5.2 Análise de desempenho do sistema	79
5.2.1 Factor de amplificação e energia armazenada	
5.2.2 Potência extraída e comprimento de captura	
5.2.3 Comparação entre os modelos incompressível e compressível	
5.3 Síntese das principais conclusões	85
Capítulo 6 – Comparação e Validação dos Resultados Experimentais Obtidos	86
6.1 Comparação com resultados padrão existentes na literatura	87
6.1.1 Validação através de resultados experimentais para um tubo à escala 1:25	
6.1.2 Comparação com previsões teóricas obtidas para OWCs	
6.2 Comparação dos desempenhos do sistema OWC com e sem tubo	92

6.3 Possíveis efeitos não-lineares e de escala	94
6.4 Síntese das principais conclusões	96
Capítulo 7 – Metodologias Implementadas para Melhoria de Desempenho	98
7.1 Revisão das estratégias mais utilizadas	99
7.1.1 Portos de focagem	
7.1.2 Estratégias de controlo	
7.2 Modelos na linha de costa	103
7.2.1 Modelo com barreira reflectora	
7.2.2 Modelo com canal de focagem	
7.3 Resultados experimentais alcançados	106
7.3.1 Condições impostas e resposta do sistema	
7.3.2 Comprimento de captura de energia	
7.3.3 Comprimento de captura máximo alcançado	
7.4 Síntese das principais conclusões	113
Capítulo 8 – Concepção de um Sistema de Energia das Ondas para os Açores	114
8.1 O sistema electroprodutor dos Açores	115
8.2 Programa operacional Açores 2020-2030	116
8.3 Dados do projecto CLIMAAT	118
8.4 Dispositivo atenuador de tubo distensível à escala real	119
8.4.1 Vantagens da sua implantação junto à costa	
8.4.2 Limitações de operacionalidade e impacto ambiental	
8.4.3 Layout do dispositivo num canal de focagem	
8.5 Possíveis aplicações para o Grupo Ocidental do Arquipélago	124
8.6 Estimativa da energia a ser produzida pelo dispositivo	124
Capítulo 9 – Conclusão Geral	127
Bibliografia	132
Websites consultados	151
Anexo A – Histogramas bivariados	154
Anexo B – Análise de reflexão com 3 sondas	157

Lista de Símbolos

a	Profundidade de imersão do topo da boca da OWC
A	Área da secção transversal da OWC
A_0	Área do orifício do PTO
A_1, A_2, A_3	Espectro de amplitudes das sondas de nível 1, 2 e 3
A_I	Amplitude da onda incidente
A_R	Amplitude da onda reflectida
b	Largura do tanque de ondas
b'	Factor de correcção de Reynolds
B_n	Coefficientes de Fourier, para as três sondas de nível ($n = 1, 2$ e 3)
c	Celeridade das ondas incidentes
C_0	Coefficiente de impedância
C_d	Coefficiente de descarga
C_W	Comprimento ou largura de captura
C_∞	Coefficiente de descarga para Reynolds infinito
d	Diâmetro do tubo distensível
d_0	Diâmetro do orifício do PTO
D	Distensibilidade do tubo
e	Espaçamento entre as paredes do canal de focagem e as paredes do tanque de ondas
E	Módulo de Young do Latex
E_i	Energia contida numa onda incidente de largura igual à largura do tanque de ondas
E_s	Energia armazenada nas oscilações da OWC
f	Frequência
g	Aceleração da gravidade
h	Profundidade
h_0	Altura estática entre a superfície livre da OWC e a água exterior
h_1	Altura da câmara pneumática
H	Altura da onda incidente
H_s	Altura significativa
k	Número de onda
K	Característica do orifício

l	Comprimento da coluna de água
L	Comprimento do tubo distensível
\dot{m}	Caudal mássico de ar
n	Razão de pressões do PTO
p	Pressão medida na câmara pneumática
p^*	Pressão a montante do orifício
p_0	Pressão do ar atmosférico
P	Potência média extraída no PTO
P_i	Potência transmitida pelas ondas incidentes por unidade de frente de onda
q	Caudal volúmico instantâneo máximo
Q	Caudal de ar através do orifício
r	Raio da câmara pneumática
Re	Número de Reynolds
Re^*	Número de Reynolds referido à velocidade do ar a montante do orifício
t	Tempo
T	Período das ondas incidentes
T_0	Período natural da OWC
T_1	Período de sintonização dos pulsos de pressão com as ondas incidentes
T_m	Período médio
U	Velocidade das ondas longitudinais induzidas num tubo distensível, ignorando o histerese da borracha
Ur	Número de Ursell
w	Espessura de parede
x_{12}	Distância entre a sonda 1 e 2
x_{13}	Distância entre a sonda 1 e 3
X	Comprimento das paredes laterais do canal de focagem na direcção normal à barreira reflectora
X_S	Comprimento da planta do fundo inclinado
z	Deslocamento instantâneo medido da superfície livre da coluna de água oscilante
Z	Impedância adimensional do sistema
\overline{Z}_{PTO}	Impedância do PTO

Z_{tube}	Impedância do tubo distensível
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Espectro da fase do sinal das três sondas de nível em relação à origem de cada sinal
β	Razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro a montante
$\beta_{12}, \gamma_{13},$ $Db, R_1, Q_1,$ $R_2, Q_2, R_3,$ Q_3	Parâmetros utilizados no cálculo da onda reflectida e incidente
γ	Razão de calores específicos do ar
ΔC_w	Variação percentual de C_w devido a ignorar a compressibilidade do ar no cálculo do caudal Q
Δp	Pressão diferencial
ε	Factor de expansibilidade do ar
ζ	Factor de amplificação
η	Amplitude das oscilações da OWC
θ	Ângulo de abertura entre as paredes do canal de focagem
λ	Comprimento de onda
μ	Viscosidade absoluta do ar
ρ	Massa volúmica do ar
ρ^*	Massa volúmica do ar a montante do orifício
ρ_0	Massa volúmica do ar atmosférico
ρ_1	Massa volúmica da água
ω	Frequência angular das ondas incidentes
ω_0	Frequência angular natural da OWC

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Potência líquida anual da energia das ondas em zonas costeiras, excluindo contribuições onde $P \leq 5 \text{ kW/m}$ ou onde há presença de gelo. Fonte: Mørk *et al.* (2010).

Figura 1.2 – Potência média anual e direccionalidade junto à costa Portuguesa (lado esquerdo) e sua variação sazonal do recurso (lado direito). Fonte: Pontes *et al.* (2005).

Figura 1.3 – Representação da localização e batimetria do arquipélago dos Açores. Fonte: Smith e Sandwell (1997).

Figura 1.4 – Ondas junto a São Roque na Ilha de São Miguel. Fonte: Cortesia do Prof. António Carlos Mendes, UBI.

Figura 1.5 – Percentagem de ondas observadas por direcção de incidência, para a área considerada de Lat. $27^\circ N - 45^\circ N$ e Long. $18^\circ W - 36^\circ W$, num total de 6311898 observações. Fonte: Ref. [A.1.1].

Figura 1.6 – Percentagem de ondas observadas, por direcção de incidência, na área de Lat. $36^\circ N - 45^\circ N$ e Long. $27^\circ W - 36^\circ W$, num total de 1577952 observações. Fonte: Ref. [A.1.1].

Figura 1.7 – Ilha do Corvo nos Açores. Fonte: Ref. [A.1.2].

Figura 1.8 – Contornos de profundidade junto à costa da ilha do Corvo, Açores. Fonte: Carta náutica adquirida no Instituto Hidrográfico Português a 28/02/2022.

Figura 2.1 – Plataforma de testes Kaimei. Fonte: Falcão e Henriques (2016).

Figura 2.2 – Central de demonstração OWC Kvaerner Brug em Toftestallen. Fonte: Delmonte *et al.* (2015).

Figura 2.3 – Dispositivo absorvedor pontual proposto por Budar e Falnes (1975). Fonte: adaptado de Budar e Falnes (1975).

Figura 2.4 – Visualização das oscilações do Pato de Salter em tanque de ondas (esquerda) e representação de uma fileira de dispositivos no mar (direita). Fonte: Salter (2016); Falnes (2007).

Figura 2.5 – Secção transversal de uma célula pneumática do LFB (esquerda), representação do dispositivo completo (direita). Fonte: Cockerell et al. (1981).

Figura 2.6 – Dispositivo SEA-Clam linear (esquerda) e dispositivo SEA-Clam circular (direita). Fonte: Ref. [A.2.1]; Bellamy et al. (2016).

Figura 2.7 – Central OWC LIMPET da Ilha de Islay, na Escócia (esquerda); Central OWC da Ilha do Pico, nos Açores (direita). Fonte: The Queen's University of Belfast (2002); Falcão et al. (2020).

Figura 2.8 – Dispositivo OE Buoy (esquerda) e dispositivo Oceanlinx (direita). Fonte: Ref. [A.2.3]; Ref. [A.2.5].

Figura 2.9 – Dispositivo *Pelamis* (esquerda) e dispositivo CrestWing (direita). Fonte: Ref. [A.2.7]; Ref. [A.2.8].

Figura 2.10 – Dispositivo Shoushan. Fonte: Ocean Energy Systems (2021).

Figura 2.11 – Dispositivo Wavebob à escala 1:40 na baía de Galway (esquerda), dispositivo SEAREV à escala 1:12 (centro) e dispositivo AWS Arquimedes Wave Swing prestes a ser afundado no EMEC (direita). Fonte: Weber et al. (2009); Cordonnier et al. (2015); Ref. [A.2.9].

Figura 2.12 – Dispositivo Oyster em doca seca durante operações de manutenção. Fonte: Ref. [A.2.13].

Figura 2.13 – Dispositivo WaveDragon em Nissum Bredning, Dinamarca. Fonte: Tedd et al. (2006).

Figura 2.14 – Central OWC de Mutriku durante uma tempestade (esquerda) e dispositivo Marmok-A5 durante o transporte para o local de lançamento em Espanha (direita). Fonte: Ref. [A.2.16]; Ref. [A.2.17].

Figura 2.15 – Gerador linear do dispositivo SEABASED durante a sua instalação no parque de energia das ondas de Sotenäs (esquerda) e respectivas bóias na superfície do mar (direita). Fonte: Ref. [A.2.18].

Figura 2.16 – a) Dispositivos WaveClapper instalados no pontão World War II Ammunition Jetty, em Gibraltar; b) dispositivo WavEel em operação em Runde, na Noruega; c) dispositivo H24 a ser preparado para instalação em Marina di Pisa, Itália; d) dispositivo Wello Penguin no BIMEP. Fonte: Ref. [A.2.25]; Ref. [A.2.21]; Ref. [A.2.22]; Ref. [A.2.26].

Figura 2.17 – Dispositivo Waveroller durante a instalação em Peniche, Portugal (esquerda) e dispositivo CorPower antes da sua instalação na Aguçadoura (direita). Fonte: Ref. [A.2.27]; Ref. [A.2.29].

Figura 2.18 – Dispositivo patenteado por Francis Farley. Fonte: Farley (2012).

Figura 2.19 – Dispositivo de volume compressível proposto por Kurniawan et al. (2014): configuração assente no fundo (esquerda); configuração flutuante (direita). Fonte: Kurniawan et al. (2014).

Figura 2.20 – Dispositivo AWS-III durante os testes à escala 1:15 na zona de testes MARIN. Fonte: Ref. [A.2.30].

Figura 2.21 – Ilustração do dispositivo mWave. Fonte: Ref. [A.2.32].

Figura 2.22 – Modelo do dispositivo M3Wave DMP durante o seu lançamento para testes ao largo da costa de Oregon, nos Estados Unidos da América. Fonte: Ref. [A.2.33].

Figura 2.23 – Diagramas das três configurações do dispositivo em estudo em Plymouth. Fonte: Greaves et al. (2016).

Figura 2.24 – Modelo do dispositivo *Anaconda* testado em tanque de ondas. Fonte: Farley et al. (2012).

Figura 2.25 – Representação modelo do dispositivo de Choplain e Chaplin (esquerda) e modelo do dispositivo Wave Carpet (direita). Fonte: Choplain (2012); Ref. [A.2.35].

Figura 3.1 – Dispositivo atenuador de tubo distensível testado à escala 1:100. Fonte: Cortesia do Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Turbomáquinas (*fluidslab*) da Universidade da Beira Interior.

Figura 3.2 – Dispositivo atenuador de tubo distensível com PTO pneumático testado à escala 1:50 por Mendes et al. (2017).

Figura 3.3 – Modos de vibração de uma viga encastrada numa extremidade com massa concentrada na extremidade livre.

Figura 3.4 – Acoplamento do tubo distensível a uma OWC com PTO pneumático.

Figura 3.5 – Representação esquemática da câmara pneumática e PTO utilizado nos modelos físicos.

Figura 4.1 – Modelo à escala 1:50 do sistema atenuador de tubo distensível, acoplado a uma OWC que é apoiada numa plataforma assente no fundo do tanque hidrodinâmico.

Figura 4.2 – Estrutura tubular de treliças que suporta o modelo físico do dispositivo de tubo distensível.

Figura 4.3 – Sistema de aquisição de dados.

Figura 4.4 – Declive H/λ das ondas incidentes geradas no tanque em função do período T .

Figura 4.5 – Coeficiente de trabalho $\overline{\Delta p}/(2r\rho_1g)$ em função do caudal volúmico de ar médio através do orifício do PTO, para todas as impedâncias e séries de ondas testadas.

Figura 4.6 – Factor de amplificação ζ em função do período das ondas incidentes, para todas as impedâncias do PTO testadas no modelo à escala 1:50, sujeito às ondas da série 1.

Figura 4.7 – Potência média extraída pelo PTO P em função do período das ondas incidentes, para todas as impedâncias do PTO testadas no modelo à escala 1:50, sujeito às ondas da série 1.

Figura 4.8 – Comprimento de captura de energia C_W em função do período das ondas incidentes, para todas as impedâncias do PTO testadas no modelo à escala 1:50, sujeito às ondas da série 1.

Figura 4.9 – Características pressão-caudal (esquerda), obtidas assumindo escoamento incompressível (via deslocamento da OWC) e assumindo escoamento

compressível (via pressão na câmara pneumática), para um orifício do PTO com $d_0 = 30 \text{ mm}$ sob a acção das ondas incidentes da série 1; variação percentual do comprimento de captura ΔC_W devida a ignorar a compressibilidade do ar (direita), em função da pressão diferencial na câmara pneumática, para todas as impedâncias testadas sob a acção das ondas incidentes da série 1.

Figura 5.1 – Modelo do dispositivo atenuador de tubo distensível. a) vista geral; b) pormenor da OWC e PTO; c) diagrama e dimensões.

Figura 5.2 – Topo da câmara pneumática e placa com o orifício do PTO.

Figura 5.3 – Registo de 5 s das séries temporais do deslocamento da OWC z , pressão relativa na câmara pneumática p e do factor de expansibilidade ε , para o sistema com um orifício de diâmetro $d_0 = 30 \text{ mm}$, sujeito a ondas da série 1 com $T = 1,17 \text{ s}$.

Figura 5.4 – Comparação entre o coeficiente de descarga fixo $C_d = 0,6$ e calculado iterativamente segundo Miller (1996), para o sistema com um orifício com $d_0 = 30 \text{ mm}$, sujeito a ondas da série 1 com $T = 1,17 \text{ s}$.

Figura 5.5 – Característica pressão-caudal dos vários orifícios do PTO testados com o modelo à escala 1:20.

Figura 5.6 – Factor de amplificação ζ em função do período das ondas incidentes T , para as ondas da série 1 e todas as impedâncias do PTO testadas.

Figura 5.7 – Razão de energia armazenada na OWC E_S/E_i em função do período das ondas incidentes T , para as ondas da série 2 (direita).

Figura 5.8 – Registo de 5 s das séries temporais da pressão relativa na câmara pneumática $p(t)$, caudal de ar através do orifício $Q(t)$, potência instantânea $P(t)$ e potência média extraída no PTO P , para o sistema com um orifício com $d_0 = 30 \text{ mm}$, sujeito a ondas da série 1 com $T = 1,17 \text{ s}$.

Figura 5.9 – Comprimento de captura de energia C_W em função do período das ondas incidentes T da série 1.

Figura 5.10 – Variação percentual do comprimento de captura ΔC_W devida a ignorar a compressibilidade do ar em função da pressão diferencial média na câmara pneumática, para os orifícios de diâmetro $d_0 = 20 \text{ mm}$ e $d_0 = 60 \text{ mm}$, sob a acção das ondas incidentes da série 1.

Figura 6.1 – Impedância normalizada Z em função do caudal volúmico Q , para o presente modelo à escala 1:20 e para o modelo à escala 1:25 de Chaplin et al. (2012).

Figura 6.2 – Comprimento de captura C_W em função do período normalizado T/T_1 : a) presente o modelo à escala 1:20 em ondas da série 1, com $Z = 0,19 - 0,55$, e modelo à escala 1:25 de Chaplin et al. (2012) com impedância constante $Z = 0,64$ (esquerda); b) presente modelo à escala 1:20 em ondas da série 1, com $Z = 3,11 - 5,61$, e modelo à escala 1:25 de Chaplin et al. (2012) com impedância constante $Z = 3,30$ (direita).

Figura 6.3 – Representação do sistema OWC circular sem tubo distensível.

Figura 6.4 – Comprimento de captura C_W em função do período normalizado T/T_0 , para o presente o modelo à escala 1:20 sob a acção das ondas da série 1, comparado com as previsões teóricas de Evans e Porter (1997) para uma OWC circular vertical com profundidade de imersão fixa $a/h = 1/2$.

Figura 6.5 – Comprimento de captura C_W em função do período normalizado T/T_0 , para o presente o modelo à escala 1:20 sob a acção das ondas da série 1, comparado com as previsões teóricas de Martins-Rivas e Mei (2009) para uma OWC circular vertical assente no fundo com profundidade de imersão do lábio frontal $a/h = 1/5$.

Figura 6.6 – Comparação do factor de amplificação ζ do dispositivo com e sem tubo distensível, em função do período T das ondas incidentes pertencentes à série de ondas 1, para o sistema não amortecido e amortecido com $d_0 = 60 \text{ mm}$.

Figura 6.7 – Envelopes de comprimento de captura da OWC com e sem tubo, para as ondas incidentes da série 1.

Figura 6.8 – Regressões do factor de amplificação do modelo à escala 1:20 em função do declive H/λ das ondas incidentes da série 1, para as diferentes impedâncias do sistema.

Figura 6.9 – Envelopes de comprimento de captura C_W em diâmetros do tubo, em função do número de onda adimensional kL , para as ondas incidentes da série 1 testadas com os modelos à escala 1:50 e 1:20.

Figura 7.1 – Barreira vertical e boca da OWC (a); cotovelo e chaminé vertical atrás da barreira (b).

Figura 7.2 – Representação do sistema completo na configuração B.

Figura 7.3 – Dispositivo com canal de focagem (configuração C) no tanque de ondas.

Figura 7.4 – Canal de focagem.

Figura 7.5 – Factor de amplificação ζ em função do período T das ondas incidentes, para o sistema nas configurações B (lado esquerdo) e C (lado direito).

Figura 7.6 – Comprimento de captura C_W do dispositivo na configuração B, em função do período da onda incidente T , para todas as impedâncias do PTO testadas.

Figura 7.7 – Movimentos de flexão e alongamento do tubo distensível, a par das ondas de pressão no seu interior, durante o processo de extracção de energia das ondas incidentes pelo dispositivo na configuração B.

Figura 7.8 – Comprimento de captura C_W do dispositivo na configuração C, em função do período da onda incidente T , para todas as impedâncias do PTO testadas.

Figura 7.9 – Fotografias da resposta do tubo distensível, para o dispositivo na configuração C.

Figura 7.10 – Comprimento de captura máximo em função do período das ondas incidentes, para as três configurações estudadas.

Figura 8.1 – Localização das 6 bóias ondógrafo do Projecto CLIMAAT.

Figura 8.2 – Perda de potência percentual na transição de offshore para a linha da costa. Fonte: Folley e Whittaker (2009).

Figura 8.3 – Iso linhas de altura de onda significativa no Grupo Ocidental do Arquipélago dos Açores, no dia 28/02/2023. Fonte: Ref. [A.8.2].

Figura 8.4 – Representação do protótipo do dispositivo de tubo distensível com OWC, operando num canal de focagem, incorporados num quebra-mar.

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Histograma bivariado de altura significativa de onda e período médio omnidireccionais, na região de Lat. $27^{\circ}N - 45^{\circ}N$ e Long. $18^{\circ}W - 36^{\circ}W$. Fonte: Ref. [A.1.1].

Tabela 1.2 – Histograma bivariado de altura significativa de onda e período médio omnidireccionais na região Lat. $36^{\circ}N - 45^{\circ}N$ e Long. $27^{\circ}W - 36^{\circ}W$. Fonte: Ref. [A.1.1].

Tabela 1.3 – CAPEX e OPEX da energia das ondas e das marés, em função da capacidade instalada. Fonte: COGEA e WAVEC (2018).

Tabela 2.1 – Zonas de testes de dispositivos de energia das ondas na Europa.

Tabela 4.1 – Dimensões do tubo distensível.

Tabela 4.2 – Dimensões sistema OWC / PTO.

Tabela 4.3 – Dimensões dos elementos da estrutura tubular de treliças.

Tabela 4.4 – Campo de ondas incidentes gerado para o modelo à escala 1:50.

Tabela 5.1 – Dimensões do tubo distensível.

Tabela 5.2 – Dimensões sistema OWC / PTO.

Tabela 5.3 – Campo de ondas incidentes gerado para o modelo à escala 1:20.

Tabela 7.1 – Dimensões principais da OWC, PTO e tubo distensível, nas configurações B e C.

Tabela 7.2 – Campos de ondas incidentes geradas no tanque hidrodinâmico.

Tabela A.1 – Histograma bivariado de altura significativa de onda em função da direcção de incidência na região Lat: $27^{\circ}N - 45^{\circ}N$, Long: $18^{\circ}W - 36^{\circ}W$. Fonte: Ref. [A.1.1].

Tabela A.2 – Histograma bivariado de período médio de onda em função da direcção de incidência na região Lat: $27^{\circ}N - 45^{\circ}N$, Long: $18^{\circ}W - 36^{\circ}W$. Fonte: Ref. [A.1.1].

Lista de Acrónimos

AEP	Anual Electricity Production (Produção Eléctrica Anual)
ARM	Águas e Resíduos da Madeira
AWS	Arquimedes Wave Swing
BBDB	Backward-Bent Duct Buoy (Bóia com tubo dobrado para trás)
BIMEP	Biscay Marine Energy Platform
CAPEX	Capital Expenditure (Custos Capitais)
CLIMAAT	Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos
COAST Lab	Coastal, Ocean and Sediment Transport Laboratory
CORES	Components for Ocean Renewable Energy Systems
DHI	Danysh Hydraulic institute
DOE	Department of Energy (Departamento da Energia dos Estados Unidos)
EAP	Electroactive Polimers (Polímeros Electro-activos)
ECMWF	European Center for Medium-Range Weather Forecasts
EDA	Electricidade dos Açores
EDP	Electricidade de Portugal
EMEC	European Marine Energy Centre
ERSARA	Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos dos Açores
EUA	Estados Unidos da América
FEDER	Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional
FSE+	Fundo Social Europeu Mais
GEA	Gibraltar Electricity Authority
IFS	Integrated Forecasting System
IHP	Instituto Hidrográfico Português
IPMA	Instituto Português do Mar e Atmosfera
I&D	Investigação e Desenvolvimento
JRC	Joint Research Centre
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (Instituto Real Meteorológico dos Países Baixos)
LCOE	Levelized Cost of Energy
LFB	Lancaster Flexible Bag
MARIN	Maritime Research Institute Netherlands
MPC	Model Predictive Control

NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OP	Objectivo Político
OPERA	Open Sea Operating Experience to Reduce Wave Energy Cost
OPEX	Operational Expenditure (Custos Operacionais)
OWC	Oscilating Water Column (Coluna de Água Oscilante)
OWSC	Oscillating Wave Surge Converter
PI	Prioridade de Investimento
PNEC	Plano Nacional Integrado de Energia e Clima
POA	Programa Operacional Açores
PPA	Power Purchase Agreement
PRE	Produção de Energia Elétrica em Regime Especial
PTO	Power take-off (Sistema de Extracção de Potência)
PVC	Polyvinyl Chloride
RNC	Roteiro para a Neutralidade Carbónica
SOWFIA	Streamlining of Ocean Wave Farms Impact Assessment
SV	Seasonal Variability
SWAN	Simulating Waves Nearshore
TAPCHAN	Tapered Channel Wave Power Plant
TRL	Technology Readiness Level
UBI	Universidade da Beira Interior
UE	União Europeia
UK	United Kingdom
WEC	Wave Energy Converter
WERATLAS	Wave Energy Resource Atlas
ZEE	Zona Económica Exclusiva

Capítulo 1

Introdução

O desenvolvimento de métodos de produção de energia eléctrica a partir de fontes de energia renováveis é actualmente um importante objectivo a alcançar, com vista a tornar possível que a actividade humana tenha um impacto neutro no clima. Concretamente no espaço Europeu a *Renewable Energy Directive 2009/28/EC*, revista em 2018, define as metas a cumprir até 2050 neste contexto – Directive (EU) 2018/2001. O aproveitamento dos recursos naturais e em particular das energias alternativas torna-se extremamente importante nas regiões insulares, uma vez que estas comunidades são muito dependentes da importação de combustíveis fósseis para satisfazer as suas necessidades energéticas. As ondas do mar constituem uma importante fonte de energia renovável que pode ser utilizada para produzir electricidade e, deste modo, suprir uma parte considerável das necessidades de abastecimento para fins domésticos e também industriais. Neste capítulo são reunidos e apresentados alguns dados relevantes sobre o potencial global da energia das ondas, particularizando-se em seguida para o continente Europeu e para Portugal. Relativamente ao Arquipélago dos Açores é efectuado um levantamento do clima de ondas nesta região em termos gerais, levantamento esse que é em seguida aprofundado para o Grupo Ocidental do Arquipélago. Por último, são descritos os objectivos gerais do presente trabalho.

1.1 A energia das ondas

As ondas oceânicas são geradas pela acção do vento sobre a superfície do mar. A energia potencial e a energia cinética dessas ondas é um recurso que pode ser utilizado para

realizar trabalho útil, nomeadamente na geração de energia eléctrica. Existem actualmente diferentes tecnologias para cumprir esta missão, algumas das quais já entraram em fase pré-comercial de desenvolvimento. Cada conceito é função da energia disponível e da fisiografia costeira da região onde este irá funcionar. É pois importante conhecer o clima de ondas e o potencial disponível nas regiões de interesse.

1.1.1 Recurso global

Ao longo dos últimos cinquenta anos foram efectuadas diversas avaliações do potencial energético das ondas do mar. Em 1973, Isaacs e Seymour estimaram que a potência global bruta da energia das ondas estaria entre 1 – 10 *TW* (Isaacs & Seymour, 1973). Neste caso o potencial foi analisado sem ter em conta a direcionalidade das ondas, i.e. trata-se de um potencial omnidireccional. É no entanto importante também considerar a componente líquida deste recurso, resolvida direcionalmente. Mais tarde (Mollison, 1986) estimou o potencial global da energia das ondas, baseado num modelo numérico de *hindcasting* desenvolvido pelo Gabinete Meteorológico do Reino Unido (*UK Meteorological Office*). Este modelo foi utilizado desde 1978 para a obtenção de previsões do clima de ondas no Atlântico Norte. Mollison frisa a importância de considerar a direcionalidade das ondas, dado que apenas os dispositivos do tipo absorvedor pontual conseguem aproveitar o recurso omnidireccional. Este investigador previu que, considerando a direcionalidade das ondas, o recurso global potencialmente explorável seria grosso modo idêntico ao consumo mundial de electricidade ao tempo (1 *TW*). Note-se que esta estimativa é muito mais conservadora do que o previsto por Isaacs e Seymour. Em termos omnidireccionais, Mollison previu que a potência média bruta disponível globalmente em mar aberto ronda os 100 *kW/m*. Para a costa Atlântica da Europa Ocidental o valor previsto desce para 55 *kW/m* e para 84 *kW/m* nos Açores.

Com vista a melhorar estas estimativas o potencial global da energia das ondas foi posteriormente revisto por Cornett (2008) e, mais tarde, por Mørk et al. (2010). Cornett (2008) avançou previsões sobre o clima de ondas em águas profundas, longe da costa, utilizando o modelo WaveWatch III do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Estas previsões foram obtidas para uma malha que engloba latitudes entre $\pm 77^\circ$, com uma resolução de $1,25^\circ$ Lat por 1° Long. Este estudo foi pioneiro na contabilização da variabilidade temporal do recurso. O índice de variabilidade sazonal SV (*seasonal variability*) permite definir coeficientes de variação do potencial da energia das

ondas, a fim de prever a variabilidade deste recurso a curto, médio e longo prazo. Este índice é definido como a diferença entre o potencial médio observado na estação do ano mais energética e menos energética, dividido pelo potencial médio anual. A variabilidade temporal da energia das ondas é de extrema importância e afecta significativamente a viabilidade de qualquer possível projecto de extracção desta energia. Em termos práticos, locais com uma taxa de variação de energia das ondas moderada e estável podem vir a ser mais atractivos que locais onde o recurso é mais energético, mas mais variável. Tipicamente a variação sazonal da energia das ondas é maior no hemisfério Norte, sendo que o máximo SV ocorre perto dos pólos. O Inverno é a estação mais energética (Dezembro a Fevereiro), enquanto que o Verão corresponde à estação menos energética (Junho a Agosto). Particularmente para Portugal e Açores, a variabilidade sazonal ronda 1,25 - 2. Regra geral, as maiores ondas ocorrerem entre $\pm 30^\circ$ e $\pm 60^\circ$ de latitude, sendo geradas por tempestades extratropicais. Na realidade, pode constatar-se que o maior potencial médio anual da energia das ondas ocorre no Hemisfério Sul, em latitudes entre -40° e -60° , atingido valores superiores a 120 kW/m . As zonas mais intensas são perto das Ilhas Kerguelen e perto das costas Sul da Austrália, Nova Zelândia, África do Sul (Cabo das Tormentas) e Chile (Cabo Horn).

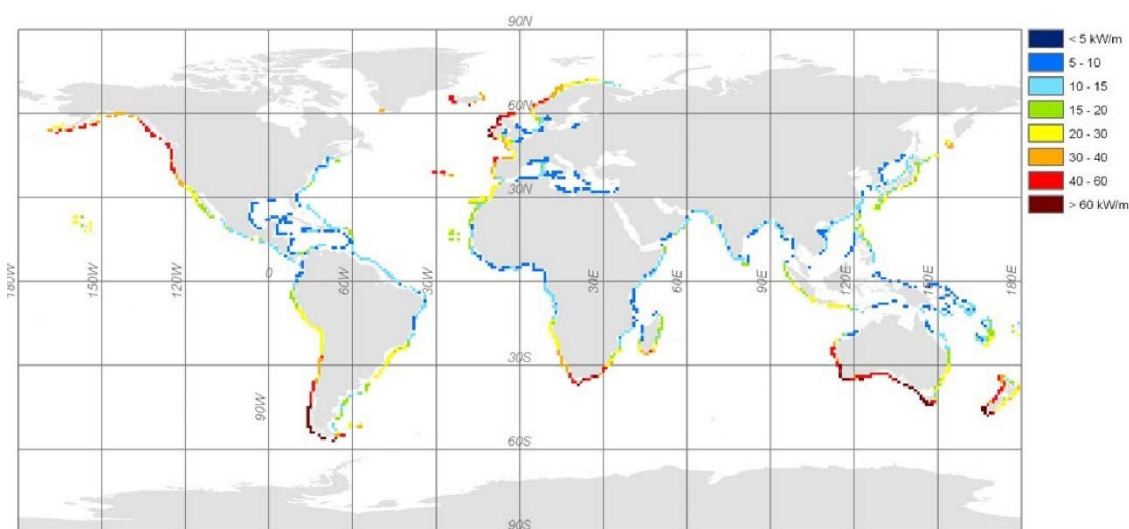


Figura 1.1 : Potência líquida anual da energia das ondas em zonas costeiras, excluindo contribuições onde $P \leq 5 \text{ kW/m}$ ou onde há presença de gelo.

Fonte: Mørk et al. (2010).

Mørk et al. (2010) reavaliaram o potencial da energia das ondas em águas profundas, utilizando a base de dados WorldWaves (Barstow et al., 2003). O estudo foi realizado para uma malha global com uma precisão de $0,5^\circ$ lat/long, considerando intervalos temporais de 6 horas durante um período de 10 anos. Com base neste trabalho, o recurso bruto global da

energia das ondas é actualmente estimado em cerca de 3,7 TW. No entanto, é importante referir que 20% deste potencial não é utilizável pelas tecnologias actualmente em desenvolvimento, pois corresponde a áreas onde a densidade de energia é muito baixa ($P \leq 5 \text{ kW/m}$) ou áreas cobertas por gelo. Assim sendo, o recurso líquido disponível para o aproveitamento da energia das ondas é menor: 2,98 TW. As estimativas de Mørk para mar alto são bastante conservadoras, mas ainda assim são concordantes com as de Cornett (2008). A Fig. 1.1 mostra as previsões teóricas da distribuição global do potencial líquido anual da energia das ondas para zonas costeiras de águas profundas, segundo Mørk et al. (2010). À semelhança do obtido por Cornett (2008), este potencial líquido é maior para latitudes entre $\pm 30^\circ$ e $\pm 60^\circ$. De acordo com a estimativa de Mørk, o potencial nas costas de Portugal Continental e Ilhas está compreendido entre 20 e 60 kW/m.

1.1.2 Potencial na Europa e em Portugal

A nível Europeu, uma importante fonte de informação sobre o clima de ondas é o WERATLAS (*Wave Energy Resource Atlas*) – Pontes (1998). Este atlas compreende um conjunto de estatísticas anuais e sazonais para 85 locais em mar aberto, distribuídos ao longo do oceano Atlântico e do mar Mediterrâneo. A costa Atlântica Europeia em particular caracteriza-se por ter um potencial de energia das ondas especialmente elevado. Clément et al. (2002) mais tarde caracterizaram a energia das ondas na Europa, especificando o potencial disponível nos vários países com costa litoral. O potencial médio anual da energia das ondas varia desde 25 kW/m, ao largo das Ilhas Canárias, até 75 kW/m ao largo da Irlanda e Escócia. Mais a Norte, o potencial decresce para 30 kW/m ao largo da costa Norueguesa. No Mar do Norte o recurso varia desde 21 kW/m, na zona mais a Norte até metade desse valor na zona mais a Sul. Ao largo dos países Europeus da bacia Mediterrânica, o potencial varia entre 4 e 11 kW/m, sendo que os valores máximos ocorrem a Sudoeste do Mar Egeu. Considerando todas as contribuições ao longo das zonas litorais Europeias, o recurso da energia das ondas está avaliado em cerca de 320 GW.

São já vários os países Europeus que consideram a energia das ondas como um recurso que pode ser comercialmente explorado. Destes podemos citar a Dinamarca, a Noruega, a Irlanda, a Espanha, Portugal, a Itália e o Reino Unido. Estes países possuem um potencial de energia das ondas considerável e têm estado activamente envolvidos no aproveitamento dessa energia, contando com apoios governamentais. Na Dinamarca, a

potência média anual da energia das ondas é de $7 - 24 \text{ kW/m}$, com ondas que incidem maioritariamente de Oeste. De acordo com Lewis (1999), na Irlanda a energia disponível é estimada em 375 MWh por metro de litoral, em zonas até 20 m de profundidade. Portugal continental dispõe por sua vez de uma potência anual disponível entre 30 kW/m e 60 kW/m , na costa oeste, sendo os valores máximos encontrados a norte do Cabo da Roca. Estes últimos valores estão de acordo com os obtidos por Mørk et al., em 2010.

Falando concretamente do caso Português, Pires e Pessanha (1986) realizaram uma avaliação preliminar da potência disponível na costa Portuguesa. Foram utilizadas três séries cronológicas de altura significativa e período, obtidas a partir de bóias. Estas representam o clima de ondas nas zonas Norte e Sul da costa Oeste e Costa Sul de Portugal. Foi ainda desenvolvido um modelo analítico a partir destas séries temporais, por forma a obter previsões da potência média anual disponível ao largo de Sines, Roca e Faro. Estes autores concluíram que as ondas mais energéticas ocorrem no cabo da Roca e as menos energéticas ocorrem em Faro, indicando que o clima de ondas é mais intenso na região Norte do País. Mollison e Pontes (1992) reanalisaram a potência das ondas disponível em Portugal, desta vez utilizando modelos numéricos. Posteriormente, Pontes et al. (2005) desenvolveram um atlas específico para as ondas junto à costa continental Portuguesa: o ONDATLAS. Na Fig. 1.2 é possível ver qual é a potência média anual junto à costa portuguesa, assim como a sua sazonalidade.

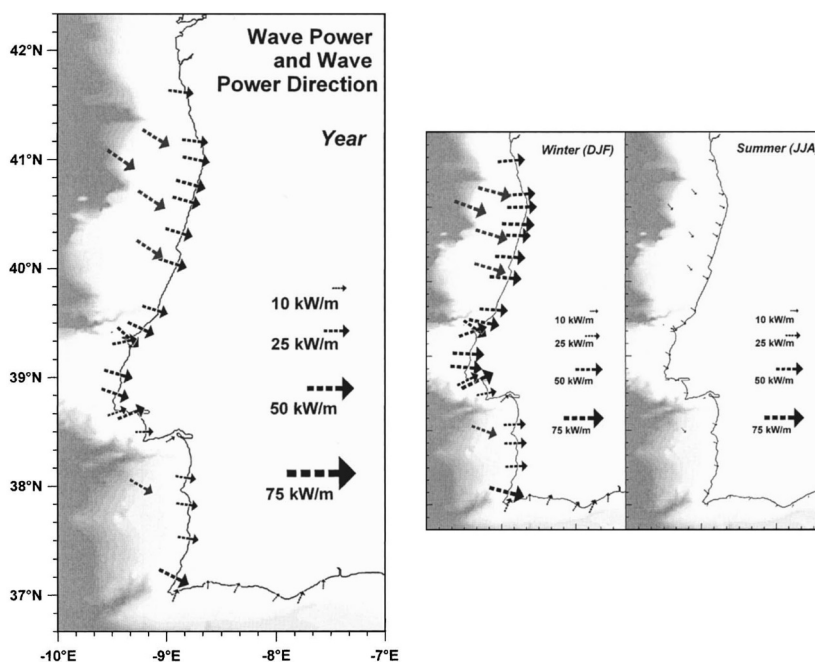


Figura 1.2: Potência média anual e direcionalidade junto à costa Portuguesa (lado esquerdo) e sua variação sazonal do recurso (lado direito).

Fonte: Pontes et al. (2005).

De acordo com Andrade et al. (2007) é possível que a direção de incidência das ondas indicada na Fig. 1.2 sofra uma rotação de 7° no sentido horário até ao fim do século XXI. Esta rotação fica a dever-se às alterações climáticas e à erosão da linha costeira. Este estudo conclui igualmente que as condições extremas de altura de onda têm vindo a aumentar ao longo das últimas décadas, especialmente nos últimos anos. Apesar do estudo ter sido desenvolvido especificamente para a costa Portuguesa, mudanças semelhantes devem ser esperadas noutras zonas litorais da Europa Atlântica. Todos estes factores são importantes e devem ser tidos em conta aquando da avaliação da viabilidade dos sistemas de aproveitamento da energia das ondas.

1.1.3 Clima de ondas no Arquipélago dos Açores

O arquipélago dos Açores é um grupo de nove ilhas de origem vulcânica situadas no Atlântico Norte, a cerca de 1400 km a Oeste de Portugal Continental, entre 37° e 40° N de Latitude e entre 24° e 32° W de Longitude (Fig. 1.3). Geograficamente as ilhas estão divididas em três grupos: o grupo Ocidental que compreende as ilhas das Flores e Corvo; o grupo Central que compreende as ilhas do Faial, Pico, São Jorge, Graciosa e Terceira; o grupo Oriental que compreende as ilhas de São Miguel e Santa Maria.

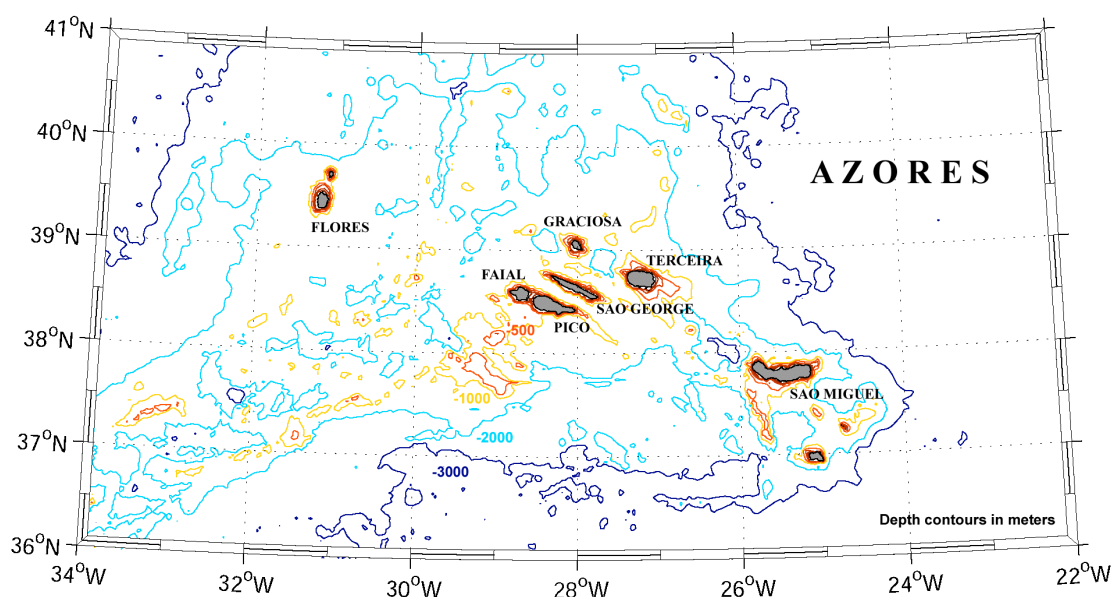


Figura 1.3: Representação da localização e batimetria do arquipélago dos Açores.

Fonte: Smith e Sandwell (1997).

Estas ilhas oceânicas estendem-se por uma área de aproximadamente 1000 km^2 e compreendem o maior conjunto de picos ao longo da crista meso-Atlântica. Assim sendo, regra geral as zonas costeiras do arquipélago têm um elevado gradiente batimétrico (ver Fig. 1.3), fazendo com que a transição de águas profundas para águas pouco profundas seja bastante acentuada. A fig. 1.4 ilustra o comportamento das ondas, onde a rocha vulcânica com elevado gradiente batimétrico causa a sua rebentação bem junto à costa. Isto pode trazer algumas vantagens para o aproveitamento da energia das ondas. Por um lado o elevado gradiente batimétrico não dá origem a uma grande atenuação da ondulação em direcção à costa. Por outro lado, a geomorfologia de determinadas zonas pode ainda dar origem a uma considerável focagem das ondas, como por exemplo em Porto Cachorro na ilha do Pico. Este facto motivou a instalação em 1999 de uma central piloto de energia das ondas (Pico OWC) – ver Falcão (2000).

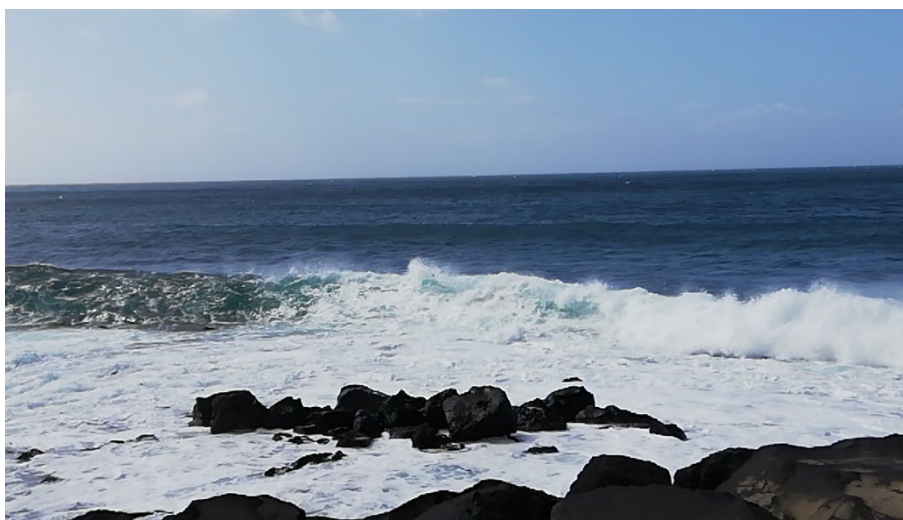


Figura 1.4: Ondas junto a São Roque na Ilha de São Miguel.

Fonte: Cortesia do Prof. António Carlos Mendes, UBI.

A produção de energia eléctrica amiga do ambiente em zonas insulares é um assunto actual de crescente importância, que faz parte da nova Directiva das Energias renováveis, aprovada pelo Parlamento Europeu. Assim sendo, é importante atender ao potencial energético das ondas nesta região com vista a ajudar a cumprir este objectivo. Como já foi referido na secção 1.1.2 o potencial energético líquido anual das ondas nas zonas costeiras de Portugal Continental, em águas profundas, foi estimado por Mørk et al. (2010) entre 30 e 60 kW/m (Fig. 1.1). Especificamente para o arquipélago dos Açores, a potência por metro de frente de onda é de $20 - 60 \text{ kW/m}$. É de referir que nas ilhas dos grupos Central e Ocidental a potência é maior – 40 a 60 kW/m – que nas ilhas do grupo Oriental – 30 a 40 kW/m . Isto está de acordo com a direcção predominante das ondas incidentes nesta zona

e com o efeito de sombra gerado pela presença das ilhas, como se verá mais adiante. A sazonalidade das ondas na região foi também avaliada por Mørk et al. (2010). Neste caso a sazonalidade foi definida como o rácio entre a mínima potência média mensal e a potência média anual das ondas. De acordo com esta última definição, a sazonalidade junto à costa dos Açores será inferior a 20%, o que revela uma variação Inverno/Verão bastante significativa. Isto dificulta a escolha de locais favoráveis ao aproveitamento da energia das ondas e justifica a necessidade de encontrar zonas de focagem naturais. A um nível mais regional, o clima de ondas no arquipélago dos Açores foi avaliado por Pontes (1998) como parte do WERATLAS e, mais tarde, em maior pormenor por Simões et al. (2010) e Rusu e Guedes Soares (2012). Destas publicações é possível concluir que, para poder seleccionar o local mais adequado à implementação de um dispositivo de energia das ondas, é necessário fazer uma análise com elevada resolução. Efectivamente, em Rusu e Guedes Soares (2012) é flagrante que a potência das ondas avaliada a escalas temporais curtas é consideravelmente diferente da potência média anual prevista por Mørk et al. (2010).

Para melhor compreender o clima de ondas na região dos Açores recorreu-se, em alternativa, ao KNMI/ERA-40 Wave Atlas (Caires et al., 2013 e A.1.1). Este atlas foi desenvolvido pelo Instituto Real de Meteorologia dos Países Baixos (KMNI), utilizando a base de dados ERA-40 do European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). O ERA-40 consiste numa reanálise atmosférica e de condições de superfície que cobre um período de 45 anos, desde Setembro de 1957 a Agosto de 2002, utilizando o modelo IFS (*Integrated Forecasting System*). O desenvolvimento do KMNI/ERA-40 Wave Atlas baseou-se num dos produtos do ERA-40 que consiste em analisar campos globais da velocidade do vento de 6 horas em 6 horas, a uma altitude de 10 m, e de parâmetros das ondas tais como a sua altura significativa, período médio e direccionalidade. É importante referir que este atlas não contabiliza a transformação de águas profundas para águas pouco profundas. Para águas pouco profundas é normalmente utilizado em alternativa o modelo SWAN. É também de notar que a presença das ilhas gera um efeito de sombra; portanto, as previsões podem não corresponder à realidade nestas zonas.

A partir de [A.1.1] foram obtidos histogramas bivariados da altura significativa H_s e período médio T_m das ondas incidentes, em função da sua direccionalidade. A tabela 1.1 reúne H_s e T_m omnidireccionais, para a área compreendida entre $27^\circ N - 45^\circ N$ e $18^\circ W - 36^\circ W$. Esta área engloba toda a Zona Económica Exclusiva (ZEE) dos Açores e considera-se que os dados recolhidos para esta zona representam adequadamente o clima de ondas nos Açores em águas profundas. Cumulativamente, foram assumidas como predominantes as condições que englobam 20% ou mais das observações; estes valores estão assinalados a

verde na tabela 1.1. Desta análise é possível concluir que as ondas de águas profundas na região dos Açores são caracterizadas por terem predominantemente uma altura significativa entre 1 e 5 m e um período médio de entre 4 e 8 s. No entanto, em condições tempestuosas estas ondas podem atingir uma altura significativa de 33 m.

Tabela 1.1: Histograma bivariado de altura significativa de onda e período médio omnidireccionais, na região de Lat. 27° N - 45° N e Long. 18° W - 36° W.

Fonte: Ref. [A.1.1].

KMNI/ERA-40 Wave Atlas											
Latitude: 27° N - 45° N; Longitude: 18° W - 36° W											
Nº de observações: 6311898											
T _m /H _s	0 - 1 m	1 - 2 m	2 - 3 m	3 - 4 m	4 - 5 m	5 - 6 m	6 - 7 m	7 - 8 m	8 - 9 m	9 - 33 m	Total (100 × %)
0 - 3 s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 - 4 s	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	6
4 - 5 s	37	525	37	0	0	0	0	0	0	0	598
5 - 6 s	153	1008	685	73	0	0	0	0	0	0	1918
6 - 7 s	151	1287	685	485	111	2	0	0	0	0	2722
7 - 8 s	6	948	610	330	258	103	14	1	0	0	2268
8 - 9 s	0	274	601	242	134	107	72	18	2	0	1451
9 - 10 s	0	21	277	188	88	48	36	31	14	3	705
10 - 11 s	0	1	40	96	54	26	13	9	9	10	257
11 - 12 s	0	0	2	17	19	11	6	3	2	5	63
12 - 13 s	0	0	0	1	3	3	2	1	0	1	10
13 - 33 s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Total (100 × %)	349	4067	2936	1431	668	300	144	62	26	18	10000

Em [A.1.1] foi também possível recolher informação relativa à direccionalidade das ondas no arquipélago dos Açores. A fig. 1.5 reúne a percentagem de ondas observadas, por direcção de incidência (esquerda) e o diagrama polar correspondente (direita). É possível observar que: i) as ondas incidem principalmente de entre Oeste e Norte; ii) cerca de 28,6% das ondas registadas incidem de W-NW; iii) 27,2% incidem de NW-N. Estes dados correspondem a 55,8% de todas as ondas observadas nesta região. Em suma, 88,5% das ondas que incidem de W-NW têm uma altura de onda significativa entre 1 m e 5 m e 98,8% têm um período médio entre 4 s e 11 s. Por sua vez, das ondas que incidem de NW-N, 93,9% têm uma altura de onda significativa entre 1 m e 5 m e 99,5% têm um período médio entre 4 s e 11 s (ver tabelas A.1 e A.2 do anexo A). A direccionalidade das ondas, aliada ao efeito de sombra criado pela presença das ilhas, justificam a diferença do potencial da energia das ondas que se verifica entre as ilhas dos grupos central e ocidental (mais a Oeste) e as ilhas do grupo oriental (mais a Este). É importante referir que o efeito de sombra não é

necessariamente mau para o aproveitamento da energia das ondas. Apesar de gerar uma redução na altura de onda significativa, torna o clima de ondas mais estável, minimizando assim condições extremas que podem ser destrutivas para sistemas de energia das ondas.

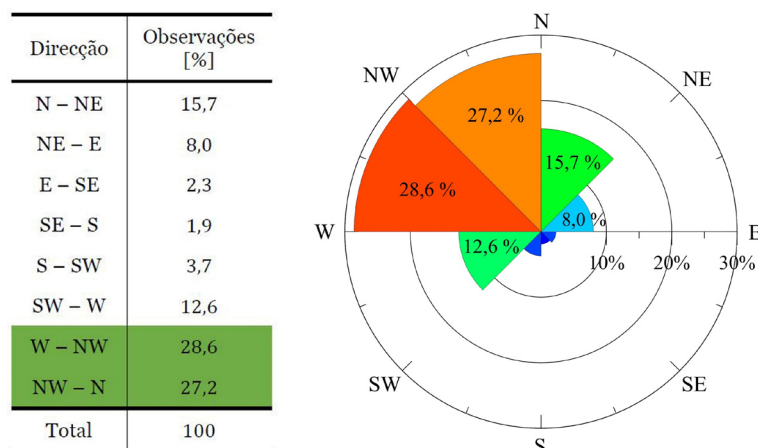


Figura 1.5: Percentagem de ondas observadas por direcção de incidência, para a área considerada de Lat. $27^{\circ}N - 45^{\circ}N$ e Long. $18^{\circ}W - 36^{\circ}W$, num total de 6311898 observações.
Fonte: Ref. [A.1.1].

Em termos gerais podemos dizer que o clima de ondas na região dos Açores é sobretudo caracterizado por ondas de 4 a 11 s de período médio e de 1 a 5 m de altura de onda significativa, incidindo de entre Oeste e Norte. Matos et al. (2015) acrescentam ainda que durante o Verão as ondas têm uma altura significativa maioritariamente compreendida entre 0 e 3,5 m (incidindo de entre 320° e 335°), enquanto que no Inverno esta gama é de 0 a 5,5 m (incidindo de entre 330° e 350°). Adicionalmente, a Directiva-Quadro Estratégia Marinha para a subdivisão dos Açores (SRMCT, 2014) diz que a probabilidade de ocorrência de ondas com alturas superiores a 6 m é inferior a 5% nos meses de Inverno e inferior a 1% nos meses de Verão. É ainda importante notar que, de acordo com previsões do Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA), apesar do período de pico das ondas observadas na zona de sombra das ilhas ser geralmente inferior ao observado em mar aberto pode chegar a ser consideravelmente superior junto à costa em certas situações.

Se for considerada uma região mais restrita, entre $36^{\circ}N - 45^{\circ}N$ e $27^{\circ}W - 36^{\circ}W$, podemos estimar o clima de ondas afecto às ilhas do Grupo Ocidental do arquipélago e parte do Grupo Central. A tabela da fig. 1.6 (esquerda) mostra que, se considerarmos apenas esta área, a direcção predominante das ondas é agora SW – NW, representando 55,1% das ondas observadas.

Direcção	Observações [%]
N - NE	7,1
NE - E	4,5
E - SE	3,0
SE - S	3,6
S - SO	8,1
SO - O	23,6
O - NO	31,5
NO - N	18,7
Total	100%

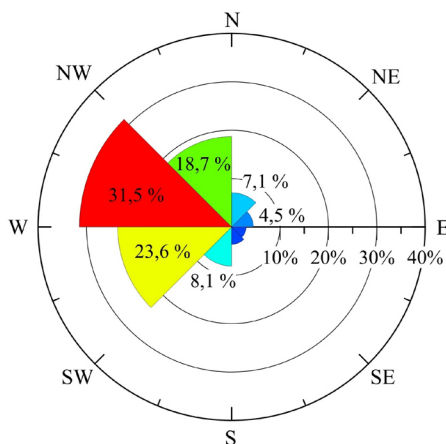


Figura 1.6: Percentagem de ondas observadas, por direcção de incidência, na área de Lat. $36^{\circ}N - 45^{\circ}N$ e Long. $27^{\circ}W - 36^{\circ}W$, num total de 1577952 observações.

Fonte: Ref. [A.1.1].

Tabela 1.2: Histograma bivariado de altura significativa de onda e período médio omnidireccionais na região Lat. $36^{\circ}N - 45^{\circ}N$ e Long. $27^{\circ}W - 36^{\circ}W$.

Fonte: Ref. [A.1.1].

KMNI/ERA-40 Wave Atlas											
Latitude: $36^{\circ}N - 45^{\circ}N$; Longitude: $27^{\circ}W - 36^{\circ}W$											
Nº de observações: 1577952											
T_m/H_s	0 - 1 m	1 - 2 m	2 - 3 m	3 - 4 m	4 - 5 m	5 - 6 m	6 - 7 m	7 - 8 m	8 - 9 m	> 9 m	Total (100 × %)
0 - 3 s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 - 4 s	3	8	0	0	0	0	0	0	0	0	11
4 - 5 s	36	503	66	0	0	0	0	0	0	0	604
5 - 6 s	147	836	843	128	1	0	0	0	0	0	1954
6 - 7 s	130	1044	731	717	188	6	0	0	0	0	2816
7 - 8 s	4	531	663	458	414	191	35	2	0	0	2297
8 - 9 s	0	62	452	346	213	180	145	42	4	0	1444
9 - 10 s	0	2	75	185	134	82	66	62	29	7	641
10 - 11 s	0	0	2	30	48	36	22	15	16	21	191
11 - 12 s	0	0	0	1	6	8	6	3	2	11	37
12 - 13 s	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	4
13 - 33 s	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total (100 × %)	320	2986	2832	1865	1004	504	275	124	51	39	10000

A tabela 1.2 mostra as alturas significativas e períodos médios das ondas observadas nesta área. É possível extrair que 97,56% das observações têm períodos compreendidos entre 4 s e 10 s. Numa perspectiva mais conservadora as ondas com períodos médios entre 5 s e 8 s correspondem a 70% das observações. Particularmente para o grupo Ocidental do

Arquipélago, que inclui as ilhas das Flores e do Corvo, Matos et al. (2015) concluem ainda que nos meses de Inverno o potencial da energia das ondas pode atingir 160 kW/m (Fevereiro) e 20 kW/m no Verão (Julho). Isto demonstra que, em condições reais, qualquer dispositivo a ser instalado nesta zona terá de estar preparado para resistir ao espectro total de períodos e alturas significativas de onda representados nestas tabelas, o que acarreta alguns desafios em termos de engenharia.

1.1.4 O caso da Ilha do Corvo

Após avaliar o clima de ondas no arquipélago dos Açores, é preciso ter em conta que o aproveitamento da energia das ondas num contexto insular deverá ser direccionado para as necessidades específicas de cada ilha. Focando-nos na ilha do Corvo (Fig. 1.7), que é a mais pequena e mais ocidental do arquipélago, esta tem uma área de apenas de $17,11 \text{ km}^2$ e possui uma população de cerca de 470 habitantes. O consumo eléctrico é modesto, distribuído por 285 consumidores, tendo atingido $139\,869 \text{ kWh}$ no mês de Agosto de 2022 (EDA, 2022). Deste valor 89% corresponde a consumo de baixa tensão e os restantes 11% correspondem a consumo de média tensão. O sistema electroprodutor da ilha do Corvo é constituído pela Central Termoeléctrica do Corvo a diesel e pela recente Central Fotovoltaica do Pão de Açúcar. Estas totalizam uma potência instalada de cerca de $0,9 \text{ MW}$ (EDA, 2021).

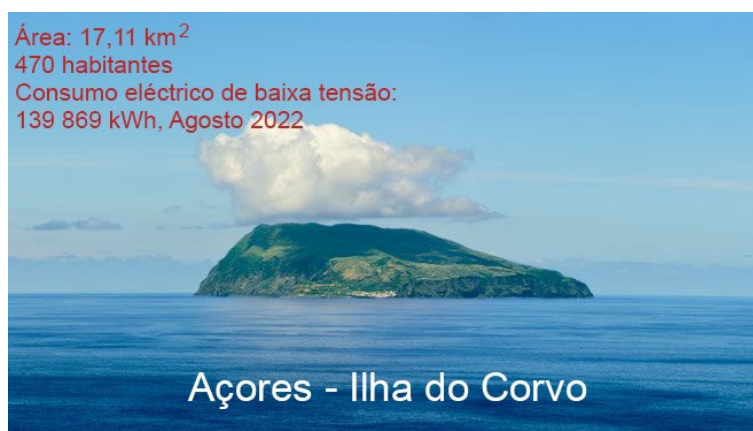


Figura 1.7: Ilha do Corvo nos Açores.

Fonte: Ref. [A.1.2].

Segundo a carta náutica do IHP relativo à ilha do Corvo, que é apresentada na Fig. 1.8, profundidades inferiores a 200 m podem ser encontradas a uma distância máxima de aproximadamente 3,4 km da costa Oeste da ilha. Isto sugere um gradiente médio de 3,4°. Na costa Este da ilha a mesma profundidade pode ser encontrada no máximo a 1,8 km da costa, sugerindo um gradiente médio superior de 6,5° nesta zona. Profundidades inferiores 50 m podem ser encontradas a uma distância de até 1300 m da costa Oeste da ilha e 900 m da costa Este da ilha. Profundidades menores de até 20 m podem por sua vez ser encontradas no máximo a 680 m de distância da costa Oeste da ilha e 380 m da costa Este da ilha. Especificamente para a zona de profundidades entre os 20 m e 50 m, o gradiente batimétrico médio é então 2,8° a Oeste e 3,3° a Este. Em comparação, a plataforma continental de Portugal Continental estende-se em média até 78 km desde a costa, com um gradiente típico inferior a 1°, terminando a uma profundidade situada entre 130 e 200 m (da Silva, 2012). Desta análise podemos concluir que, apesar da potência das ondas ser superior na costa Oeste da ilha onde não há efeito de sombra, o gradiente batimétrico nessa zona é inferior. Um dispositivo de recuperação de energia das ondas pode então ser mais viável na costa Este da ilha onde, apesar da potência das ondas disponível ser menor, o maior gradiente batimétrico permite a sua instalação mais perto da costa e reduz assim os custos operacionais da central.

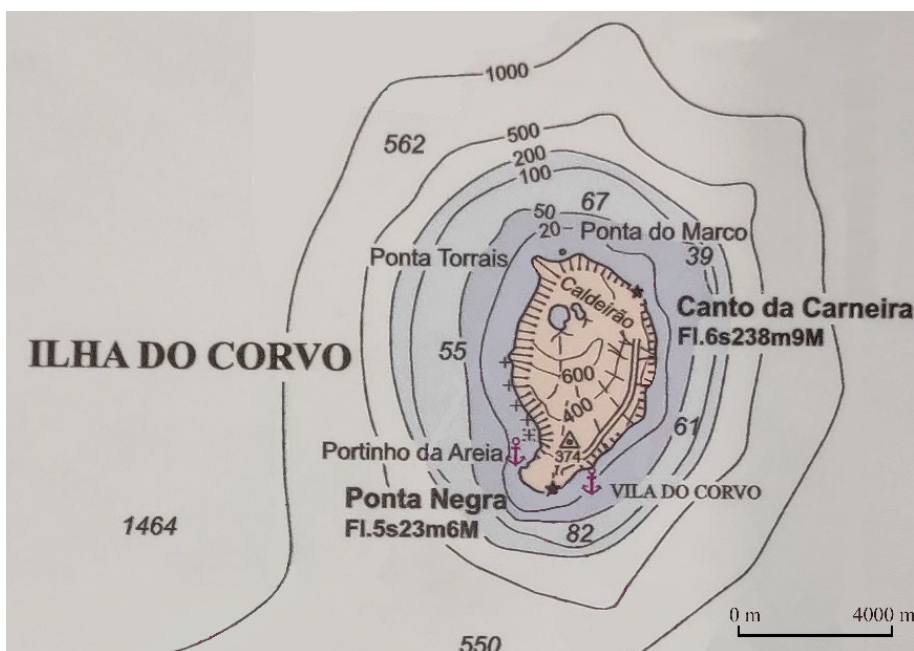


Figura 1.8: Contornos de profundidade junto à costa da ilha do Corvo, Açores.
Fonte: Carta náutica adquirida no Instituto Hidrográfico Português a 28/02/2022.

1.2 Metas da UE para as energias renováveis

De acordo com os dados do projecto Climate Watch do *World Resources Institute* [A.1.3], em 2016 o sector energético foi responsável por cerca de 73% das emissões de gases de efeito de estufa. Dado o impacto cada vez mais visível das alterações climáticas e a instabilidade político-económica causada pela dependência de combustíveis fósseis, o esforço desenvolvido nos últimos anos pelos Governos para motivar a adopção de tecnologias de produção de energia eléctrica limpa tem aumentado consideravelmente. Nesta subsecção será dada uma visão global das principais metas relacionadas com energias renováveis, estabelecidas a médio e longo prazo pela União Europeia, assim como as metas definidas pelo Governo Português em resposta à Comissão Europeia.

1.2.1 LCOE da energia das ondas e marés

Os custos associados com as energias renováveis oceânicas, nomeadamente a energia das ondas e das marés, variam de projecto para projecto. Como as tecnologias utilizadas nesta área ainda não estão bem estabelecidas, os investimentos iniciais e operacionais são ainda muito elevados. De forma lógica segue que para estas tecnologias se tornarem competitivas com as já bem estabelecidas no mercado energético, é preciso que os custos sejam reduzidos significativamente.

Neste contexto, um importante indicador que permite avaliar o nível de competitividade de diferentes tecnologias é o LCOE (Levelized Cost of Energy). O LCOE da electricidade é definido como a soma dos custos capitais (CAPEX) e operacionais do dispositivo (OPEX), divididos pela geração eléctrica anual (AEP) que depende do factor de capacidade da central. A tab. 1.3 mostra valores de referência para o CAPEX e OPEX das tecnologias de energia das ondas e marés, reunidos em COGEA e WAVEC (2018). É possível observar que o estado de desenvolvimento das tecnologias das ondas está ainda atrasado em relação às tecnologias de energia das marés. Para que a energia das ondas seja competitiva, é necessário que a capacidade instalada seja muito alta, entre 20 e 250 MW. Como se verá ao longo deste trabalho, um protótipo do presente dispositivo deverá ter uma capacidade instalada da ordem de 1 MW. Com estas características o dispositivo incorrerá

num CAPEX de cerca de 18 M€ e um OPEX de 4 M€/ano. Tendo em conta estes valores, de acordo com o relatório IRENA (2021) estima-se que o LCOE das tecnologias de energia das marés esteja entre 0,11 – 0,48 €/kWh e entre 0,16 – 0,75 €/kWh para as tecnologias de energia das ondas. O relatório do Joint Research Centre, Tapoglou et al. (2022), adianta ainda que até 2030 a energia das marés deverá atingir um LCOE de 0,1 €/kWh e de 0,15 €/kWh para a energia das ondas.

Tabela 1.3: CAPEX e OPEX da energia das ondas e das marés, em função da capacidade instalada.

Fonte: COGEA e WAVEC (2018).

Capacidade instalada MW	Energia das ondas		Energia das marés	
	CAPEX	OPEX	CAPEX	OPEX
	M€/MW	M€/MW/ano	M€/MW	M€/MW/ano
0 – 0,001	360	68	223	48
0,001 – 0,009	173	50	177	26
0,009 – 0,02	124	22	56	12
0,02 – 0,1	70	12	37	2,5
0,1 – 0,3	44	9	27	2
0,3 – 0,9	30	6	20	1,6
0,9 – 3	19	4	15	1,4
3 – 7	14	3	10	1,2
7 – 20	9	2	7	1
20 – 250	4	1	5	0,8

De acordo com o Ocean Energy Council [A.1.4], actualmente o melhor gerador de energia eléctrica obtida a partir da energia das ondas produz energia a um preço final de cerca de 90 €/MWh. Outra estimativa do custo nivelado da energia das ondas, mais realista e a curto prazo, foi apresentada pela empresa Sea Power Ltd. [A.1.5] com base no modelo à escala 1:25 da SeaPower Platform (um dispositivo instalado na zona de testes AMETS do Atlântico Norte). Neste caso é apresentado um custo de 170 €/MWh. Em comparação, a energia gerada a partir de uma central termoeléctrica a carvão de grandes dimensões tem um custo que ronda os 50 €/MWh. Cumulativamente, a contribuição total da produção de energia eléctrica em regime especial (PRE) em Portugal Continental, atingiu os 45% da produção total de electricidade em 2019 [A.1.6]. É assim demonstrado que a penetração das energias renováveis no sistema electroprodutor de Portugal continental está em alta, o que é um bom sinal para o desenvolvimento de novas tecnologias de energia das ondas.

1.2.2 Metas estabelecidas para a Europa

As metas actualmente impostas pela União Europeia têm como objectivo acelerar a adopção de tecnologias de aproveitamento de energias renováveis, por forma a reduzir as emissões de gases de efeito de estufa em 55% até ao ano de 2030. A longo prazo, o objectivo geral é tornar a Europa num continente com impacto neutro no clima até 2050.

Em 2009 a Renewable Energy Directive 2009/28/EC (Directive 2009/28/EC) impunha que, até 2020, 20% da energia eléctrica consumida na UE deveria ser proveniente de fontes renováveis. Esta directiva teve um efeito notório sobre o sistema electroprodutor, visto que em 2010 apenas 14% da energia consumida na UE provinha de fontes renováveis e que, em 2020, este valor tinha subido para 22%. A Renewable Energy Directive 2018/2001/EU – Directive (EU) 2018/2001 – actualizou este valor estabelecendo que, até 2030, pelo menos 32% do consumo final bruto de energia deverá ter origem em fontes renováveis. São também estabelecidos limites mínimos para a percentagem de energia consumida proveniente de fontes renováveis que cada estado membro tem de garantir, a partir de Janeiro de 2021. Para Portugal em particular este valor é de 31%. De acordo com esta directiva, a Comissão Europeia compromete-se ainda a facilitar a atribuição de financiamento a projectos que acelerem a descarbonização da produção de energia eléctrica. Adicionalmente é recomendado que os estados membros concedam especial apoio financeiro a soluções para aproveitar energias renováveis em regiões insulares. A concretização destes projectos nestas regiões tem naturalmente custos mais elevados, em virtude do seu isolamento geográfico e escassez de mão de obra especializada.

Em 2022, pressionada pelos conflitos na Ucrânia, a Comissão Europeia publicou o plano RePowerEU (European Commission, 2022). Foi proposto um conjunto de medidas para reduzir rapidamente a dependência da UE dos combustíveis fósseis Russos, ainda antes de 2030. Este plano para acelerar a transição para as energias limpas está assente em três pontos: poupança de energia, produção de energias limpas e diversificação do fornecimento de energia. É proposto um aumento para 45% na meta vinculativa da percentagem de energia renovável no consumo final de energia, que havia sido estabelecida pela Renewable Energy Directive de 2018. A acompanhar este plano, foi publicada a Recomendação da Comissão C/2022/3219 (Comissão Europeia, 2022), com o objectivo de acelerar ainda mais os procedimentos burocráticos de concessão de financiamento a projectos de energia renovável.

1.2.3 Metas estabelecidas para Portugal

A Comissão Europeia exige que os estados-membros elaborem e apresentem um Plano Nacional Integrado de Energia e Clima (PNEC), como principal instrumento de política energética e climática para a década de 2021 a 2030. O Plano Nacional de Energia e Clima 2021-2030 (República Portuguesa, 2019) estabelece as metas a atingir por Portugal, nesta década: i) reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em pelo menos 45%, relativamente ao ano de 2005; ii) aumentar a eficiência energética em 35%; iii) aumentar para 47% a incorporação de energias renováveis no consumo final de energia; iv) introduzir 20% de renováveis no sector dos transportes. Estas metas vêm no seguimento dos objectivos atingidos até 2020, uma vez que as renováveis já representavam 31% do consumo final bruto de energia em Portugal nesta data.

A Resolução do Conselho de Ministros nº 107/2019 de 1 de Julho aprovou o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (República Portuguesa et al., 2019). Este roteiro estabelece a estratégia de longo prazo para atingir a neutralidade carbónica da Economia Portuguesa até 2050, considerando diferentes cenários de desenvolvimento socioeconómico. Um dos principais vectores apresentados é a eliminação da produção de electricidade a partir do carvão até 2030, prosseguindo em seguida com a total descarbonização do sistema electroprodutor até 2050. Isto é de especial importância para o presente estudo pois, em conjunto com o PNEC 2030, justifica o crescente interesse na energia das ondas no âmbito da diversificação do sistema electroprodutor Português.

1.3 Objectivos gerais do trabalho

O principal objectivo do presente trabalho é desenvolver um sistema destinado à recuperação de energia das ondas para abastecimento eléctrico da Ilha do Corvo, nos Açores. No capítulo 2 é feita uma revisão sobre as várias tecnologias desenvolvidas para extracção de energia das ondas, bem assim como um levantamento dos dispositivos actualmente ligados à rede. Em seguida, no capítulo 3 a nossa atenção é centrada no dispositivo atenuador de tubo distensível com coluna de água oscilante, um sistema que vem sendo desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Turbomáquinas (*fluidslab*) da Universidade da Beira Interior desde 2012. O *know-how* já desenvolvido no Laboratório indica que este dispositivo apresenta um elevado desempenho na captura de

energia das ondas, assim como uma boa resistência a condições extremas. No decurso desta investigação foi ensaiado experimentalmente um modelo deste sistema à escala 1:20 no tanque hidrodinâmico do *fluidslab*. No capítulo 4 são descritos e reanalisados ensaios anteriores realizados à escala 1:50. No capítulo 5 são de seguida reportados os resultados obtidos com um modelo à escala 1:20 deste dispositivo. No capítulo 6 é feita uma comparação dos resultados desta experiência com resultados anteriores obtidos a outras escalas e também com resultados de referência, o que permite validar as actuais previsões. Estas comparações permitem ainda avaliar efeitos não lineares e efeitos de escala inerentes à modelação experimental. Foram em seguida estudadas diferentes configurações com vista a melhorar o desempenho do dispositivo e adaptá-lo para funcionar junto à costa, que são reportadas no capítulo 7. Estas configurações dizem respeito a diferentes modelos ensaiados no offshore, junto à costa ou incorporado num quebra-mar, por meio de um canal de focagem. Finalmente, no capítulo 8 é feita uma síntese dos principais resultados obtidos e são extraídas as principais conclusões do presente estudo, que podem servir de base a uma futura implantação deste dispositivo nos Açores.

Capítulo 2

Tecnologias de Extracção de Energia das Ondas

Em finais do século XX, um artigo publicado na Nature por Steven Salter em 1974 despertou o interesse da comunidade científica mundial para o aproveitamento da energia das ondas oceânicas. Desde esta data muitos foram os conceitos propostos para levar a efeito este aproveitamento, mas poucos terão atingido uma fase de desenvolvimento pré-comercial. Contudo, alguns destes dispositivos conseguiram atingir uma fase de demonstração à escala real, que foi concretizada em Zonas de Teste Piloto. No presente capítulo começa-se por efectuar uma breve revisão do Estado-da-Arte das tecnologias desenvolvidas para aproveitar a energia das ondas. Após uma breve revisão dos sistemas pioneiros que impulsionaram o desenvolvimento das diferentes tecnologias, são em seguida descritos os dispositivos actualmente em desenvolvimento e alguns dos dispositivos que já estão ligados à rede eléctrica. Finalmente é dedicada particular atenção aos sistemas de geometria variável, que incluem sistemas de interface de trabalho rígida ou distensível.

2.1 Sinopsis do estado-da-arte

Numa fase inicial os sistemas de extracção de energia das ondas dividiam-se em sistemas de corpo oscilante e sistemas de coluna de água oscilante (OWC). Mais tarde, outros sistemas surgiram, alguns deles combinando estes dois efeitos. Falcão (2010) faz

uma síntese de diferentes tecnologias de aproveitamento de energia das ondas, algumas das quais foram verdadeiramente pioneiras neste contexto. Adicionalmente, Renzi et al. (2021) descrevem as principais tecnologias e dispositivos desenvolvidos até à presente data, com capacidade inferior a 1 MW.

2.1.1 Sistemas pioneiros

Como refere Falcão (2010), a ideia de aproveitar energia das ondas surgiu em 1799 com a patente de Pierre De Girard e filhos “*Divers moyens d’employer les vagues de la mer comme moteurs*”. Mais recentemente, no final dos anos 40, Yoshio Masuda desenvolveu uma bóia de sinalização para a navegação marítima que funcionava segundo este mesmo princípio. Este dispositivo consistia num flutuador rígido, atravessado na vertical por um tubo oco aberto em ambas as extremidades, no interior do qual oscilava uma coluna de água. No topo do tubo estava instalada uma turbina de ar unidireccional cujo escoamento era rectificadado por válvulas auto-reguladas. Estas bóias foram comercializadas no Japão a partir de 1965 e mais tarde nos EUA (Masuda, 1971). Já numa fase posterior Masuda coordenou em 1976 o projecto Kaimei (fig. 2.1), que era um navio com diversas OWCs instaladas ao longo do seu comprimento (Masuda, 1979). Esta plataforma destinava-se à demonstração experimental da tecnologia de coluna de água oscilante.



Figura 2.1: Plataforma de testes Kaimei.

Fonte: Falcão e Henriques (2016).

Uma outra configuração de OWC foi estudada teoricamente por Lighthill (1979). Tratava-se neste caso de uma OWC de tubo em U, em que a extremidade aberta para o mar

está submersa. O princípio de funcionamento da OWC de Lighthill foi mais tarde utilizado na U-OWC patenteada por Boccotti (2003). A OWC multirressonante da Kvaerner Brugg, que é descrita em Ambli et al. (1982), é também um dispositivo pioneiro. Como mostra a fig. 2.2, este dispositivo é enquadrado por um porto natural que permite gerar ressonâncias adicionais e aumentar a amplitude das ondas incidentes (Malmo & Reitan, 1986). Esta central de 500 kW foi instalada em 1985 na Noruega e esteve em funcionamento até 1988, data em que foi destruída por uma tempestade. Em 1988, Masuda et al. propuseram ainda um outro tipo de OWC flutuante cuja boca estava afundada e apontava para trás, a chamada BBDB (*Backward-Bent Duct Buoy*). Este conceito inspirou toda uma classe de OWCs que continuam a ser desenvolvidas até aos dias de hoje.



Figura 2.2: Central de demonstração OWC Kvaerner Brug em Tofte.

Fonte: Delmonte et al. (2015).

Para além dos sistemas de coluna de água oscilante, existem também dispositivos flutuantes de corpo oscilante. Um exemplo é o dispositivo que foi inventado nos anos 70 por Sir Christopher Cockerell, que também inventou o *Hovercraft*. Este dispositivo atenuador consistia num sistema de jangadas rígidas flutuantes articuladas entre si (Platts, 1979). A extracção de energia era feita através de um sistema localizado na articulação entre cada duas jangadas. Os dispositivos de corpo oscilante podem também ser do tipo absorvedor pontual, cujo conceito remonta a Budar e Falnes (1975). Os dispositivos pontuais são caracterizados por terem uma dimensão pequena relativamente ao comprimento das ondas incidentes. Estes autores propuseram um conjunto de duas bóias, uma a flutuar à superfície e outra submersa (fig. 2.3); estas eram ligadas por um cabo desde a bóia à superfície até um volante no fundo do mar e de volta à bóia submersa. O movimento relativo de arfagem entre

as bóias fazia com que o cabo rodasse o volante, que estava ligado a um gerador eléctrico no fundo do mar. O funcionamento destes dispositivos é tipicamente omnidireccional, o que os torna perfeitamente adaptados para funcionar em águas profundas.

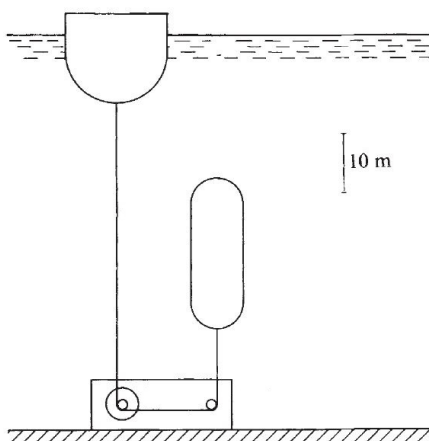


Figura 2.3: Dispositivo absorvedor pontual proposto por Budar e Falnes (1975).

Fonte: adaptado de Budar e Falnes (1975).

À semelhança dos dispositivos de corpo oscilante, os dispositivos de massa rotativa servem-se do movimento relativo entre corpos rígidos. No entanto, desta vez os movimentos do dispositivo em arfagem e abatimento sob a acção das ondas incidentes excitam uma massa excêntrica em torno de um eixo. Este movimento de rotação pode ser utilizado para accionar directamente um gerador eléctrico ou para fazer mover uma bomba hidráulica. Um dispositivo pioneiro desta classe é o *Pato de Salter* (Salter, 1986). Este dispositivo consiste num flutuador alongado, com perfil assimétrico, que oscila em torno de um eixo paralelo às ondas incidentes (fig. 2.4, esquerda). O sistema de extracção de energia é accionado pelo movimento relativo entre o flutuador e o eixo. Estes flutuadores podem ser instalados numa fileira perpendicular à direcção de propagação dominante das ondas incidentes, formando aquilo a que se chama um dispositivo terminador (fig. 2.4, direita). Ao longo do tempo foram extraídos importantes ensinamentos sobre o funcionamento dos Patos de Salter, que podem também ser aplicados ao desenvolvimento de outros dispositivos (Salter, 2016).

Uma outra classe de dispositivos, que se servem maioritariamente da energia cinética das ondas, são os dispositivos de Galgamento – também conhecidos por dispositivos de *overtopping*. Estes dispositivos, inicialmente instalados na linha de costa, consistiam num canal de focagem com paredes convergentes e fundo inclinado destinado a encaminhar as ondas do mar e assim encher um reservatório elevado. A água do reservatório é posteriormente descarregada para o mar através de uma turbina hidráulica. O TAPCHAN – *Tapered Channel Wave Power Plant* – foi o primeiro dispositivo deste género (Mehlum,

1986; Mehlum & Stannes, 1979). Esta central de demonstração foi desenvolvida pela empresa NORWAVE A.S., em conjunto com o *Central Institute for Industrial Research* de Oslo, e instalada na costa Oeste Norueguesa. Uma das grandes vantagens deste dispositivo é que apenas o canal convergente está exposto às ondas, garantindo assim a sua sobrevivência a condições tempestuosas. Adicionalmente, as tecnologias de extracção de energia utilizadas são as mesmas dos aproveitamentos hidroeléctricos, que já estão bem estabelecidas. Em contrapartida, os dispositivos de galgamento instalados na linha de costa são apenas viáveis em locais onde o gradiente batimétrico é elevado e as ondas chegam à costa sem perder grande parte da sua energia. Para zonas continentais com gradientes batimétricos pequenos, os dispositivos flutuantes de galgamento são mais apropriados. Estes dispositivos flutuantes evitam ainda as complicações introduzidas pela amplitude das marés.

Nos anos 80 foram ainda propostos alguns dispositivos que faziam uso de uma interface de trabalho distensível. O primeiro foi o Lancaster Flexible Bag – LFB – patenteado por Michael J. French (French, 1979a). O seu desenvolvimento posterior foi levado a cabo pela empresa Wavepower Limited (Cockerell et al., 1981). Este dispositivo consistia numa estrutura rígida flutuante de 257 m de comprimento, ao longo da qual eram instalados sacos flexíveis cheios com ar, cujo volume variava sob a acção das ondas incidentes. Estas células pneumáticas eram ligadas a um circuito de alta pressão e a um circuito de retorno de baixa pressão (fig. 2.5). A acção das ondas sobre as células pneumáticas bombeava ar para o circuito de alta pressão, que em seguida atravessava uma turbina e retornava para as células pneumáticas pelo circuito de baixa pressão. As grandes dimensões do LFB proposto e consequentes custos estruturais elevados, levaram a que este dispositivo não passasse infelizmente da fase conceptual.

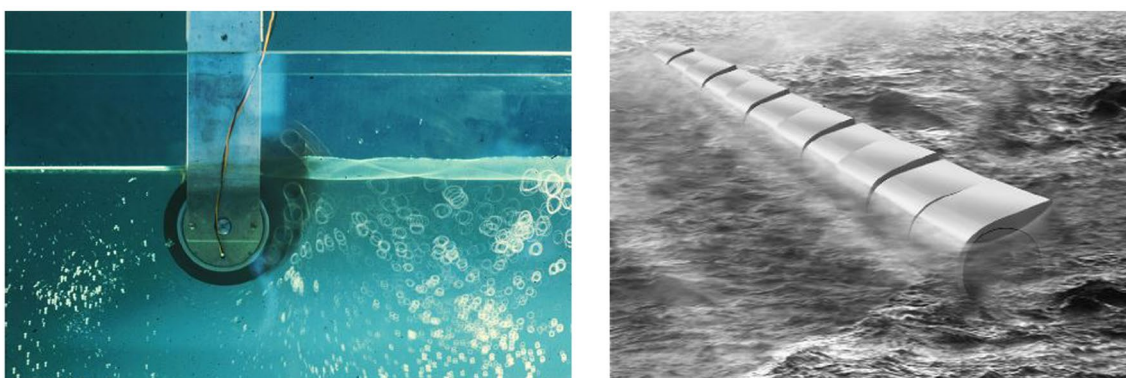


Figura 2.4: Visualização das oscilações do Pato de Salter em tanque de ondas (esquerda) e representação de uma fileira de dispositivos no mar (direita).

Fonte: Salter (2016); Falnes (2007).

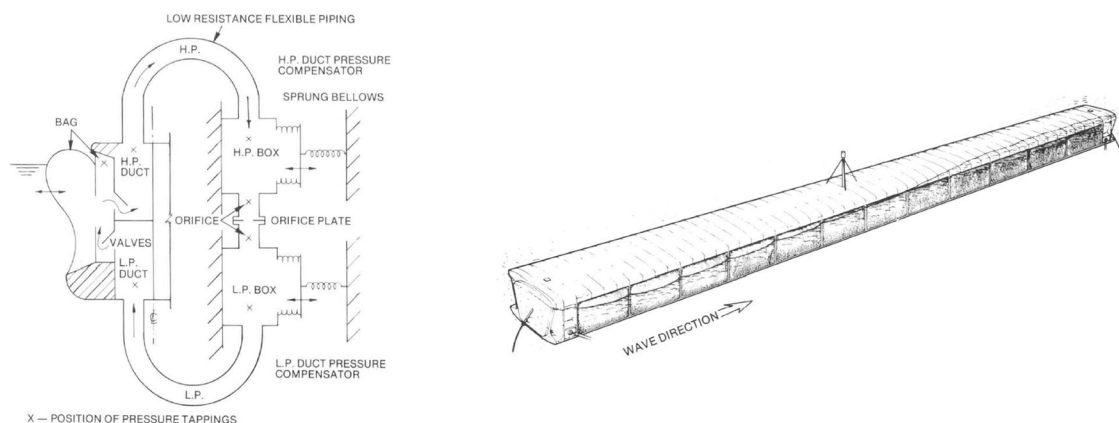


Figura 2.5: Secção transversal de uma célula pneumática do LFB (esquerda), representação do dispositivo completo (direita).

Fonte: Cockerell et al. (1981).

Em simultâneo, N. Bellamy desenvolveu um dispositivo semelhante – o Sea Clam (Bellamy, 1982). Este dispositivo, inicialmente proposto em 1979, era constituído por uma série de células pneumáticas distensíveis ligadas a um reservatório pneumático rígido, através de uma turbina de ar. A configuração inicial do dispositivo mostrada na fig. 2.6 (esquerda) era do tipo terminador, alinhado paralelamente às cristas das ondas. Para aumentar a estabilidade do dispositivo sob a acção das ondas, a geometria do dispositivo foi alterada para um círculo com as células pneumáticas viradas para o seu exterior (fig. 2.6, direita). Nesta configuração o comportamento do sistema passou a ter semelhanças ao de um dispositivo atenuador. Foram testados vários modelos das duas configurações no Lago Ness (Reino Unido). Mais recentemente, em 2008, a incorporação de uma OWC no dispositivo fez com que se eliminasse a necessidade de uma membrana distensível. Uma revisão completa do desenvolvimento do SEA-Clam até 2016 é dada em Bellamy et al. (2016) e Bucchi e Hearn (2016). Ainda na década de 80, Francis Farley propôs em 1982 um dispositivo inovador que consistia numa jangada comprida flexível, que se ajustava ao perfil da superfície livre da água do mar (Farley, 1982). O núcleo da jangada era composto por uma viga metálica suficientemente flexível para flectir e, em simultâneo, garantir a integridade estrutural do dispositivo. A frequência de ressonância das oscilações da viga era determinada através de cabos sob tensão, que ligavam ambas as suas extremidades. O sistema de extracção de potência consistia numa série de reservatórios distensíveis montados ao longo da viga que, sob a acção das ondas incidentes, bombeavam fluido através de um PTO hidráulico. O desenvolvimento de dispositivos de interface distensível tem vindo a acelerar nas últimas duas décadas à medida que a tecnologia de materiais elásticos continua a evoluir, dando origem a configurações drasticamente diferentes.



Figura 2.6: Dispositivo SEA-Clam linear (esquerda) e dispositivo SEA-Clam circular (direita).

Fonte: Ref. [A.2.1]; Bellamy et al. (2016).

2.1.2 Dispositivos desenvolvidos até finais do Séc. XX

Nos anos 90 notou-se um abrandamento do desenvolvimento de novas tecnologias de aproveitamento de energia das ondas, por falta de investimento neste sector em virtude da baixa de preços do petróleo. Contudo, neste período alguns dispositivos chegaram a ser testados à escala de protótipo. Falcão (2010) faz um levantamento aprofundado dos principais dispositivos desenvolvidos até 2010. Apesar de não terem surgido novas tecnologias, os protótipos que foram lançados permitiram a demonstração das tecnologias já existentes.

Os protótipos de dispositivos OWC, em particular, vêm sendo construídos desde os anos 80. Quatro anos depois da instalação da OWC da Kvaerner, foi construída em 1989 uma central OWC de 60 kW no quebra-mar do porto de Sakata no Japão (Ohneda et al., 1991). Quase em simultâneo, foi também construída uma OWC com 125 kW perto da costa de Thiruvananthapuram, na Índia, onde a profundidade do mar era 14 m (Ravindran & Koola, 1991). Ainda em 1991 a Queens University Belfast desenvolveu uma central de demonstração do tipo OWC. Esta central de 75 kW foi instalada na ilha de Islay na Escócia em 1991 e esteve em operação até ao seu desmantelamento em 1999. É ainda de referir um outro dispositivo – o OSPREY –, que foi o maior protótipo de coluna de água oscilante construído no século XX [A.2.2]. Esta central de 1 MW foi construída em 1995, mas foi gravemente danificada durante a sua instalação ao largo de Dounreay na Escócia e portanto nunca chegou a funcionar. Ainda neste século, em 1998, foi instalada a OWC flutuante Mighty-Wale com 110 kW perto da baía de Gokasho, no Japão (Ogata et al., 2002). Já em Portugal foi instalada em 1999 a Pico OWC, com 400 kW, na linha de costa em Porto Cachorro nos Açores – Falcão (2000) e Falcão et al. (2020). A construção desta central representou o culminar da I&D no ramo da energia das ondas em Portugal, que teve início

com Agnelo David nos anos 70. Este comerciante local apresentou ao IST um pequeno modelo de OWC com uma turbina de rodas contra rotativas, que motivou o início das actividades nesta área. A Pico OWC forneceu energia para a rede eléctrica local da EDA até 2016. Quase em simultâneo, o desmantelamento da central de Islay já referida deu origem ao desenvolvimento e construção da central LIMPET, de 500kW, instalada no mesmo local (The Queen's University of Belfast, 2002).

Para além dos dispositivos OWC, também foram desenvolvidos alguns dispositivos do tipo absorvedor pontual. Um dispositivo interessante desenvolvido pela empresa Interproject Service é a bóia IPS (Cleason et al., 1982). Este dispositivo era constituído por uma bóia a flutuar à superfície, ligada à haste de um actuador hidráulico localizado no interior de um tubo vertical, submerso por baixo da bóia. A oscilação da bóia activava o actuador, cujo fluido pressurizado excitava o sistema de extracção de potência. Este conceito foi testado nos anos 80 à escala 1:2, no mar da Suécia. Mais tarde, nos anos 90, um sistema de corpo oscilante semelhante foi testado na Dinamarca. Neste caso uma bóia à superfície era conectada a uma bomba hidráulica no fundo do mar por via de um cabo. O movimento relativo entre os dois corpos activava a bomba, que transferia fluido pressurizado para a costa onde estava localizada uma turbina hidráulica (Nielsen & Smed, 1998).

Outro dispositivo de corpo oscilante, mas desta vez do tipo atenuador, é o McCabe Wave Pump (McCormick et al., 1998). Este dispositivo era constituído por dois pontões flutuantes, articulados a uma plataforma central. A extracção de potência era feita por actuadores hidráulicos localizados nas articulações. Um protótipo deste dispositivo com 40 m de comprimento foi testado em 1996, ao largo da costa de Kilbaha na Irlanda.

2.1.3 Protótipos de demonstração mais recentes

No século XXI o desenvolvimento de tecnologias de energia das ondas recebeu um novo impulso, graças ao reforço de financiamentos dados pelos diferentes países à I&D destes sistemas. Os dispositivos a seguir descritos encaixam-se nos sistemas de coluna de água oscilante (OWC), de corpo oscilante, de galgamento e sistemas distensíveis. Em cada uma destas categorias existem dispositivos pontuais, atenuadores e terminadores.

Relativamente aos dispositivos OWC, a construção das centrais OWC do Pico em 1999 (fig. 2.7, direita) e LIMPET em 2000 (fig. 2.7, esquerda) resultaram já destas novas actividades.



Figura 2.7: Central OWC LIMPET da Ilha de Islay, na Escócia (esquerda); Central OWC da Ilha do Pico, nos Açores (direita).

Fonte: The Queen's University of Belfast (2002); Falcão et al. (2020).

Seguindo a instalação do Pico, a grande maioria da I&D desenvolvida em Portugal tem sido conduzida pela associação sem fins lucrativos WAVEC Offshore Renewables, que foi fundada em 2003. Em 2007 foi instalado perto de Galway, na Irlanda, um modelo da BBDB flutuante OE Buoy à escala 1:4 (fig. 2.8, esquerda) – [A.2.3]. Actualmente, este dispositivo de demonstração está a recolher dados para o projecto Europeu CORES (*Components for Ocean Renewable Energy Systems*), em conjunto com a empresa Portuguesa Kymaner [A.2.4]. Esta empresa construiu uma turbina axial de impulso que foi desenvolvida no IST e posteriormente testada na zona de testes de Galway. Foi também construída em 2010, em Port Kembla na Austrália, uma outra OWC flutuante pela empresa Oceanlinx: a GreenWave (Manasseh et al., 2017). Este dispositivo, que é mostrado na fig. 2.8 (direita), acomodava várias turbinas com uma capacidade total de 2,5 MW. O dispositivo funcionou durante apenas dois meses, após o que sofreu danos graves devido à ruptura das suas amarrações durante uma tempestade. Em 2014 a empresa recebeu financiamento adicional para desenvolver um novo protótipo de 1 MW, desta vez construído em cimento e assente no fundo do mar. Este dispositivo sofreu danos irreparáveis quando estava a ser rebocado para o seu local de implantação em Port Adelaide. Este segundo falhanço levou à liquidação da empresa Oceanlinx, que actualmente foi adquirida por uma empresa sediada em Hong-Kong. Em 2015 foi concluída a instalação da central piloto Yongsoo OWC, com 500 kW, a 1,2 km da costa da ilha de Jeju na Coreia do Sul (Ocean Energy Systems, 2021). Mais recentemente, em 2021, a empresa Wave Swell Energy lançou o dispositivo UniWave200, com 200 kW, na Ilha King, na Tasmânia. Esta OWC assente no fundo abastecerá em breve a rede eléctrica local.

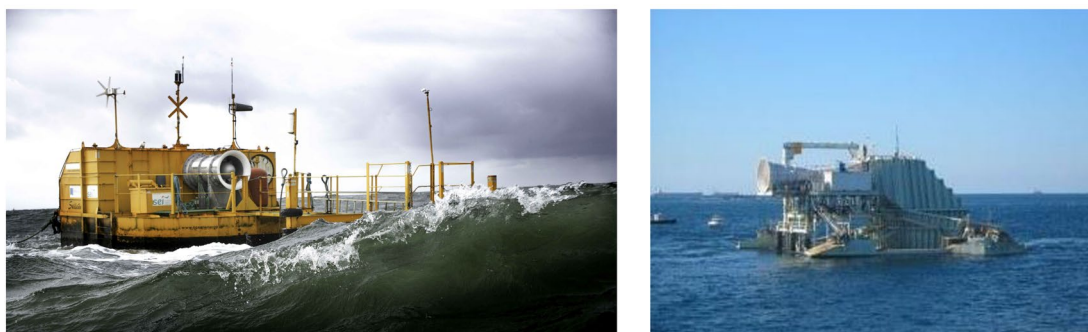


Figura 2.8: Dispositivo OE Buoy (esquerda) e dispositivo Oceanlinx (direita).

Fonte: Ref. [A.2.3]; Ref. [A.2.5].

Um dos primeiros protótipos de corpo oscilante a ser testado no século XXI foi o dispositivo *Pelamis*, que utiliza um princípio de funcionamento semelhante ao do sistema proposto por Cockerel. O dispositivo era composto por três corpos cilíndricos flutuantes, articulados entre si por meio de um eixo inclinado em relação à vertical (fig. 2.9, esquerda). O PTO hidráulico do sistema estava localizado nas articulações dos elementos flutuantes. A empresa Pelamis Wave Power desenvolveu em 2004 um primeiro protótipo do dispositivo, que foi testado no EMEC [A.2.6]. Em 2008 foram lançados dois destes dispositivos no Parque de ondas da Aguçadoura em Portugal, com uma potência total de 1,5 MW. Apesar de ter demonstrado a viabilidade do conceito, este sistema demonstrou também os problemas que acompanham a utilização de articulações entre as jangadas flutuantes. Este dispositivo retomou posteriormente os seus ensaios em Orkney, na Escócia. Foram ainda construídos outros protótipos utilizando o mesmo princípio de funcionamento do *Pelamis*. O dispositivo Crestwing é um deles (fig. 2.9, direita), tendo sido retirado do mar em 2020 após uma campanha de demonstração que durou 14 meses, realizada ao largo das ilhas Hirsholm na Dinamarca. Um ano mais tarde, o protótipo à escala real do Wavepiston foi instalado na zona de testes PLOCAN, nas ilhas Canárias. Este sistema com 200 m de comprimento está neste momento a demonstrar a viabilidade do conceito.

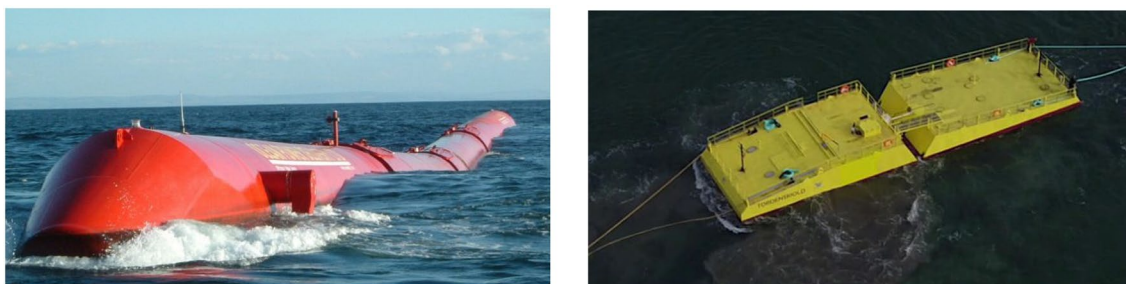


Figura 2.9: Dispositivo *Pelamis* (esquerda) e dispositivo CrestWing (direita).

Fonte: Ref. [A.2.7]; Ref. [A.2.8].

Um dispositivo de corpo oscilante que também atingiu uma fase de demonstração foi o terminador Zhoushan com 1 MW (fig. 2.10). A sua construção teve início em 2017, levada a cabo pelo *Guangzhou Institute of Energy Conversion*, da Academia das Ciências Chinesa (Ocean Energy Systems, 2021). Este sistema, do tipo terminador, tem um princípio de funcionamento semelhante ao McCabe Wave Pump referido anteriormente; serve-se do movimento relativo entre flutuadores e uma estrutura central fixa para gerar energia hidráulica, que é posteriormente convertida em electricidade. Esta central entrou em plena operação em 2021.

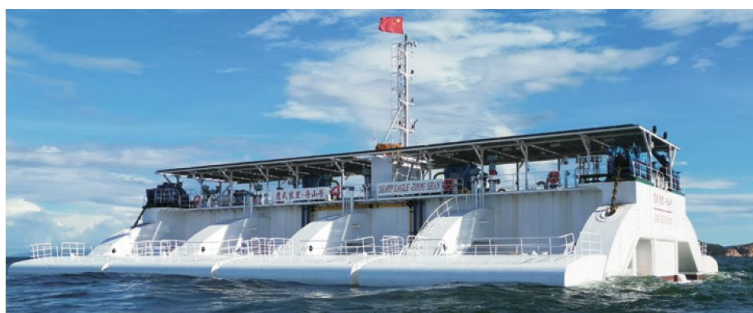


Figura 2.10: Dispositivo Shoushan.
Fonte: Ocean Energy Systems (2021).

Vários projectos de demonstração foram também conduzidos com dispositivos de corpo oscilante do tipo absorvedor pontual. Em 1999 teve início o desenvolvimento do dispositivo Wavebob (fig. 2.11, esquerda). De forma semelhante à bóia IPS, o Wavebob serve-se do movimento relativo entre dois corpos flutuantes para activar uma bomba hidráulica e gerar energia útil. Em 2006 este dispositivo foi o primeiro a ser instalado na zona de testes de Galway Bay, na Irlanda. Apesar desta campanha de testes à escala 1:4 ter demonstrado a viabilidade deste dispositivo, a empresa Wavebob Lta. foi dissolvida em 2015 devido a dificuldades de financiamento e o desenvolvimento do Wavebob terminou. O SEAREV é outro absorvedor pontual, cujo desenvolvimento teve início ao virar do século (Cordonnier et al., 2015). O dispositivo consistia de uma bóia flutuante, em cujo interior estava uma massa descentrada a oscilar sob a acção das ondas incidentes. Esta oscilação activava um PTO hidráulico. As primeiras actividades do seu desenvolvimento tiveram início em 2002 e culminaram com uma campanha de testes à escala 1:12 em 2006, na École Centrale de Nantes (fig. 2.11, centro). Em 2012, foi instalado um protótipo do dispositivo Fred Olsen BOLT Lifesaver na Baía de Falmouth, no Reino Unido (Garrett et al., 2017). Este sistema é constituído por uma bóia flutuante que contém um grupo de geradores eléctricos convencionais. A oscilação da bóia activa os geradores por meio de cabos que estão fixos no fundo do mar. Um outro dispositivo parecido, mas utilizando um princípio de funcionamento diferente é o AWS (*Arquimedes Wave Swing*) mostrado na fig. 2.11

(direita). Este dispositivo submerso é constituído por dois corpos ligados por um actuador hidráulico. Um dos corpos é ancorado ao fundo do mar e a acção das ondas à superfície fazem com que o outro corpo oscile verticalmente por acção da impulsão (de Sousa Prado et al., 2006). Este movimento relativo acciona o actuador. Um protótipo de demonstração de 16 kW foi instalado no EMEC em 2022 e está actualmente nas fases iniciais de teste.

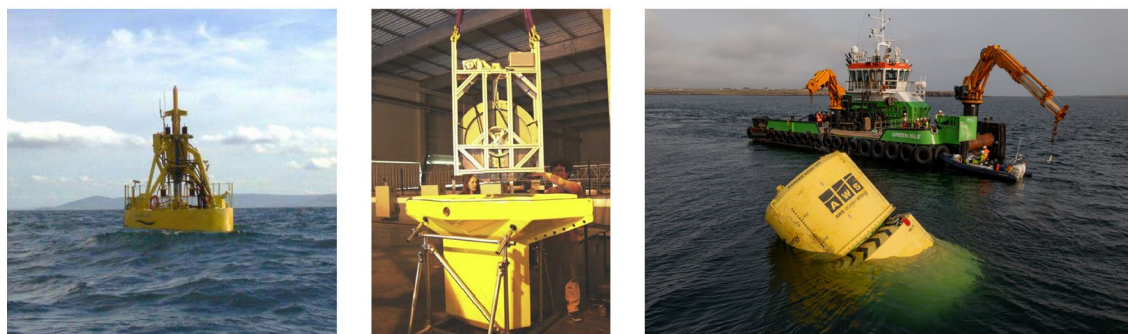


Figura 2.11: Dispositivo Wavebob à escala 1:40 na baía de Galway (esquerda), dispositivo SEAREV à escala 1:12 (centro) e dispositivo AWS Arquimedes Wave Swing prestes a ser afundado no EMEC (direita).

Fonte: Weber et al. (2009); Cordonnier et al. (2015); Ref. [A.2.9].

Um outro tipo de dispositivo de corpo oscilante é o OWSC (*Oscillating Wave Surge Converter*), cujo conceito foi introduzido por Folley et al. (2004). Este sistema, do tipo terminador, é constituído por uma placa flutuante vertical articulada junto ao fundo do mar e paralela à crista das ondas incidentes. A placa oscila por acção das ondas incidentes e pode estar submersa ou emergir à superfície do mar. Este conceito evoluiu ao longo dos anos e actualmente existem dois dispositivos dominantes nesta classe: o WaveRoller da AW Energy [A.2.10] e o Oyster da Aquamarine Power [A.2.11]. O princípio de funcionamento dos dois dispositivos é o mesmo, mas no Oyster a placa atravessa a superfície do mar, enquanto o WaveRoller está completamente submerso. Adicionalmente, a oscilação do WaveRoller é convertida em electricidade no próprio dispositivo e transportada para a rede por cabo submarino. O sistema de extracção de potência do WaveRoller foi estudado e aperfeiçoado no IST, em Lisboa. No Oyster, o movimento da placa é usado para bombear água até uma turbina hidroeléctrica em terra. Um protótipo de segunda geração do Oyster com 800 kW (fig. 2.12) foi ligado à rede eléctrica em 2012, no local de testes Billia Croo do EMEC, tendo estado em funcionamento até 2015. O protótipo do WaveRoller com 350 kW está actualmente em funcionamento ligado à rede, em Peniche.

Durante este século foram também feitos alguns avanços nos sistemas de galgamento. Um dispositivo inovador desta classe foi o WaveDragon [A.2.12]. Este sistema consistia numa plataforma flutuante com dois braços parabólicos que se estendiam para a frente do dispositivo (fig. 2.13). À semelhança do TAPCHAN, estes braços encaminhavam

as ondas incidentes para um reservatório elevado que, posteriormente, descarregava a água para o mar através de uma turbina. O protótipo deste dispositivo foi testado em 2003 na Dinamarca, tendo fornecido energia para a rede durante 20 000 horas (Tedd et al., 2006).

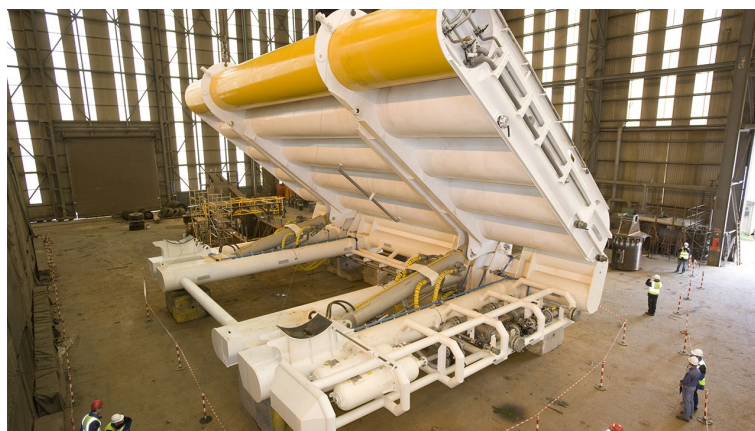


Figura 2.12: Dispositivo Oyster em doca seca durante operações de manutenção.

Fonte: Ref. [A.2.13].



Figura 2.13: Dispositivo WaveDragon em Nissum Bredning, Dinamarca.

Fonte: Tedd et al. (2006).

2.1.4 Sistemas actualmente ligados à rede

De acordo com os planos de acção definidos pelos estados membros da UE em 2009, previa-se que até 2020 a potência instalada combinada da energia das ondas e marés seria de 2250 MW (Magagna, 2020). Esta meta não foi atingida, sendo que até 2018 apenas 12 MW de energia das marés e 5 MW de energia das ondas haviam sido instalados. Adicionalmente, uma parte desta capacidade instalada pertence a dispositivos de demonstração, que regra geral são removidos no término dos respectivos projectos.

Actualmente encontram-se na Europa cerca de 10 projectos activamente ligados à rede eléctrica, que são em seguida descritos.

A central OWC de Mutriku mostrada na fig. 2.14 (esquerda), que entrou em operação em 2011, está instalada num quebra-mar na Baía de Biscay, em Espanha (Torre-Enciso et al., 2009). Este sistema tem uma capacidade instalada de 300 kW e conta com 16 câmaras pneumáticas, equipadas com turbinas de ar da Voith. Cada grupo turbogerador tem uma capacidade de 18,5 kW. Esta central está operacional desde 2011 e foi a primeira a fornecer mais do que 1 GWh à rede eléctrica Espanhola. No entanto, esta central em particular apresenta um rendimento muito baixo (Magagna, 2020). Mais tarde, em 2016, o dispositivo Marmok-A5 da IDOM foi instalado e ligado à rede eléctrica perto da central de Mutriku, no BIMEP (Biscay Marine Energy Platform). Este absorvedor é do tipo pontual – SPAR Buoy – (Portillo et al., 2023) e conta com duas turbinas de ar de 15 kW [A.2.14]. Em 2018 este dispositivo foi retirado e uma segunda versão melhorada foi instalada no seu lugar (fig. 2.14, direita). O desenvolvimento contínuo do PTO deste dispositivo foi desta vez subcontratado à empresa Portuguesa Kymaner e ao Instituto Superior Técnico, no âmbito do projecto OPERA H2020 [A.2.15]. Gato et al. (2022) relatam os resultados de experiências em mar na central de Mutriku e no dispositivo Marmok-5, com uma turbina Wells bi-radial auto rectificadora desenvolvida no âmbito deste projecto.

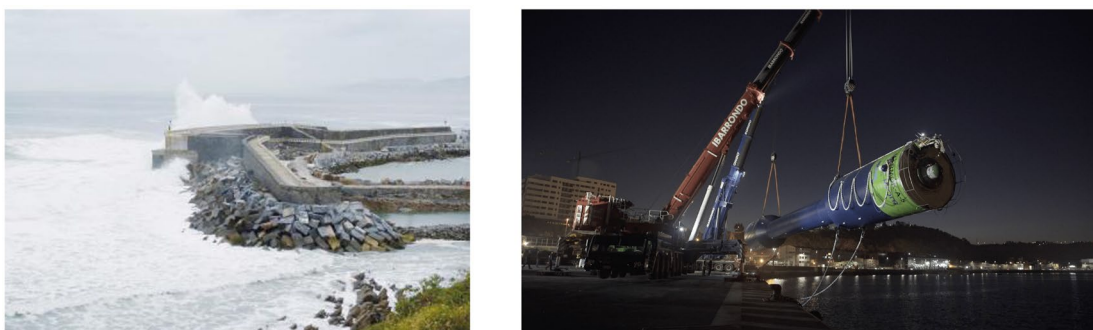


Figura 2.14: Central OWC de Mutriku durante uma tempestade (esquerda) e dispositivo Marmok-A5 durante o transporte para o local de lançamento em Espanha (direita).

Fonte: Ref. [A.2.16]; Ref. [A.2.17].

Na Suécia, o parque de energia das ondas de Sotenäs conta desde 2015 com 36 dispositivos Seabased, totalizando 3 MW de potência instalada. O dispositivo Seabased é um sistema absorvedor pontual que começou a ser desenvolvido na Universidade de Uppsala (Leijon et al., 2008). Este dispositivo tem apenas um grau de Liberdade, consistindo numa bóia ancorada a um gerador eléctrico linear assente no fundo do mar (fig. 2.15). A oscilação da bóia na superfície do mar excita directamente o gerador, cuja energia é enviada para terra através de cabos submarinos. O parque de Sotenäs forneceu

electricidade para a rede desde a instalação dos dispositivos, mas foi sendo gradualmente encerrado até 2018 à medida que o financiamento acabou. Actualmente os dispositivos continuam ali instalados e estão em curso conversações para saber qual o futuro destes dispositivos [A.2.18]. Mais tarde, em 2018, a empresa Seabased assinou um contrato com o governo do Gana destinado a ampliar o parque de energia das ondas em Ada Foah, para 100 MW de capacidade. Este contrato vem no seguimento do sucesso inicial de um projecto de demonstração no mesmo local, cujo fornecimento de energia à rede teve início em 2015 [A.2.19]. Uma estratégia de controlo de fase de geradores eléctricos lineares, como os que são utilizados no Seabased, pode ser encontrada em Mendes et al. (2018).



Figura 2.15: Gerador linear do dispositivo SEABASED durante a sua instalação no parque de energia das ondas de Sotenäs (esquerda) e respectivas bóias na superfície do mar (direita).

Fonte: Ref. [A.2.18].

O dispositivo WaveClapper foi lançado em 2016 pela empresa Eco Wave Power em Gibraltar, sob contrato com a GEA – *Gibraltar Electricity Authority* (fig. 2.16a). Este dispositivo conta actualmente com 500 kW de capacidade instalada, e está em processo de aumentar esta capacidade para 1 MW [A.2.20]. Quando completa, prevê-se que a central tenha uma capacidade instalada de 5 MW. De acordo com a Eco Wave Power, esta é a única central no mundo a vender actualmente electricidade para a rede sob contrato PPA (*Power Purchase Agreement*). Ainda em 2016 o protótipo do dispositivo WavEel construído pela empresa Waves4Power foi instalado no Runde Environmental Center na Noruega [A.2.21]. A ligação do dispositivo de 100 kW à rede local foi concluída em 2017. Apesar da operação deste dispositivo ter sofrido alguns percalços relacionados com a danificação do sistema de amarras, actualmente este fornece energia à rede. A fig. 2.16b mostra o dispositivo em funcionamento. Um ano depois, um protótipo de 50 kW do dispositivo H24 (fig. 2.16c), da empresa 40South Energy Italia, foi ligado à rede Italiana [A.2.22]. Este dispositivo continua actualmente a fornecer electricidade para a rede. Também em Itália, em 2019 o dispositivo absorvedor pontual OPT PowerBuoy 3, com 3 kW, foi lançado em Ravenna Itália como parte

do projecto MarEnergy. Até à data já forneceu mais de 2 *MWh* para a rede [A.2.23]. Mais recentemente, em 2021, teve início o projecto de demonstração do dispositivo Penguin da Wello, no BIMEP [A.2.24]. Este dispositivo de massa rotativa (fig. 2.16d), com 56 m de diâmetro, tem uma capacidade de 1 *MW* e actualmente já fornece energia eléctrica para a rede Espanhola.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.16: a) Dispositivos WaveClapper instalados no pontão World War II Ammunition Jetty, em Gibraltar; b) dispositivo WavEel em operação em Runde, na Noruega; c) dispositivo H24 a ser preparado para instalação em Marina di Pisa, Itália; d) dispositivo Wello Penguin no BIMEP.

Fonte: Ref. [A.2.25]; Ref. [A.2.21]; Ref. [A.2.22]; Ref. [A.2.26].

Concretamente em Portugal, o protótipo comercial do dispositivo WaveRoller da AW Energy foi instalado em Peniche em 2019 e já produz actualmente electricidade para a rede (fig. 2.17, esquerda). Este dispositivo de 350 *kW* foi financiado pelo projecto SWELL, no âmbito do programa NER 300, que propõe a eventual construção de um parque com 5,6 *MW* de capacidade [A.2.27]. No Parque de Ondas da Aguçadoura está por sua vez em curso o estágio 5 do projecto HiWave, liderado pela empresa CorPower Ocean em cooperação com a EDP, com a empresa Simply Blue Group e com a ENEL Green Power [A.2.28]. Este projecto, que foi iniciado em 2020, pretende elevar o TRL do dispositivo absorvedor pontual C5 de TRL 7 para TRL 8, no período de 2022 a 2025. Para isso serão testados um conjunto de quatro dispositivos com uma capacidade total de 1,2 *MW*,

incluindo a sua ligação e fornecimento de energia para a rede. A fig. 2.17 (direita) mostra o dispositivo CorPower antes da sua instalação na Aguçadoura.



Figura 2.17: Dispositivo Waveroller durante a instalação em Peniche, Portugal (esquerda) e dispositivo CorPower antes da sua instalação na Aguçadoura (direita).

Fonte: Ref. [A.2.27]; Ref. [A.2.29].

Em suma, apesar do desenvolvimento comercial da energia das ondas ser notavelmente lento comparativamente a outra tecnologias de energia renovável, desde o virar do século tem-se assistido a um aumento gradual do número de dispositivos lançados ao mar ou ligados à rede. Este é um sinal encorajador, que indica que o nível de confiança nestas tecnologias também está a aumentar.

2.2 Novos sistemas com geometria variável

A utilização de sistemas de aproveitamento de energia das ondas com geometria variável remonta aos anos 80. Por definição, estes dispositivos servem-se de materiais distensíveis ou de estruturas deformáveis para gerar diferenciais de pressão e deste modo activarem um sistema PTO. No que diz respeito à sua sintonização às ondas incidentes, estes dispositivos distensíveis são efectivamente mais versáteis do que dispositivos rígidos articulados ou mesmo do que as OWCs simples. Desde os inventos de French, Bellamy e Farley nos anos 80, foram propostos vários dispositivos deste tipo com diferentes configurações que abrangem atenuadores, absorvedores pontuais e dispositivos terminadores. Nesta subsecção são apenas descritos em pormenor os mais importantes.

2.2.1 Sistemas com interface de trabalho rígida

Francis Farley patenteou em 2012 um dispositivo flutuante deste tipo, que utilizava uma interface rígida articulada para expandir e comprimir um volume de ar no interior de

um reservatório flexível (Farley, 2011, 2012). Como mostra a fig. 2.18, o dispositivo é composto essencialmente por dois reservatórios pneumáticos interligados por uma turbina. A parte submersa em cunha funciona como um fole, cujas paredes rígidas articuladas no vértice abrem e fecham sob a acção das ondas incidentes. Este movimento gera um fluxo de ar reversível entre os dois reservatórios, activando assim a turbina e gerando energia útil. Um dos principais problemas que advém da configuração proposta por Farley (2012) é que a força de restituição do volume de ar depende da pressurização do sistema completo, aumentando assim a complexidade do sistema.

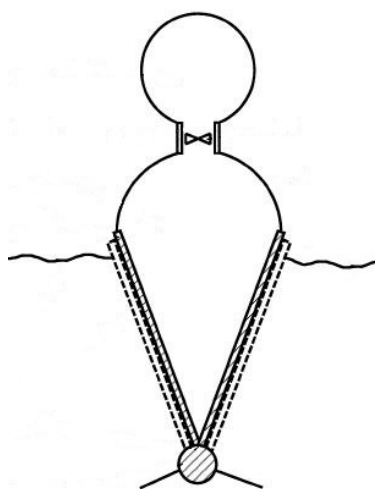


Figura 2.18: Dispositivo patenteado por Francis Farley.

Fonte: Farley (2012).

Para tentar contornar a necessidade de pressurizar todo o sistema Kurniawan et al. (2014) propuseram estender o conceito de Farley (2012), acoplando um dispositivo de volume deformável a uma OWC. Como mostra a fig. 2.19, foram estudadas duas configurações: uma para o dispositivo assente no fundo e outra para o dispositivo flutuante. O sistema é constituído essencialmente por um volume compressível submerso, delimitado no topo por uma placa móvel. A acção das ondas incidentes faz variar a pressão que actua sobre as placas móveis, fazendo com que estas oscilem verticalmente e pressurizando assim o volume de ar compressível no interior do dispositivo. O ar pressurizado excita uma OWC em U que, por sua vez, activa uma câmara pneumática que descarrega para a atmosfera através de uma turbina de ar. Apesar deste sistema ser consideravelmente mais complexo que o de Farley, o mecanismo garante uma força de restituição do volume de ar, regulada neste caso pelo desnível da água da OWC.

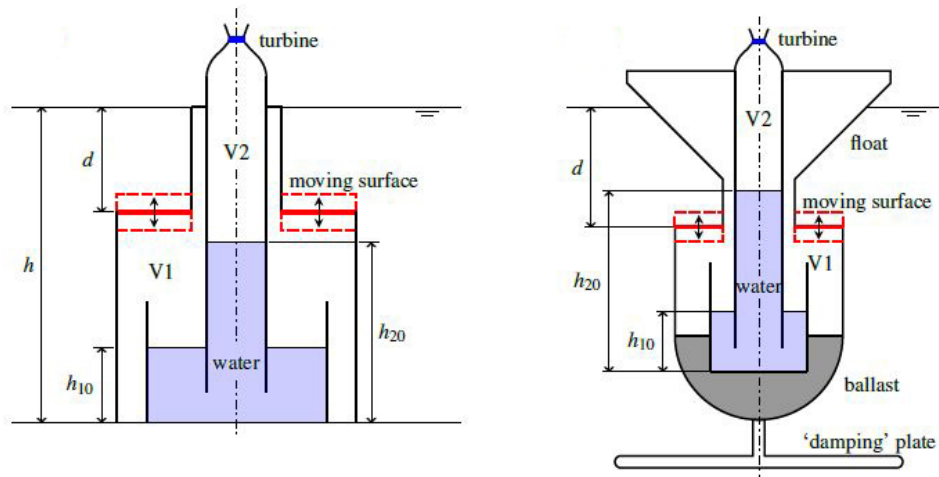


Figura 2.19: Dispositivo de volume compressível proposto por Kurniawan et al. (2014): configuração assente no fundo (esquerda); configuração flutuante (direita).

Fonte: Kurniawan et al. (2014).

2.2.2 Sistemas com interface de trabalho distensível

Os dispositivos em que a interface de trabalho é distensível são aqueles que utilizam uma membrana elástica na interface primária com as ondas incidentes. Isto permite reduzir o número de peças rígidas móveis do dispositivo, aumentando assim a sua robustez. Uma breve revisão do desenvolvimento de dispositivos que utilizam materiais flexíveis é apresentada em Renzi et al. (2021) e em Collins et al. (2021). Como já foi referido, os primeiros dispositivos que faziam uso de uma superfície de trabalho distensível foram introduzidos nos anos 80 por Michael J. French (French, 1979a; Cockerell et al., 1981) e por N. Bellamy (Bellamy, 1982). Desde então identificam-se três classes de dispositivos deste tipo, que podem ser definidas de acordo com o tipo de superfície de contacto com o mar: os dispositivos de células pneumáticas, os dispositivos tubulares e os dispositivos em tapete. Os dispositivos LFB (*Lancaster Flexible Barge*) e Sea Clam inserem-se ambos na primeira categoria.

O dispositivo AWS-III da empresa AW Ocean Energy também é constituído por um conjunto de células pneumáticas flexíveis, agrupadas em círculo, num arranjo semelhante ao SEA-Clam [A.2.30]. As células são neste caso interligadas aos pares, através de tubagens onde se encontram turbinas de ar (fig. 2.20). A acção das ondas incidentes gera caudal entre células em anti fase, que activa as turbinas. A prova de conceito deste dispositivo foi

conseguida em 2010, através de testes com um modelo à escala 1:9 realizados no Lago Ness. Em 2011 foi testada uma versão deste dispositivo com geometria poligonal, à escala 1:15, na zona de testes MARIN – Países Baixos. Em 2014 foi desenvolvida uma nova versão do dispositivo, desta vez numa configuração linear. Previa-se que o protótipo desta versão viesse a ter uma capacidade de 2,4 MW. Ainda em 2014, foi testada uma única célula à escala real, no Lyness Quay em Orkney. Como referido pela empresa AW Ocean Energy, esta tecnologia está actualmente pronta para avançar para os estágio de protótipo à escala real.

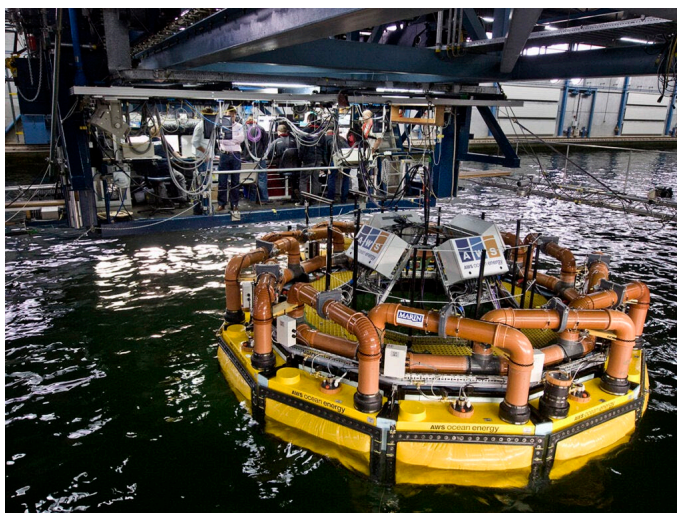


Figura 2.20: Dispositivo AWS-III durante os testes à escala 1:15 na zona de testes MARIN.

Fonte: Ref. [A.2.30].

O dispositivo mWave da empresa Bombora (fig. 2.21) é um sistema submerso sujeito à acção das ondas de superfície que activam um conjunto de células pneumáticas. Oito destas células são montadas numa estrutura de cimento assente no fundo, 4 de cada lado. As células são ligadas a uma conduta de admissão e outra de retorno, em circuito fechado. O ar que é posto em circulação no interior da estrutura pelas células acciona uma turbina, que produz energia eléctrica. O mWave foi inicialmente patenteado em 2017 (Ryan & Ryan, 2017) e, mais tarde, foi patenteada uma versão melhorada em 2021 (Leighton et al., 2021). Entre 2015 e 2016 foi ainda testado um modelo do dispositivo à escala 1:15 na Australian Maritime College, Tasmânia. Os resultados da modelação experimental e numérica do dispositivo é descrita em Algie et al. (2017) e Orphin et al. (2017). Está actualmente em construção um protótipo de demonstração do mWave, com uma capacidade de 1,5 MW, que se destina a ser instalado a aproximadamente 1 km da praia de Freshwater West, em Pembrokeshire (Gales Ocidental). A construção do dispositivo foi subcontratada à empresa Kymaner [A.2.31]. Em paralelo, a empresa Bombora está em processo de planeamento e obtenção de licenças para a construção e instalação de um dispositivo mWave de 3 MW a oeste de La Santa, na costa norte da Ilha de Lanzarote nas Canárias.

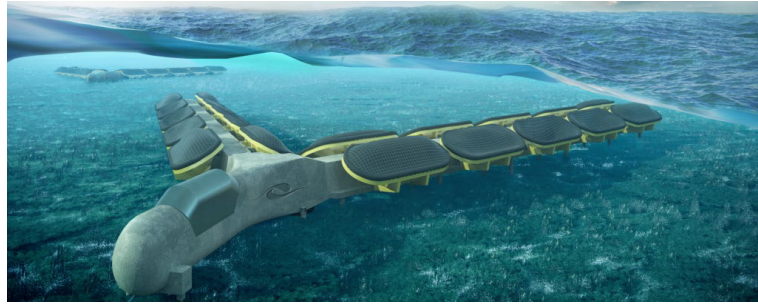


Figura 2.21: Ilustração do dispositivo mWave.

Fonte: Ref. [A.2.32].

Um outro dispositivo de células pneumáticas é o DMP da empresa M3Wave [A.2.33]. Como mostrado na fig. 2.22, este dispositivo atenuador submerso é constituído por dois reservatórios distensíveis cheios com ar, afastados entre si, ligados por uma tubagem que encerra uma turbina de ar. O sistema é posicionado paralelamente à direcção propagação das ondas. Em 2014 foi testado um modelo deste dispositivo ao largo da costa de Oregon, nos Estados Unidos (McNatt et al., 2014; Babarit et al., 2017).



Figura 2.22: Modelo do dispositivo M3Wave DMP durante o seu lançamento para testes ao largo da costa de Oregon, nos Estados Unidos da América.

Fonte: Ref. [A.2.33].

Em simultâneo, está a ser desenvolvido na Universidade de Plymouth um outro dispositivo de recuperação de energia das ondas de células pneumáticas. Este dispositivo consiste essencialmente de um balão, cheio com ar, cujas secções deformáveis são separadas por um conjunto de tendões inelásticos. O dispositivo foi estudado numa configuração assente no fundo (fig. 2.23, direita) – Kurniawan & Greaves (2016) – e flutuante (fig. 2.23, esquerda) – (Chaplin et al., 2015; Kurniawan et al., 2017a). O balão expande e contrai sob a

acção das ondas incidentes, gerando um caudal de ar que acciona uma turbina ao ser descarregado para um volume secundário rígido. Uma terceira variante do dispositivo flutuante (fig. 2.23, centro) foi estudada por Kurniawan et al. (2017b). Desta vez o saco distensível está completamente submerso e é o volume de ar secundário que cruza a superfície. As três configurações deste dispositivo, todas elas do tipo absorvedor pontual, foram testadas à escala 1:20 no laboratório COAST, em Plymouth (Greaves et al., 2016). Kurniawan et al. (2017b) demonstraram numericamente que a frequência de ressonância do dispositivo pode ser ajustada, alterando volume de ar dentro do saco distensível quando este está em repouso. Adicionalmente, os efeitos de compressibilidade do ar fazem com que a ressonância das oscilações verticais do dispositivo ocorra para períodos de onda incidente maiores que num dispositivo rígido do mesmo tamanho (Kurniawan & Greaves, 2015). Kurniawan et al. (2021) revisita o dispositivo flutuante, mas desta vez introduzindo tendões elásticos no modelo numérico. Verificou que a utilização de tendões elásticos aumenta o período de ressonância da respiração do saco distensível, efeito semelhante ao que aconteceria se o volume de ar fosse aumentado. Isto permite que um dispositivo deste tipo possa ter dimensões menores que o dispositivo estudado anteriormente. Em paralelo, Francis Farley patenteou um dispositivo semelhante (Farley, 2014, 2018).

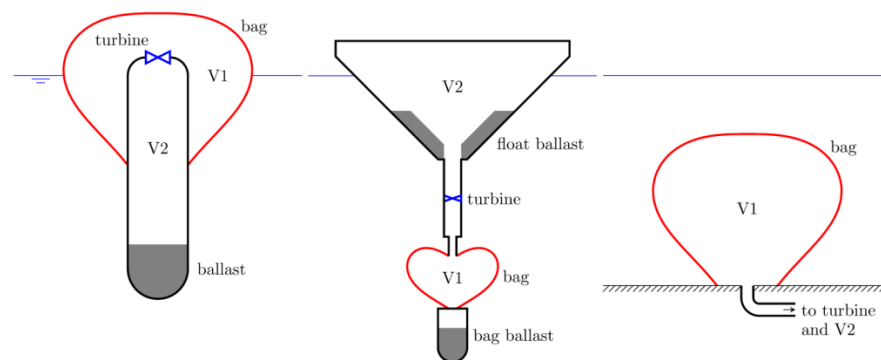


Figura 2.23: Diagramas das três configurações do dispositivo em estudo em Plymouth.

Fonte: Greaves et al. (2016).

O dispositivo de tubo distensível *Anaconda*, que foi patenteado em 2006 por Farley e Rainey (2006a), tem particular interesse para o presente estudo. Consiste num tubo de borracha cheio de água que flutua alinhado com a direcção de propagação das ondas incidentes (fig. 2.24). A interacção com as ondas incidentes gera ondas de pressão longitudinais no interior do tubo que se deslocam em direcção a um sistema de extracção de potência, situado na parte de trás do tubo. A patente deste dispositivo foi posteriormente adquirida pela empresa Checkmate Seaenergy. Mais tarde, em 2009, a empresa SBM

Offshore desenvolveu um dispositivo de tubo distensível semelhante ao *Anaconda* chamado de S3 [A.2.34]. Neste caso o tubo pressurizado é fechado em ambas as extremidades e a conversão de energia é feita directamente nas paredes distensíveis do tubo, através da utilização de polímeros piezoelétricos a que os autores chamam de polímeros electro-activos (EAP). A prova de conceito foi realizada com um modelo de 11 m de comprimento e 25 geradores EAP, que foi testado em 2010 no canal de ondas da ACRI-IN, em Sophia Antipolis. Mais tarde em 2011, um S3 com 10 m de comprimento e 20 geradores EAP foi testado no tanque hidrodinâmico da École Central de Nantes.



Figura 2.24: Modelo do dispositivo *Anaconda* testado em tanque de ondas.

Fonte: Farley et al. (2012).

Em 2012, Choplain e Chaplin estudaram ainda um dispositivo distensível do tipo carpete, destinado a ser montado no fundo do mar (Choplain & Chaplin, 2012). O dispositivo pneumático proposto consiste num caixão rectangular alinhado com direcção de propagação das ondas – fig. 2.25 (lado esquerdo). O topo do caixão é fechado por uma carpete distensível. O caixão é ligado a uma OWC que garante a sua pressurização. Os pulsos de pressão induzidos pela interacção da carpete com as ondas incidentes são transmitidos à coluna de água, que oscila e activa uma turbina de ar através de uma câmara pneumática. Este sistema é adequado para funcionar em águas pouco profundas, junto à costa. Em simultâneo, M.-R. Alam da Universidade UC Berkeley propôs em 2012 outro dispositivo deste tipo: o Wave Carpet. Este sistema consiste numa carpete flexível, ancorada no fundo do mar, que serve de leito oceânico artificial. A interacção com as ondas do mar gera uma

ondulação na carpete, que activa um conjunto de bombas hidráulicas lineares – fig. 2.25 (lado direito). A prova de conceito deste dispositivo foi realizada em 2013 no TafLab, na Universidade de Berkeley [A.2.35]. Uma versão aperfeiçoada do dispositivo foi testada em 2013, tendo atingido um rendimento de 42.3% (Lehmann et al., 2013). O Departamento da Energia dos Estados Unidos (DOE) atribuiu em 2019 financiamento à empresa CalWave Power Technologies, para desenvolver a próxima geração do dispositivo Wave Carpet.

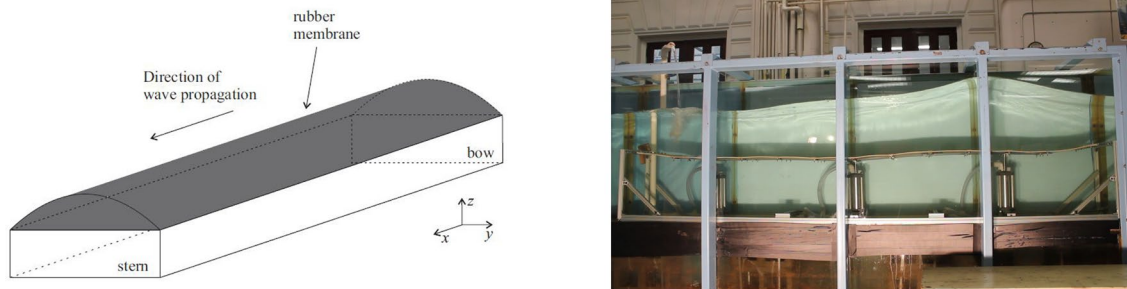


Figura 2.25: Representação modelo do dispositivo de Choplain e Chaplin (esquerda) e modelo do dispositivo Wave Carpet (direita).

Fonte: Choplain (2012); Ref. [A.2.35].

2.3 Zonas piloto e de testes na Europa

Por forma a facilitar o desenvolvimento de tecnologias de energias das ondas foram criadas várias zonas reservadas ao teste de dispositivos destinados ao aproveitamento desta energia. Estas zonas oferecem facilidades na obtenção de certificações e licenças governamentais para a implementação destes dispositivos, bem assim como as infra-estruturas necessárias para a sua implementação e ligação às redes eléctricas locais. O Catálogo dos Centros de Testes de Energia das ondas de 2011, redigido no âmbito do projecto SOWFIA – *Streamlining of Ocean Wave Farms Impact Assessment* – fornece uma lista das diferentes zonas reservadas para o teste de dispositivos de energia das ondas na Europa (Mora-Figueroa et al., 2011). Especificamente para Portugal, Braga (2017) faz um breve levantamento das características das zonas de testes Portuguesas. Actualmente existem três zonas de teste em Portugal: a Zona de Testes de Peniche, o Parque de ondas da Aguçadoura, na Figueira da Foz, e a Zona Piloto Portuguesa OceanPlug, em São Pedro de Moel. A Tabela 2.1 reúne as principais características destas zonas de testes e de outras zonas Europeias reservadas para este efeito. São também enumerados os dispositivos que foram testados em cada uma destas zonas.

Tabela 2.1: Zonas de testes de dispositivos de energia das ondas na Europa.

Zona de teste	Localidade	Área (km ²)	Profundidade (m)	Potencial (kW/m)	Dispositivos testados
Peniche test site	Peniche (Portugal)	2	15 – 20	30	WaveRoller
Aguçadoura Wave Farm	Aguçadoura (Portugal)	---	40 – 50	32	Pelamis; CorPower C4 e C5
Zona Piloto Portuguesa	São Pedro de Moel (Portugal)	320	30 – 90	32	---
Sem-Rev	Le Croisic (França)	1	32 – 36	12	TWT Floatgen; WEC WaveGen
DanWEC	Roshage Pier (Dinamarca)	1	12 – 30	5	WaveStar; Dexawave; Wavepiston, etc
WaveHub	Cornualha (UK)	8	50 – 65	20	Oceanos 2
AMETS	County Mayo (Irlanda)	6,9	100	Avaliação em progresso	---
		1,5	50		---
Runde Environmental Centre	Ilha de Runde (Noruega)	---	30 – 100	40 – 50	Powerpier; Havkraft; WaveEl; Waves4Power; Seabased; Seahorse; SWECO/Oslo Energi; StenSea
EMEC	Ilhas Orkney (Reino Unido)	5	20 – 75	22 – 25	Pelamis; Oyster; Seatricity; Wello Oy; AWS; CorPower's C3; LAMWEC; Seatricity; Seabased; Wello Penguin; Mocean Blue X
BIMEP	Mutriku	---	< 10	5 – 18	Mutriku OWC
	Armintza	5,3	50 – 90	21	Marmok-A5; Wello Penguin
PLOCAN	Gran Canaria (Espanha)	40	30 – 1000	8 – 10	---
Galway Bay Test Site	Baía Galway (Irlanda)	0,37	21 – 24	3	WaveBob; OE Buoy
FaBTest	Porto de Falmouth (UK)	2,8	15 – 50	3,5	Fred Olsen Bolt Lifesaver; Polygen's Volta; Wavesub; Amog's WEC
Lysekil Wave Energy Site	Lysekil (Suécia)	0,04	25	3	Seabased

2.4 Estado de desenvolvimento das tecnologias (TRL)

O desenvolvimento de todos estes dispositivos têm ocorrido de forma desigual, sendo que os mais estudados foram os dispositivos OWC e absorvedores pontuais. Falcão e Henriques (2016) fazem uma revisão muito completa da evolução de sistemas OWC e das turbinas de ar a eles acopladas. Segundo Magagna (2018), à data existiam 57 empresas a desenvolver activamente dispositivos de energia das ondas, 40 das quais ainda estavam em fase inicial de actividade. Apesar disso, estavam já instalados no mar 29 protótipos de demonstração. O relatório do desenvolvimento de tecnologias oceânicas de 2022 – Tapoglou et al. (2022) – especifica ainda o nível de desenvolvimento das diferentes tecnologias através do seu índice TRL - *Techology Readiness Level* [A.2.36]. Constatou-se que os dispositivos OWC e absorvedor pontual eram os únicos que tinham conseguido atingir um TRL de 9 até 2022. Os dispositivos de galgamento conseguiram por sua vez atingir TRL 8 e os OWSC atingiram TRL 7. As restantes tecnologias não foram capazes de atingir um TRL superior a 3. É importante notar ainda que, apesar de alguns dispositivos já terem atingido uma fase de desenvolvimento comercial, a sua viabilidade deve ser analisada caso a caso dada a dificuldade da produção de electricidade a longo prazo, sem interrupções. Cumulativamente, há necessidade de aumentar o factor de capacidade dos sistemas desenvolvidos. Lembremos que o factor de capacidade é definido como o rácio entre a electricidade realmente produzida num determinado intervalo de tempo e a máxima energia que poderia ter sido produzida nesse mesmo intervalo de tempo. De acordo com o relatório de 2016 do JRC - *Joint Research Centre* (Magagna et al., 2016), o factor de capacidade dos dispositivos de energia das ondas deve atingir 30 a 40% para que sejam economicamente viáveis. Note-se que, à data deste relatório, o factor de capacidade dos dispositivos OWC rondava os 25% e para outros tipos de dispositivos rondava 10%. Hoje em dia o esforço de I&D neste domínio está então mais orientado para o aperfeiçoamento dos componentes e sistemas de conversão de potência, além de melhorar o rendimento de dispositivos já existentes, em vez de desenvolver novos conceitos.

Capítulo 3

O Dispositivo Atenuador de Tubo Distensível

O dispositivo atenuador de tubo distensível consiste num longo tubo de borracha, cheio de água, que é fechado a montante por um nariz e cuja parte traseira está conectada a um sistema de extracção de potência (PTO). O tubo flutua alinhado com a direcção de propagação das ondas do mar e o dispositivo funciona por meio dos pulsos de pressão que estas induzem no seu interior. Estes pulsos de pressão aumentam à medida que progridem ao longo do tubo devido ao trabalho que as ondas vão realizando sobre o tubo, à medida que este distende e contrai. O sistema de extracção de potência que é analisado neste contexto é um sistema pneumático activado por uma coluna de água oscilante (OWC). Na maioria dos casos, as variações de pressão na câmara pneumática accionam um conjunto turbina de ar e gerador. A partir de um balanço de energia realizado sobre o sistema serão em seguida apresentados a potência extraída pelo dispositivo e a eficácia de extracção, cuja dedução é feita com base num modelo que foi especificamente desenvolvido para a obtenção do caudal de ar através do PTO em escoamento compressível. A planificação das experiências a realizar para validação do modelo e previsão do desempenho do dispositivo em condições reais é igualmente discutida.

3.1 Resenha histórica

3.1.1 Dispositivos *wave-profiling*

Os dispositivos atenuadores que se adaptam à superfície livre da água do mar pertencem ao grupo de dispositivos mais antigos concebidos para recuperar a energia das ondas. Com a excepção do conceito da viga flexível proposto por Farley (1982), estes dispositivos eram tipicamente do tipo jangada articulada, como a de Cockerell et al. (1978) e Hagen (1978). Mais recentemente, inspirados nos Dracones de Hawthorne (1961), Francis Farley e Rod Rainey registaram a patente do dispositivo *Anaconda* (Farley & Rainey, 2006a, 2006b). Este conceito utiliza um tubo de borracha com 150 m de comprimento e 7 m de diâmetro, interagindo com as ondas incidentes em profundidades de entre 40 m e 100 m. Este dispositivo elimina a necessidade de utilizar articulações entre as jangadas, que são normalmente os pontos de falha destes dispositivos. As sucessivas avarias destas articulações foram a causa do breve funcionamento do dispositivo *Pelamis* em Portugal.

3.1.2 Fases posteriores de desenvolvimento

Os primeiros testes com o *Anaconda* em laboratório foram efectuados por Chaplin et al. (2007a, 2007b). Estes investigadores ensaiaram um modelo em latex com 2,5 m de comprimento, 0,078 m de diâmetro e 0,15 mm de espessura de parede num canal hidráulico. O tubo estava submerso perto da superfície da água e foi fixo nas duas extremidades. O modelo testado capturava a energia de uma frente de onda com uma largura igual a cerca de 3 – 4 diâmetros do tubo. Mais tarde, Chaplin et al. (2010) realizaram novos testes com um tubo à escala de 1:25 na *Offshore Wave Basin* do DHI, na Dinamarca. O tubo tinha neste caso 7 m de comprimento, 0,215 m de diâmetro e entre 1 e 2 mm de espessura de parede, estando equipado com cilindros hidráulicos em ambas as extremidades. Estas experiências incidiram essencialmente na medição das ondas radiadas pelo dispositivo. Dois anos depois, Chaplin et al. (2012) relatam resultados obtidos com um dispositivo à mesma escala 1:25 mas desta vez realizados no tanque de ondas da Universidade de Solent, em Southampton. Este último modelo era um tubo compósito de borracha e material têxtil. O sistema pneumático de extracção de energia linear testado consistia num conjunto de tubos capilares, através dos quais o fluxo de ar transitava em escoamento laminar entre a câmara

pneumática e a atmosfera. Pela primeira vez, as estimativas teóricas do rendimento do dispositivo foram confirmadas pelos resultados experimentais. A largura máxima de captura de energia atingida situou-se próxima de 2 diâmetros do tubo. Farley et al. (2012) estabelecem finalmente as bases teóricas do funcionamento de tubos distensíveis no mar, em conjunto com uma avaliação das capacidades de um protótipo do dispositivo *Anaconda*.

3.2 Estado de desenvolvimento actual

A investigação até agora referida foi conduzida maioritariamente com tubos distensíveis fixos em ambas as extremidades e sujeitos a condições lineares restritivas, no que diz respeito ao clima de ondas. Por forma a estudar o desempenho de um tubo distensível que flutua livremente ligado a um PTO não-linear, Mendes et al. (2014) realizaram testes com um modelo do *Anaconda* à escala 1:100 num canal hidráulico, sujeito à acção de ondas regulares de amplitude finita. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Turbomáquinas (*fluidslab*) da Universidade da Beira Interior, em Portugal, e vêm na sequência de estudos relativos a OWCs realizados neste mesmo laboratório (Mendes & Monteiro, 2007). Ao contrário dos modelos do *Anaconda* anteriormente considerados, neste caso o nariz do tubo pode flutuar livremente junto à superfície da água. O tubo testado tinha um comprimento de 0,81 m, 7,8 cm de diâmetro e uma espessura de parede de 0,16 mm. A parte de trás do tubo foi ligada a uma coluna de água oscilante através de um cotovelo que, por sua vez, estava fixo num pilar assente no fundo (fig. 3.1). O PTO deste modelo consistia num orifício de arestas vivas através do qual a câmara pneumática comunicava com a atmosfera.

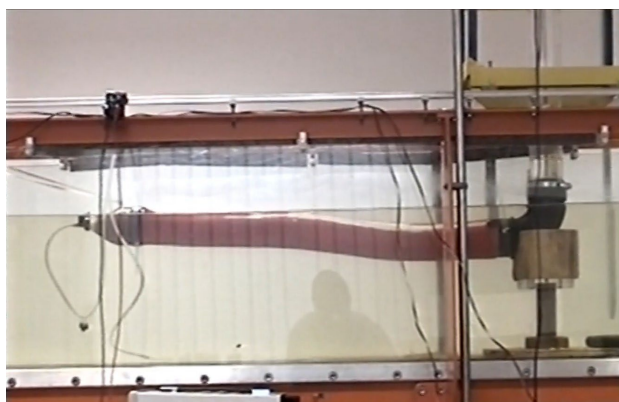


Figura 3.1: Dispositivo atenuador de tubo distensível testado à escala 1:100.

Fonte: Cortesia do Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Turbomáquinas (*fluidslab*) da Universidade da Beira Interior.

Nesta configuração a flexão e alongamento do tubo de borracha estão acoplados à sua pulsação. Os resultados deste estudo não só põem em evidência diversos aspectos da dinâmica do dispositivo em ondas lineares e de grande amplitude, como também os benefícios resultantes do acoplamento do *Anaconda* a um sistema OWC. Tendo em vista aprofundar esta investigação, Mendes et al. (2017) conduziram uma nova campanha de testes com um modelo deste dispositivo à escala 1:50 em tanque hidrodinâmico. Desta vez o tubo tinha 2,44 m de comprimento, 18,9 cm de diâmetro e 1 mm de espessura. O sistema OWC foi instalado numa estrutura de treliças assente no fundo (fig. 3.2). O PTO pneumático foi, uma vez mais, emulado pelo escoamento de ar através de um orifício calibrado. No modelo à escala 1:100, os cálculos foram efectuados por meio da equação de Bernoulli assumindo que o escoamento de ar era incompressível. Neste novo modelo à escala 1:50 os cálculos da potência extraída foram efectuados assumindo escoamento compressível, utilizando a equação da energia para escoamento adiabático estacionário. Os efeitos que advêm de ignorar a compressibilidade do ar no cálculo da eficácia do dispositivo foram deste modo postos em evidência.

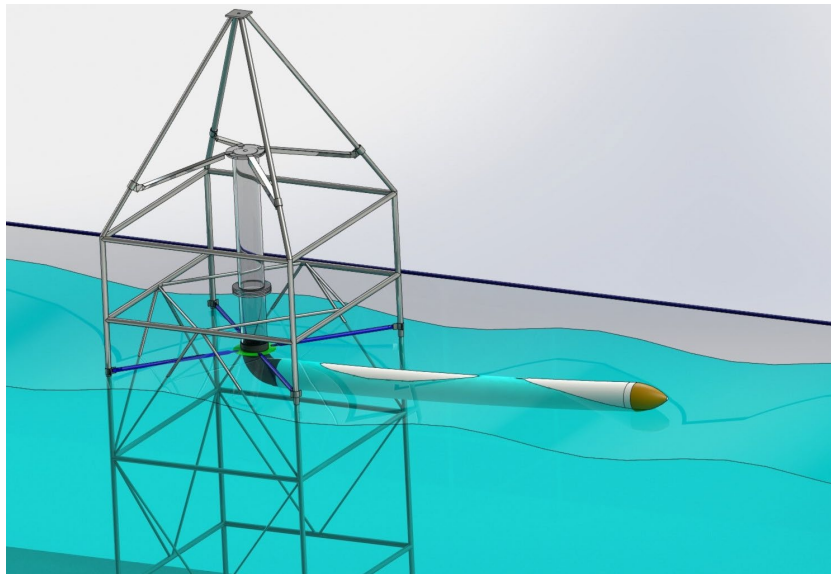


Figura 3.2: Dispositivo atenuador de tubo distensível com PTO pneumático testado à escala 1:50 por Mendes et al. (2017).

Na sequência destas investigações foi construído um modelo do dispositivo à escala 1:20, posteriormente ensaiado no tanque hidrodinâmico do *fluidslab*. Em Mendes et al. (2020) são reportados os resultados preliminares dos ensaios experimentais realizados, na perspectiva do aproveitamento de energia das ondas nos Açores. É dada uma primeira aproximação do desempenho de um dispositivo deste tipo à escala real, operando em ondas de 5 s a 9 s de período e 1,4 m a 5 m de altura.

3.2.1 Dinâmica do tubo distensível

A propagação de ondas de pressão longitudinais através de um tubo distensível é um problema clássico cuja teoria foi desenvolvida em profundidade por Lighthill (1978), com aplicação prática no sistema circulatório do corpo humano. No caso presente, as ondas de pressão são geradas pela acção das ondas gravíticas incidentes sobre o tubo distensível flutuante. Chaplin et al. (2012) demonstraram experimentalmente que a amplitude dos pulsos de pressão é máxima quando a velocidade longitudinal das ondas de pressão no tubo é igual à celeridade das ondas incidentes. Nestas condições, diz-se que o tubo está sintonizado com as ondas incidentes.

Como deduziu Lighthill, na ausência de histerese a velocidade das ondas longitudinais induzidas num tubo distensível é dada por $U = 1 / \sqrt{\rho_1 D}$, onde ρ_1 é a massa volúmica do fluido – que é neste caso água – e D é a distensibilidade do tubo. Para um tubo de secção circular com diâmetro d e espessura de parede w , a distensibilidade é $D = d / (wE)$. Neste caso $E = 0,91 \text{ Mpa}$ é o módulo de Young do Latex. Assim sendo, a velocidade vem $U = \sqrt{wE/(\rho_1 d)}$. Para ondas de superfície que se propagam em águas de profundidade h , com celeridade $c = (g/2\pi f) \tanh(kh)$, o período de sintonização dos pulsos de pressão com as ondas incidentes é:

$$T_1 = \frac{2\pi\sqrt{wE/(\rho_1 d)}}{g \tanh(kh)} \quad (3.1)$$

Nesta expressão g é a aceleração da gravidade e k é o número de onda. O conhecimento prévio do período T predominante das ondas incidentes no local de implantação do dispositivo é fundamental para projectar um tubo que interactue com estas ondas em condições de ressonância ($T_1 = T$).

Para além dos pulsos de pressão, as ondas incidentes também induzem num tubo distensível movimentos de flexão – cujos modos próprios dependem da relação entre o comprimento do tubo e o comprimento da onda incidente – e de alongamento/contractão, quando este flutua livremente sobre a superfície do mar. Como se verá mais tarde, estes modos de oscilação são particularmente importantes para tubos em que seu o comprimento está entre $1/2$ e 1 comprimento de onda λ . Nestas condições os modos de oscilação a considerar são semelhantes aos modos de oscilação de uma viga encastrada numa extremidade e livre na outra. Num modelo compatível com as observações experimentais, é

como se as massas própria e virtual do tubo estivessem concentradas na extremidade livre da viga. A fig. 3.3 ilustra os três primeiros modos de oscilação para esta configuração. O 1º modo ocorre para tubos muito curtos em relação ao comprimento da onda incidente; o 2º modo ocorre quando o comprimento do tubo é da ordem de meio comprimento de onda; o 3º modo ocorre para tubos relativamente longos, onde o comprimento do tubo é da ordem do comprimento de onda. Em todas estas situações o dispositivo flutuante oscila com 3 graus-de-liberdade, o que contribui para aumentar significativamente o seu desempenho. O acoplamento dos três modos de funcionamento do tubo em pulsação, flexão e alongamento é portanto uma das características principais do dispositivo atenuador de tubo distensível que é aqui estudado.

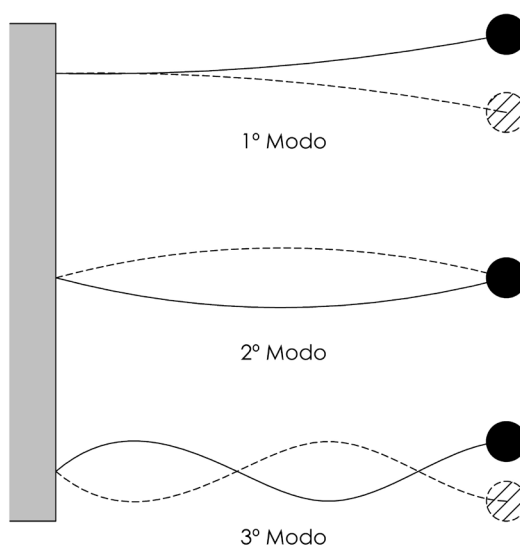


Figura 3.3: Modos de vibração de uma viga encastrada numa extremidade com massa concentrada na extremidade livre.

3.2.2 OWC e Sistema de extracção de potência

As interfaces de conversão da energia das ondas incidentes são três. Numa primeira fase a energia potencial e cinética das ondas é transferida para o fluido dentro do tubo, através das suas paredes distensíveis. Esta energia, sob a forma de ondas de pressão longitudinais ao longo do tubo, é a energia que sustenta as oscilações da coluna de água oscilante dentro da chaminé vertical (fig. 3.4). O pistão líquido induz por sua vez variações de pressão na câmara pneumática, que podem ser posteriormente convertidas em potência ao veio de uma turbina de ar. O acoplamento do tubo distensível à chaminé vertical é feito

através de um cotovelo de 90° de modo a reduzir as perdas do sistema. Por outro lado, a utilização de um sistema OWC de secção circular permite reduzir a área de contacto com o fluido e, deste modo, reduzir consideravelmente as perdas por resistência viscosa. Foi igualmente observada uma redução substancial das perdas por rebentação da onda estacionária na superfície livre da OWC – o chamado *sloshing* –, que é um fenómeno indesejável característico dos sistemas OWC de secção rectangular.

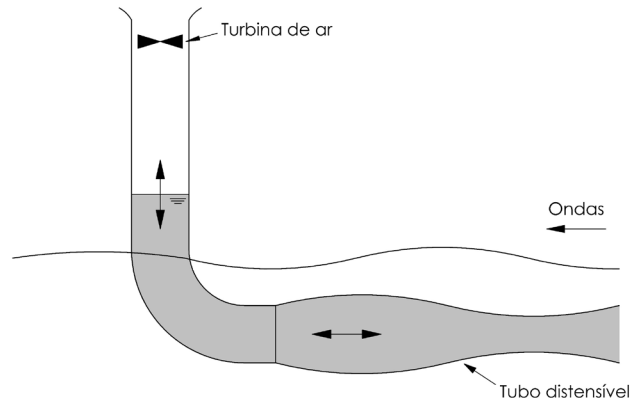


Figura 3.4: Acoplamento do tubo distensível a uma OWC com PTO pneumático.

Um parâmetro importante das oscilações da coluna de água do sistema é a sua frequência natural ω_0 . Na ausência do tubo distensível o sistema OWC é excitado pelas ondas incidentes, sendo a frequência natural de oscilação determinada pelo comprimento da coluna de água l . Se ignorarmos a contribuição da massa virtual do sistema, uma primeira aproximação da frequência natural é $\omega_0 = \sqrt{g/l}$. Consequentemente, as oscilações livres da coluna de água entram em ressonância quando a frequência das ondas incidentes ω coincide com ω_0 . Sendo $k = \omega^2/g$ o número de onda em águas profundas que, por definição é o número de ondas contidas num comprimento igual a 2π , vem $\lambda = 2\pi/k$. Deste modo $\omega = \sqrt{2\pi g/\lambda}$ e, para condições de ressonância $l = \lambda/2\pi$. Em termos práticos, o comprimento da coluna de água oscilante deve ser escolhido em função do período predominante das ondas incidentes, por forma a que o sistema oscile no seu período de ressonância T_0 :

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (3.2)$$

O amortecimento introduzido pelo PTO e rigidez adicional devida à inclusão do tubo modificam a localização da ressonância. Para além disto a altura estática de água na

chaminé tem relação directa com a pressurização inicial do tubo, permitindo sintonizar o sistema também para T_1 através da variação do diâmetro do tubo.

3.2.3 Metodologia de modelação do sistema PTO

Os desenvolvimentos tecnológicos mais recentes apontam para a utilização de turbinas radiais de impulso – Falcão e Henriques (2016). Em conformidade com a característica não linear destas turbinas, o modelo físico utilizado para simular o PTO nas experiências realizadas consiste numa placa com um orifício calibrado de diâmetro d_0 , que é instalado no topo da câmara pneumática – fig. 3.5. A câmara pneumática representada é cilíndrica com secção recta de área A e altura h_1 , medida desde a superfície livre da OWC até ao orifício. A impedância do sistema é variada testando sucessivamente placas com orifícios de diferente diâmetro d_0 .

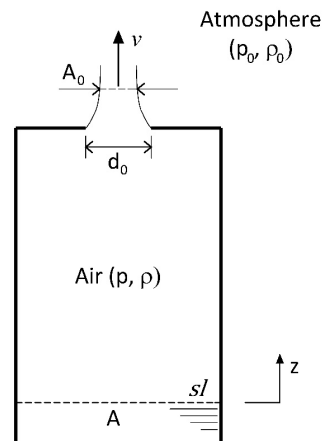


Figura 3.5: Representação esquemática da câmara pneumática e PTO utilizado nos modelos físicos.

O balanço de energia aplicado a este sistema PTO está descrito em Mendes et al. (2014). O método baseia-se exclusivamente na medição do deslocamento da superfície livre da coluna de água oscilante $z(t)$. Neste caso, desprezando os efeitos de compressibilidade o caudal de ar através do orifício é $Q = A \frac{dz}{dt}$, onde $\frac{dz}{dt}$ é a velocidade da superfície livre da OWC. Para estimar a potência extraída basta então saber qual é o diferencial de pressão entre a câmara e a atmosfera. Aplicando a equação de Bernoulli para escoamento incompressível estacionário, ao longo de uma linha de corrente através do orifício, este diferencial de pressão Δp é dado por:

$$\Delta p = KQ^2 \quad (3.3)$$

onde $K = \frac{8\rho}{C_d^2 \pi^2 d_0^4}$ é a característica do orifício; ρ é a massa volúmica do ar e $C_d = 0,6$ é um valor empírico recomendado para a descarga através de um pequeno orifício de arestas vivas.

Para um processo adiabático, a potência instantânea extraída pelo PTO pode agora ser determinada multiplicando o caudal volúmico de ar através do orifício $Q(t)$ pelo diferencial Δp estimado a partir da eq. (3.3). A correspondente potência média extraída P é então:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T |\Delta p(t)| \cdot |Q(t)| dt \quad (3.4)$$

Esta potência média é função da área da superfície livre no interior da chaminé A e da velocidade do pistão líquido dz/dt , bem como do período de excitação T .

3.2.4 Desempenho do sistema

O desempenho global de extracção de energia pelo PTO, em relação à energia da onda incidente, pode agora ser contabilizado na forma que é usualmente utilizada para dispositivos pontuais e atenuadores (Budar & Falnes, 1975), ou seja:

$$C_w = \frac{P}{P_i \times d} \quad (3.5)$$

Nesta expressão C_w é o chamado comprimento ou largura de captura – comprimento da frente de onda cuja energia foi totalmente absorvida pelo dispositivo –, P é a potência média extraída pelo PTO e P_i é potência transmitida pelas ondas incidentes por unidade de frente de onda. Para ondas regulares em águas de profundidade finita h , esta potência incidente é dada por Dean & Dalrymple (1991) na forma:

$$P_i = \frac{1}{2} \frac{\rho_1 g H^2 \lambda}{8T} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (3.6)$$

Equação onde ρ_1 é a massa volúmica da água, g é a aceleração da gravidade, H é a altura da onda incidente, λ o comprimento de onda, T o período e k o número de onda anteriormente definido. Da eq. (3.5) o comprimento de captura C_W resulta em números de diâmetro do tubo d .

Para modelos a escalas reduzidas é lícito assumir que o ar na câmara pneumática é incompressível. A experiência indica, porém, que a escalas maiores que sensivelmente 1:100 é necessário ter em consideração os efeitos de compressibilidade para obter previsões confiáveis do caudal de ar através do PTO, o que está naturalmente ligado às estimativas de potência e comprimento de captura. Estes efeitos de compressibilidade só podem ser introduzidos no modelo se dispusermos de medições da pressão do ar no interior da câmara pneumática.

3.3 Determinação do caudal de ar em escoamento compressível

Para escoamento compressível o caudal mássico de ar \dot{m} que atravessa o orifício do PTO, que tem diâmetro d_0 , pode ser determinado a partir da equação da energia para escoamento estacionário e da lei da conservação de massa. Uma dedução pormenorizada da equação do caudal mássico pode ser encontrada em Reader-Harris (2015) para medidores de orifício e em Mendes et al. (2017), aplicada ao presente modelo de PTO pneumático. De um modo geral, considerando condições adiabáticas ($p/\rho^\gamma = \text{constante}$), o caudal mássico \dot{m} tomado em função da pressão diferencial Δp tem a forma:

$$\dot{m} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d_0^2}{4} \sqrt{2\rho^* \Delta p} \quad (3.7)$$

Nesta expressão $\Delta p = p - p_0$ quando o ar é expelido da câmara pneumática (*exalação*) e $\Delta p = p_0 - p$ quando o ar entra na câmara pneumática (*inalação*); p e p_0 são as pressões na câmara pneumática e do ar atmosférico, respectivamente. Por sua vez ρ^* é a massa volúmica do ar a montante do orifício, ε é o factor de expansibilidade e β é a razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro a montante. Na exalação $\beta = d_0/2r$ e na inalação é assumido que o diâmetro a montante é 100 vezes maior que d_0 ; neste caso $\beta = 0,01$. Esta última hipótese

é compatível com a existência de condições de estagnação no exterior da câmara pneumática.

Se o escoamento for incompressível o factor de expansibilidade $\varepsilon = 1$. Caso contrário, para escoamento compressível, o efeito do factor de expansibilidade é reduzir o caudal através do orifício e é dado na sua forma geral por:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\gamma n^{2/\gamma}}{\gamma-1}\right)\left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4 n^{2/\gamma}}\right)\left(\frac{1-n^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{1-n}\right)} \quad (3.8)$$

Nesta equação γ é a razão de calores específico para o ar, $n = p_0/p$ para a exalação e $n = p/p_0$ para a inalação. Uma equação empírica para a determinação de ε em medidores de orifício é dada nas normas MFC-3M-2004 (ASME, 2004) sob a forma:

$$\varepsilon = 1 - \gamma^{-1} (0,41 + 0,35 \beta^4)(\Delta p/p^*) \quad (3.9)$$

onde p^* é a pressão a montante do orifício.

Note-se que para o escoamento de ar através de um orifício de aresta viva, a expressão do caudal mássico (eq. 3.7) ainda não está completa. De facto, existe uma perda de carga devido ao atrito na aresta viva do orifício que ainda não foi contabilizada. O caudal mássico deverá então ser multiplicado por um coeficiente de descarga C_d . A expressão do caudal mássico do ar que atravessa o orifício do PTO assume então a sua forma final:

$$\dot{m} = \frac{C_d \varepsilon}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d_0^2}{4} \sqrt{2\rho^* \Delta p} \quad (3.10)$$

O valor que é usualmente assumido para o coeficiente de descarga é 0,6. No entanto, como a perda de energia depende do Número de Reynolds do escoamento através do orifício, têm sido desenvolvidas várias equações empíricas para a sua determinação. Uma revisão histórica destas equações pode ser encontrada em Reader-Harris (2015).

Para o presente modelo, foi desenvolvido um método iterativo para a determinação de C_d , que é baseado no algoritmo de Miller (1996) para medidores de orifício em tubagens. Em regime turbulento, assumindo que $Re > 4000$, o coeficiente de descarga do orifício é:

$$C_d = C_\infty + \frac{b'}{Re^{*\alpha}} \quad (3.11)$$

onde Re^* é o número de Reynolds referido à velocidade do ar a montante do orifício; b' é o factor de correcção de Reynolds e $\alpha = 0,75$. C_∞ é o coeficiente de descarga para Reynolds infinito. A experiência mostra que a restrição de $Re > 4000$ pode ser levantada quando o caudal é muito baixo, porque nestas condições as perdas de carga não têm grande impacto no cálculo caudal.

Para tomadas de pressão do tipo flange e $r > 29,2 \text{ mm}$, o coeficiente de descarga para Re infinito é:

$$C_\infty = 0,5959 + 0,0312\beta^{2.1} - 0,184\beta^8 + \frac{\beta^4}{2r(1 - \beta^4)} - 0,856\frac{\beta^3}{2r} \quad (3.12)$$

onde $2r$ é o diâmetro da OWC. O factor de correcção de Reynolds é por seu lado dado por:

$$b' = 91.706\beta^{2.5} \quad (3.13)$$

É conveniente lembrar que existe uma assimetria entre a entrada e a saída do ar da câmara pneumática, dependendo do sinal de $p - p_0$. Assim sendo, quando o ar é expelido da câmara pneumática o comprimento característico de referência é o diâmetro da câmara $2r$ e o Número de Reynolds a montante do orifício $Re^* = (2\rho^*Q)/(\pi\mu r)$. Quando o ar é admitido na câmara pneumática, o comprimento característico de referência é tomado igual a $100d_0$ e o número de Reynolds $Re^* = \rho^*Q/(25\pi\mu d_0)$; μ é a viscosidade absoluta do ar.

O caudal mássico de ar $\dot{m}(t)$ é governado pelo diferencial de pressão $\Delta p(t)$ medido, geometria do orifício e massa volúmica do ar a montante do orifício $\rho^*(t)$ – determinada para cada pressão $p(t)$ pela lei dos gases perfeitos. O $C_d(t)$ é por sua vez função do número de Reynolds. É necessário então iterar as eqs. (3.10) e (3.11) para cada medição de pressão instantânea, de acordo com o seguinte algoritmo:

- 1) obtém-se uma primeira aproximação do caudal $\dot{m}(t)$, assumindo um C_d entre 0 e 1 na eq. (3.10);
- 2) com a anterior aproximação de $\dot{m}(t)$ é calculado o número de Reynolds a montante do orifício Re^* ;

- 3) utilizando o valor de Re^* obtido no passo 2, é calculado um novo C_d através da eq. (3.11);
- 4) o novo C_d fornece um valor actualizado de $\dot{m}(t)$, por meio da eq. (3.10);
- 5) Este procedimento regressa ao passo 2 e retoma a iteração até ser atingida a convergência de $\dot{m}(t)$ desejada;
- 6) Atingida a convergência, é seleccionada outra pressão medida $p(t)$, e o processo recomeça no passo 1.

Nos casos tratados ao longo do presente trabalho, referentes aos modelos às escalas 1:50 e 1:20, observou-se que a partir da sétima iteração não há variações superiores a 1×10^{-15} nos valores de C_d e de \dot{m} .

Uma vez determinada a série temporal do caudal mássico \dot{m} a partir deste algoritmo, o caudal volúmico $Q(t)$ pode ser facilmente obtido tomando $Q(t) = \dot{m}(t)/\rho^*(t)$. A potência média extraída pelo PTO pode agora ser calculada a partir de medições da pressão na câmara pneumática, de modo a tomar em consideração os efeitos de compressibilidade. A expressão da potência média P toma a seguinte forma:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (Q(t) \Delta p(t)) dt \quad (3.14)$$

3.4 Síntese dos desenvolvimentos mais recentes deste sistema

O desenvolvimento da metodologia de cálculo do caudal de ar através do PTO anteriormente descrita teve início em 2016, durante os ensaios com o modelo à escala 1:50 reportados em Mendes et al. (2017). Posteriormente este método foi melhorado e aplicado aos ensaios preliminares do modelo 1:20 reportados em Mendes et al. (2020). Comparações com previsões teóricas e resultados experimentais padrão mostraram que a aplicação deste método permite reduzir a incerteza da determinação do caudal de ar através do PTO e, consequentemente, obter previsões de rendimento mais confiáveis para este dispositivo.

Mais recentemente, com base em ensaios exploratórios do modelo à escala 1:100 equipado com um canal de focagem, foram também planeadas outras estratégias para

melhorar o rendimento do sistema. Concretamente em relação ao modelo à escala 1:20, foi-lhe acoplado um canal convergente com parede reflectora e fundo inclinado. Este sistema de focagem permitiu aumentar consideravelmente o rendimento máximo do atenuador de tubo distensível e, concomitantemente, alargar a banda de frequências de elevado desempenho. O conjunto de tarefas e resultados alcançados são descritos em pormenor nos capítulos a seguir.

Capítulo 4

Ensaio Experimental do Dispositivo à Escala

1:50

Os resultados obtidos com o modelo do dispositivo atenuador de tubo distensível à escala 1:50, que foram reportados em Mendes et al. (2017), são em seguida reanalisados à luz das metodologias descritas no capítulo anterior para o cálculo do caudal de ar em regime incompressível e compressível. Isto permite comparar a previsões de potência extraída e do comprimento de captura do dispositivo nestas duas condições.

4.1 Instalação experimental

A fig. 4.1 ilustra o modelo à escala 1:50 que foi construído e testado no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Turbomáquinas da Universidade da Beira Interior. A instalação experimental consta de uma plataforma de treliças assente no fundo do tanque hidrodinâmico do Laboratório, cuja função é apoiar o sistema OWC e PTO. Acoplado a este sistema está um tubo de borracha, cheio de água, de comprimento $L = 2,44 \text{ m}$ e diâmetro inicial $d = 0,15 \text{ m}$. A instalação permite a monitorização do campo de ondas incidentes,

assim como do deslocamento da superfície livre da OWC e pressão no interior da câmara pneumática.

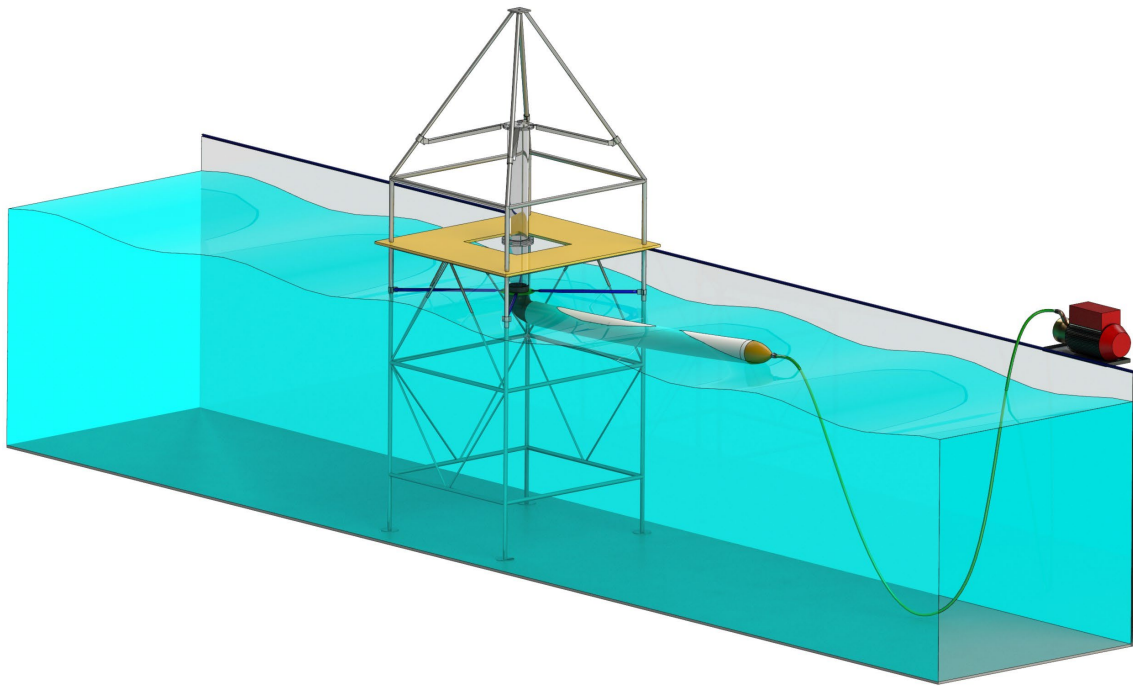


Figura 4.1: Modelo à escala 1:50 do sistema atenuador de tubo distensível, acoplado a uma OWC que é apoiada numa plataforma assente no fundo do tanque hidrodinâmico.

4.1.1 Modelo físico

O modelo físico do dispositivo atenuador de tubo distensível da fig. 4.1 está equipado com um tubo de latex de comprimento $L = 2,44 \text{ m}$ e espessura de parede $w = 1 \text{ mm}$. A extremidade do tubo está fechada por um nariz de madeira que flutua livremente. O tubo está alinhado paralelamente com a direcção de propagação das ondas incidentes e é conectado a jusante com um cotovelo de 90° em PVC a uma profundidade $a = 12,4 \text{ cm}$. O cotovelo liga a uma chaminé vertical transparente, em acrílico, cujo diâmetro $2r$ é de $14,5 \text{ cm}$. A chaminé vertical encerra uma coluna de água de altura estática entre a superfície livre da OWC e a água exterior $h_0 = 21,1 \text{ cm}$. Esta garante um diâmetro do tubo pressurizado $d = 18,9 \text{ cm}$. O enchimento do tubo com água até à sua pressão nominal é feita através de uma bomba reversível, que alimenta uma mangueira ligada ao nariz do tubo. O comprimento total da coluna de água nestas condições, incluindo o cotovelo, é $l = 0,708 \text{ m}$. Acima da superfície livre da coluna de água encontra-se uma câmara pneumática de altura

$h_1 = 1,217 m$, que termina numa placa contendo um orifício de diâmetro d_0 . A câmara comunica com a atmosfera através deste orifício, que simula um sistema de extracção de potência por turbina de ar. Nas tabelas 4.1 e 4.2 são apresentadas as principais dimensões do tubo distensível e do sistema OWC/PTO, respectivamente.

Tabela 4.1: Dimensões do tubo distensível.

Comprimento $L (m)$	Diâmetro $d (m)$	Parede $w (mm)$	Pressão $h_0 (m. c. a.)$
2,44	0,189	1,05	0,211

Tabela 4.2: Dimensões sistema OWC / PTO.

Diâmetro $2r (m)$	Comprimento da OWC $l (m)$	Altura da câmara pneumática $h_1 (m)$	Diâmetro do orifício $d_0 (mm)$
0,145	0,708	1,217	10 – 30

4.1.2 Tanque hidrodinâmico

Em 1997 foi concluída na Covilhã a recuperação de uma das três cisternas da Fábrica Transformadora de Lãs, para dar apoio às actividades do Laboratório de Mecânica dos Fluidos, Hidráulica e Turbomáquinas da Faculdade de Engenharia da UBI. Por volta de 2010 foi fabricado e instalado um canal hidrodinâmico no interior da cisterna, com um comprimento de $11 m$, uma largura $b = 2,06 m$ e uma altura de $2,2 m$. Este canal está equipado com um gerador de ondas numa extremidade e uma praia de dissipação com uma inclinação de 16° na outra extremidade. O gerador de ondas é do tipo aba articulada no fundo e é accionado por um motor trifásico NORD SK132S/4, de $5,5 kW$, através de um mecanismo excêntrico-manivela. A sua excentricidade pode ser regulada de $6,5 cm$ a $10,5 cm$. A profundidade da água no tanque $h = 1,9 m$ corresponde, nos presentes ensaios à escala 1:50, a uma profundidade real de $95 m$ no mar.

O tanque hidrodinâmico está equipado com uma estrutura tubular de treliças em aço inox, assente no fundo, que serve de suporte ao modelo físico (fig. 4.2). Esta estrutura

tem uma altura total de 4,234 m e 1,365 m de largura, sendo composta por 36 elementos tubulares cujas dimensões estão indicadas na tab. 4.3. Uma plataforma superior fora de água, em madeira, permite aceder ao modelo e instalar instrumentos de medida e controlo do modelo – ver fig. 4.2. Um dos pressupostos que orientou o projecto e instalação desta estrutura, concluídos em 2010, foi garantir a adequada fixação de modelos físicos sem perturbar significativamente o campo de ondas incidentes.

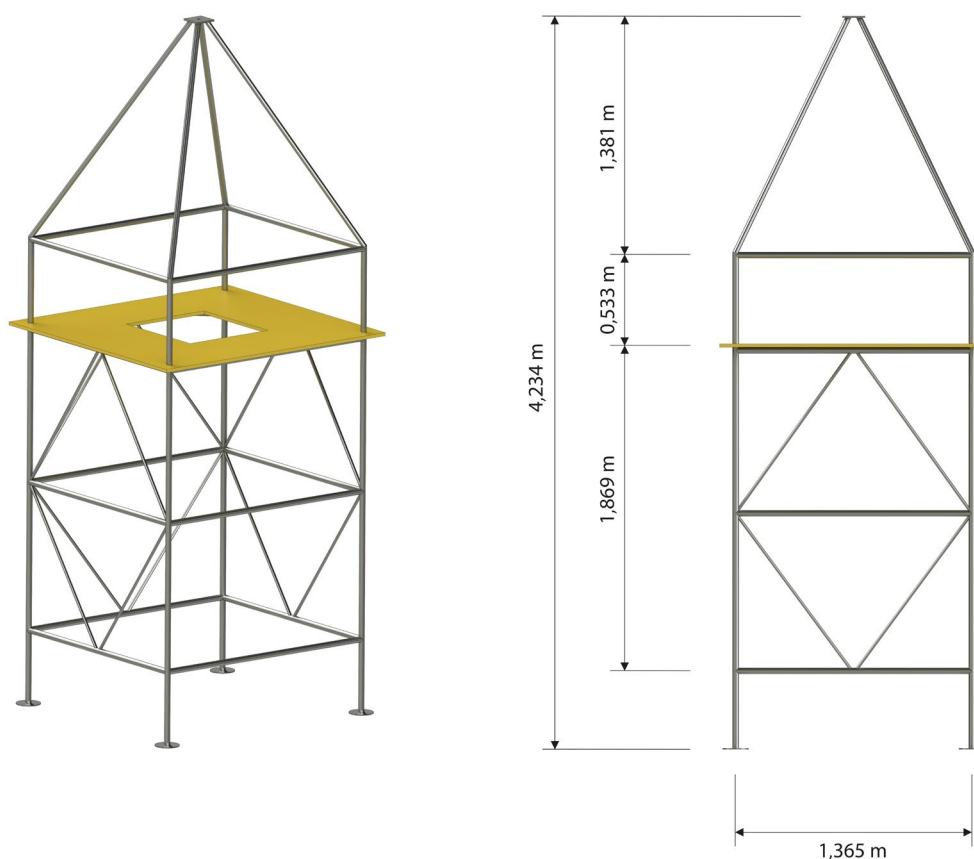


Figura 4.2: Estrutura tubular de treliças que suporta o modelo físico do dispositivo de tubo distensível.

Tabela 4.3: Dimensões dos elementos da estrutura tubular de treliças.

Elementos	Número	Diâmetro (m)	Comprimento (m)
Pilares verticais	4	0,035	2,854
Braços horizontais	16	0,035	1,365
Elementos cruzados	12	0,020	1,108
Vigas de topo	4	0,035	1,639

4.1.3 Sistema de aquisição de dados

A monitorização do campo de ondas incidentes é feita neste caso por meio de 2 sondas resistivas de medição de nível, instaladas entre o gerador e o modelo. Uma outra sonda resistiva, instalada no interior da chaminé vertical do modelo, permite monitorar as oscilações da coluna de água dentro da chaminé. As sondas resistivas têm uma precisão de $\pm 1\text{ mm}$. Os sinais analógicos destas três sondas são tratados por um monitor da HR-Wallingford. Este aparelho é responsável pela alimentação, amplificação e remoção do *offset* do sinal analógico das sondas.

A pressão no interior da câmara pneumática é monitorada através de um transdutor de pressão diferencial PX409-005CGV da OMEGA, cuja gama de medição é $\pm 5\text{ PSI}$. O transdutor é alimentado com $\pm 10\text{ V DC}$ e a tensão de saída é $\pm 100\text{ mV}$, com uma constante de calibração de 20 mV/psi e uma precisão de $\pm 0,08\%$, indicadas pelo fabricante. O sinal analógico proveniente do transdutor de pressão é depois introduzido e amplificado num amplificador e condicionador de sinal Fylde-379-TA. Após amplificação, a constante de calibração do transdutor de pressão é 1 psi/V . Este sinal é visualizado em tempo real num osciloscópio TDS220 da Tektronix.

Os sinais analógicos provenientes das 4 sondas – três sondas de nível e uma de pressão – são convertidos em sinais digitais num módulo de aquisição de dados KUSB-3100S, de 12bits. A taxa de aquisição é de 200 amostras por segundo, ou seja 200 hz , e o desfasamento entre canais adjacentes é inferior a $1\ \mu\text{s}$. Finalmente, os sinais digitais foram capturados e processados num PC 64-bit Pentium Dual-Core CPU E5700 3 GHz , com o auxílio do software Testpoint V7. O pós-processamento de dados foi feito com o auxílio do software Matlab. A figura 4.3 mostra uma fotografia do sistema de aquisição de dados utilizado nesta experiência.



Figura 4.3: Sistema de aquisição de dados.

4.2 Excitação do modelo e impedância do sistema de extracção

O modelo físico anteriormente descrito foi sujeito à acção de três séries de ondas regulares incidentes com períodos T entre 1 s e 2 s e alturas de onda H entre 6 cm e 22 cm. Em média foram geradas uma sequência de 18 ondas diferentes por série, num total de 54 ondas. Para cada um destes ensaios foram testados sequencialmente 6 orifícios de diferentes diâmetros, mais o caso em que a chaminé está aberta à atmosfera. Ao todo foram estudadas 342 condições de teste, cada uma envolvendo uma onda com determinado período T e altura H , a par de um orifício de diâmetro d_0 .

4.2.1 Ondas geradas no tanque

Antes de proceder à realização dos ensaios propriamente ditos, procedeu-se à calibração experimental das sondas de nível. Esta operação foi sempre realizada uma vez no início da manhã e uma vez no início da tarde, antes de cada ensaio. É de referir que, aquando da finalização do tanque hidrodinâmico, o mapeamento das ondas geradas na ausência do modelo permitiu aferir da boa qualidade das ondas a par de um coeficiente de reflexão na praia inferior a 10%.

Com base numa análise de reflexão baseada na metodologia desenvolvida no Delft Hydraulics Institute por Boer (1981) foi possível caracterizar as propriedades das ondas geradas no tanque. A tabela 4.4 especifica as gamas de período T , número de onda k , altura de onda H , declive H/λ , razão h/λ , celeridade das ondas c , Número de Ursell Ur e potência transmitida P_i por unidade de frente de onda, correspondentes às três séries de ondas geradas. À escala real o campo de ondas gerado corresponde a períodos entre 7,4 s e 13,9 s e alturas de onda entre 3,03 m e 11,20 m, que se propagam em águas de 95 m de profundidade. Para este conjunto de ondas, cujo declive H/λ está representado na fig. 4.4 em função do período T , é importante distinguir entre ondas de pequena amplitude e ondas de amplitude finita. Estes aspectos têm uma importância decisiva na interpretação dos efeitos não lineares e de escala, como se verá em capítulos futuros. Cerca de metade das

ondas pertencentes à série 1 são ondas lineares. Nas séries 2 e 3 a quase totalidade das ondas têm amplitudes finitas.

Tabela 4.4: Campo de ondas incidentes gerado para o modelo à escala 1:50.

Série de ondas	T (s)	k	H (cm)	H/λ
1	1,05 - 1,96	1,09 - 3,62	6,06 - 16,69	0,012 - 0,090
2	1,05 - 1,95	1,10 - 3,62	8,03 - 22,00	0,015 - 0,115
3	1,14 - 1,96	1,08 - 3,11	9,94 - 22,44	0,019 - 0,105
Série de ondas	h/λ	c (m/s)	Ur	P_i (W/m)
1	0,329 - 1,094	1,650 - 2,960	0,059 - 0,392	9,25 - 32,10
2	0,332 - 1,096	1,645 - 2,945	0,073 - 0,589	16,19 - 51,64
3	0,326 - 0,942	1,775 - 2,966	0,115 - 0,776	24,98 - 68,60

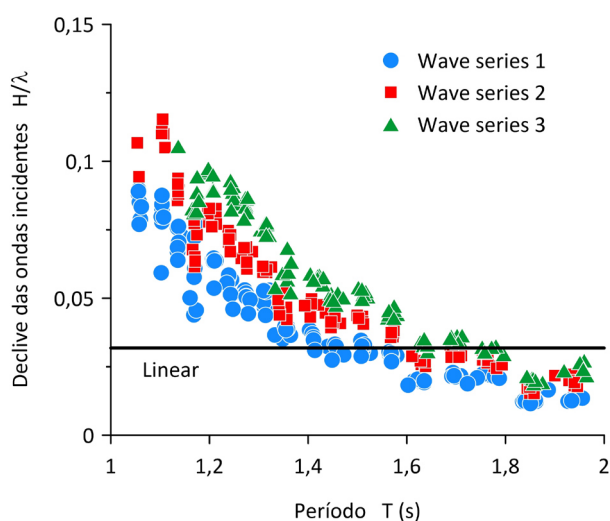


Figura 4.4: Declive H/λ das ondas incidentes geradas no tanque em função do período T .

As ondas podem ser classificadas como de águas pouco profundas se $h/\lambda < 0,05$, de águas intermédias se $0,05 < h/\lambda < 0,5$ e de águas profundas se $h/\lambda > 0,5$. A importância relativa da não-linearidade das ondas é contudo contabilizada pelos parâmetros adimensionais H/h e $(h/\lambda)^2$; H/h reflete os efeitos não-lineares e $(h/\lambda)^2$ reflete a magnitude dos efeitos dispersivos na onda. Apesar destes parâmetros serem independentes, a significância dos dois efeitos referidos só pode ser apreendida se a sua magnitude relativa

for da ordem de 1. Isto é conseguido através do número de Ursell $Ur = (H/h)(\lambda/h)^2$. É sabido que a teoria linear para ondas dispersivas é válida apenas para $Ur \ll 1$ e que a condição de $H/\lambda \ll 1$ não é suficiente para provar a sua validade. Para valores grandes do número de Ursell ($Ur \gg 1$) os efeitos não-lineares dominam o escoamento. Para $Ur = 1$, ambos os efeitos não-lineares e dispersivos são importantes. Podemos então observar que as ondas geradas são ondas de amplitude finita, propagando-se em águas profundas ou intermédias (dependendo do período).

4.2.2 Condições impostas no PTO

O sistema de extracção de potência do modelo pretende simular a extracção de potência através de uma turbina de ar. Para isso, tal como foi referido anteriormente, a câmara pneumática foi obturada com uma placa munida de um orifício circular de arestas vivas. O modelo foi sucessivamente testado para orifícios de diferentes diâmetros d_0 , entre 10 mm e 30 mm. Estes orifícios introduzem diferentes impedâncias no sistema que correspondem a outras tantas turbinas com diferentes características pressão-caudal. Foram impostas 6 impedâncias para a série de ondas 1, e 5 para as restantes séries de ondas 2 e 3.

A fig. 4.5 mostra o coeficiente de trabalho $\overline{\Delta p}/(2r\rho_1g)$ do PTO pneumático, baseado na média temporal da pressão na câmara, em função do caudal volúmico médio de ar turbinado \bar{Q} . Estão representadas as curvas de funcionamento relativas a 6 das impedâncias testadas. Para o orifício de maior diâmetro ($d_0 = 30$ mm) o caudal volúmico de ar médio atinge 11,46 L/s quando a pressão média na câmara pneumática é 0,509 kPa. Em contrapartida, o orifício de menor diâmetro ($d_0 = 10$ mm) atinge um caudal volúmico de apenas 2,46 L/s para uma pressão média de 1,813 kPa.

É possível observar que os orifícios de maior diâmetro resultam em caudais elevados mas pressões baixas; o oposto é verdade para os orifícios de menor diâmetro. A primeira situação é típica de turbinas axiais e a segunda condiz mais com turbinas radiais. Como será visto em §4.3.2 o melhor desempenho deste modelo do dispositivo foi obtido com o orifício de $d_0 = 15$ mm, cuja curva característica dá um compromisso aceitável entre a pressão na câmara e o caudal através do orifício.

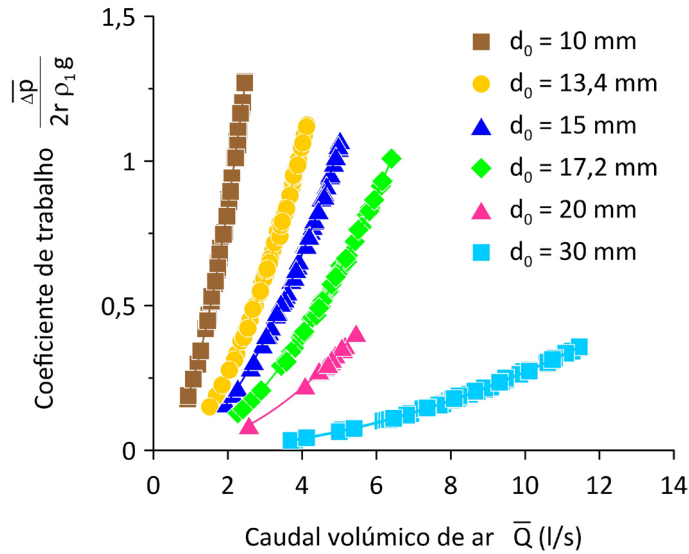


Figura 4.5: Coeficiente de trabalho $\overline{\Delta p}/(2r\rho_1g)$ em função do caudal volumétrico de ar médio através do orifício do PTO, para todas as impedâncias e séries de ondas testadas.

4.3 Resultados experimentais obtidos

A resposta do modelo à excitação imposta pelas ondas incidentes está intimamente relacionada com o período natural da OWC estimado através da eq. (3.2), que se verificou experimentalmente ser $T_0 = 1,7$ s. Igualmente importante é o período de sintonização das ondas de pressão no tubo, que de acordo com a eq. (3.1) é $T_1 = 1,44$ s.

4.3.1 Factor de amplificação do sistema

Um parâmetro relevante para avaliar a resposta do sistema à excitação das ondas incidentes é o factor de amplificação ζ . Este factor é definido como a razão entre a altura das oscilações da OWC 2η e a altura das ondas incidentes H . A fig. 4.6 mostra a variação de ζ em função do período das ondas incidentes T , para o modelo atacado pelas ondas da série 1. Excepto para o sistema não amortecido – chaminé aberta – o factor de amplificação do

o sistema é máximo quando o período das ondas incidentes coincide com o período natural da OWC ($T = T_0$). Este máximo está perto do período para o qual o comprimento das ondas incidentes é o dobro do comprimento do tubo ($\lambda = 2L$), situação para a qual $T = 1,78$ s. Para o sistema não amortecido a máxima amplificação acontece para $T = 1,6$ s, atingindo $\zeta = 5,5$. Este pico de ζ é sustentado pela ressonância do tubo até $T = T_1 = 1,44$ s. Para períodos abaixo deste valor é possível observar um máximo local de $\zeta = 2,4$, que ocorre para $d_0 = 30$ mm quando o comprimento das ondas incidentes é igual ao comprimento do tubo ($\lambda = L$). Para as restantes séries de ondas o factor de amplificação segue um padrão semelhante, mas não atinge valores tão altos.

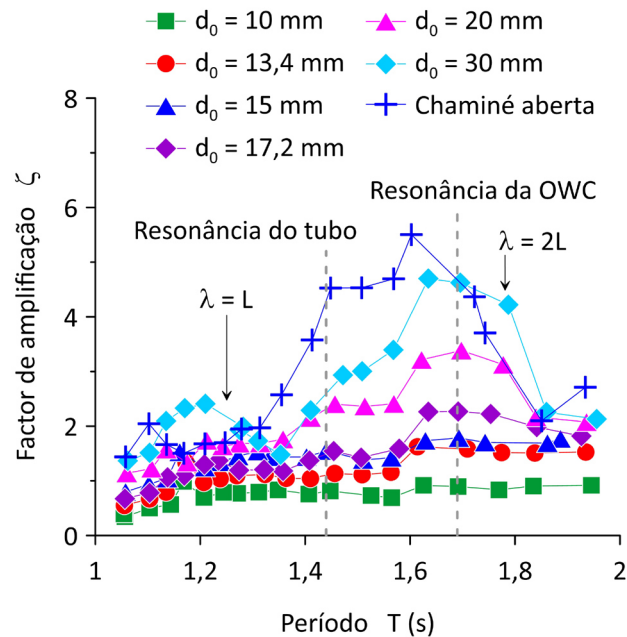


Figura 4.6: Factor de amplificação ζ em função do período das ondas incidentes, para todas as impedâncias do PTO testadas no modelo à escala 1:50, sujeito às ondas da série 1.

4.3.2 Potência extraída pelo PTO e comprimento de captura

Um dos objectivos da experiência é saber qual é a potência que pode ser extraída por um dispositivo de tubo flexível e o respectivo comprimento de captura. A fig. 4.7 mostra a potência média P extraída pelo modelo em função do período das ondas incidentes T , para todas as impedâncias testadas sob a acção das ondas da série 1. A potência apresentada neste gráfico foi obtida a partir das medições da pressão na câmara pneumática, utilizando a metodologia descrita em §3.3, que assume escoamento compressível através do PTO. Quando o comprimento das ondas incidentes é $\lambda = L$ a potência extraída é máxima,

atingindo $6,1 W$ para o orifício de diâmetro $d_0 = 15 mm$. Para ondas mais longas, por exemplo quando o período das ondas incidentes T é igual ao período natural das oscilações da coluna de água T_0 , é possível observar um máximo local da potência extraída. Este máximo é sustentado pelo modo de flexão do tubo, que ocorre quando $\lambda = 2L$. Embora de forma menos visível, a ressonância das ondas de pressão no tubo também contribui para aumentar a potência extraída, nomeadamente quando o período das ondas é $T = T_1 = 1,44 s$. Para as restantes séries de ondas a potência extraída aumenta para as séries de ondas mais energéticas, atingindo no máximo $P = 11,3 W$ para a série de ondas 3 quando $d_0 = 17,2 mm$, perto do período onde $\lambda = L$.

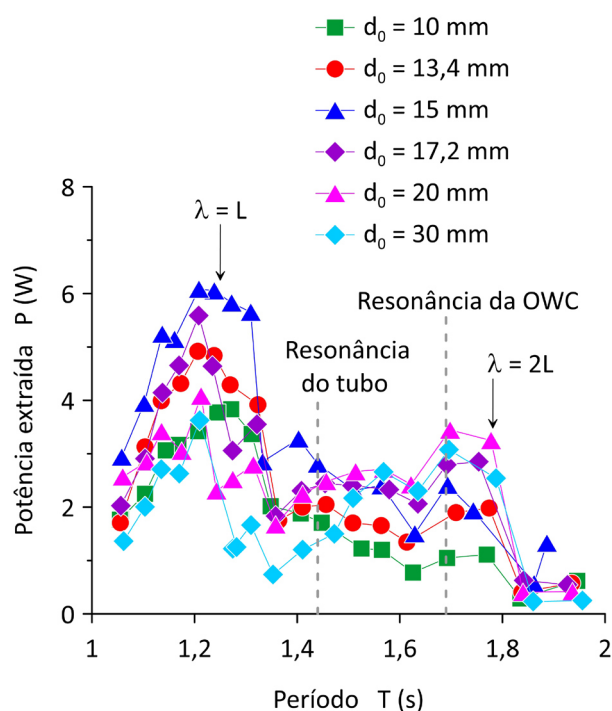


Figura 4.7: Potência média extraída pelo PTO P em função do período das ondas incidentes, para todas as impedâncias do PTO testadas no modelo à escala 1:50, sujeito às ondas da série 1.

No que toca ao desempenho do modelo, o comprimento de captura C_W definido pela eq. (3.5) é representado na fig. 4.8 em função do período das ondas incidentes T , também para todas as impedâncias do PTO testadas sob a acção das ondas da série 1. É possível observar neste gráfico que a impedância que dá o melhor comprimento de captura depende fortemente do período das ondas incidentes. O máximo $C_W = 2$ diâmetros do tubo foi obtido quando $d_0 = 15 mm$ e ocorreu para $T = 1,15 s$. Este máximo global coincide com o período em que $kb = 2\pi$, o que indica que este valor está possivelmente sobrestimado devido à presença de ondas estacionárias transversais entre as paredes do tanque. Se ignorarmos este valor máximo, o melhor C_W é agora 1,4 diâmetros e ocorre quando o comprimento das ondas incidentes é igual ao comprimento do tubo ($\lambda = L$). Isto demonstra a importância dos

modos de flexão do tubo que foram descritos em §3.2.1. Quando o período das ondas incidentes coincide com o período sintonização do tubo ($T = T_1$), é visível um pequeno pico de comprimento de captura $C_W = 0,8$ diâmetros, que ocorre também para o orifício de diâmetro $d_0 = 15 \text{ mm}$. Note-se que, apesar deste ser o pico mais pequeno de C_W , é também o período onde o comprimento de captura depende menos do diâmetro do orifício do PTO. Para os períodos mais longos é observado um máximo local de $C_W = 0,9$ diâmetros, que corresponde às condições de ressonância da coluna de água oscilante ($T = T_0$). De forma semelhante à potência extraída, este máximo local é sustentado pelo modo de flexão do tubo em $\lambda = 2L$, até $T = 1,78 \text{ s}$. Ao contrário do que acontecia para os períodos pequenos, nestes períodos maiores as menores impedâncias é que conduzem à melhor eficácia do sistema.

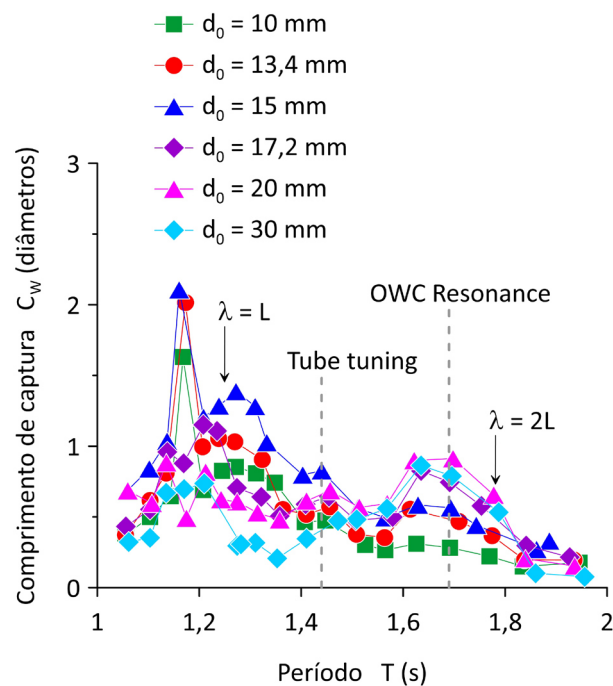


Figura 4.8: Comprimento de captura de energia C_W em função do período das ondas incidentes, para todas as impedâncias do PTO testadas no modelo à escala 1:50, sujeito às ondas da série 1.

4.3.3 Comparação entre os modelos incompressível e compressível

A reanálise dos ensaios realizados à escala 1:50 permitiu, em última instância, avaliar o impacto de desprezar a compressibilidade do ar sobre as previsões do comprimento de captura do dispositivo. Para um orifício com $d_0 = 30 \text{ mm}$ a fig. 4.9 (lado esquerdo) compara duas previsões da característica do PTO, a primeira assumindo que o

escoamento é incompressível e a segunda assumindo escoamento compressível. Neste último caso, em que o cálculo do caudal Q se baseia nas medições da pressão na câmara pneumática, a característica segue uma regressão quadrática com um coeficiente de correlação de 0,999. Quando se supõe que o escoamento é incompressível, o cálculo do caudal baseia-se antes nas medições do deslocamento da superfície livre da OWC e o coeficiente de correlação é 0,986. Excepto para pressões baixas – menores que aproximadamente $0,2 \text{ kPa}$ –, desprezar a compressibilidade do ar resulta numa estimativa por excesso do caudal volúmico médio \bar{Q} , de 5,43% em média e no máximo de 11,9%. Estes desvios no caudal \bar{Q} reflectem-se em desvios da mesma ordem do comprimento de captura C_W . A fig. 4.9 (lado direito) apresenta estes desvios percentuais do comprimento de captura ΔC_W , em função da pressão diferencial média na câmara pneumática. É de referir que os valores apresentados nesta figura dizem respeito ao PTO com um orifício de $d_0 = 30 \text{ mm}$, mas desta vez para as três séries de ondas testadas. Em síntese, para pressões acima de $0,2 \text{ kPa}$ ignorar a compressibilidade do ar resulta numa estimativa por excesso do C_W . Em contrapartida, abaixo desta pressão, ignorar compressibilidade tem como resultado uma estimativa por defeito do C_W . Para os restantes orifícios de menores diâmetros, a pressão na câmara pneumática é maior que a obtida nos ensaios com o furo de $d_0 = 30 \text{ mm}$. Verificou-se que nesses casos o C_W para escoamento incompressível é estimado por excesso na mesma ordem de grandeza, atingindo cerca de 30% quando a pressão na câmara é máxima, o que ocorre para o orifício de $d_0 = 10 \text{ mm}$.

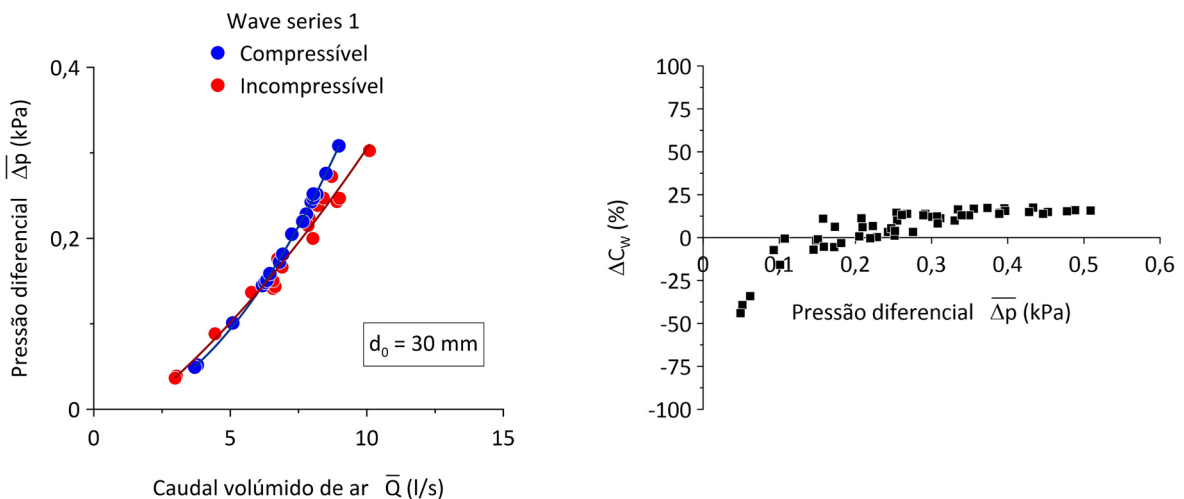


Figura 4.9: Características pressão-caudal (esquerda), obtidas assumindo escoamento incompressível (via deslocamento da OWC) e assumindo escoamento compressível (via pressão na câmara pneumática), para um orifício do PTO com $d_0 = 30 \text{ mm}$ sob a acção das ondas incidentes da série 1; variação percentual do comprimento de captura ΔC_W devida a ignorar a compressibilidade do ar (direita), em função da pressão diferencial na câmara pneumática, para todas as impedâncias testadas sob a acção das ondas incidentes da série 1.

4.4 Síntese das principais conclusões

Uma análise aprofundada dos resultados dos ensaios realizados com o modelo à escala 1:50 permite obter previsões mais rigorosas do desempenho do dispositivo de tubo distensível. Comparativamente às conclusões extraídas em Mendes et al. (2017) podemos dizer o seguinte. À escala deste modelo, o cálculo do caudal de ar através do PTO assumindo escoamento incompressível resulta numa maior incerteza nas previsões do comprimento de captura. Quando as pressões na câmara são elevadas, verificou-se que ignorar a compressibilidade do ar resulta numa estimativa por excesso da eficácia do dispositivo. Para pressões menores que este valor, as previsões obtidas assumindo escoamento incompressível resultam por defeito. Os parâmetros que governam a sintonização do sistema, conducentes a picos de potência média extraída no PTO, são o comprimento do tubo L , a ressonância da OWC T_0 e a ressonância do tubo T_1 . Ignorando a influência das paredes do tanque, a máxima potência extraída e C_W ocorrem quando o comprimento de onda é igual ao comprimento do tubo distensível, podendo atingir nesta situação $C_W = 1,4$ diâmetros do tubo. Para ondas de maior comprimento observa-se um patamar de desempenho em que C_W é aproximadamente 0,9 diâmetros de tubo. Este ocorre por volta do período natural da OWC e também do modo de flexão do tubo quando $\lambda = 2L$. Apesar da sintonização do tubo não dar origem a picos significativos nem de potência extraída, nem de eficácia, reduz significativamente a influência que a variação de impedância do PTO tem nestes parâmetros. É também possível observar que enquanto a potência extraída aumenta para as ondas mais energéticas, o comprimento de captura C_W é maior para a série de ondas menos energética em praticamente toda a gama de períodos testada. De acordo com as previsões do presente modelo, pode afirmar-se que o comprimento de captura do dispositivo é superior a 1 diâmetro do tubo numa gama de períodos de 1,13 s a 1,37 s. À escala real isto traduz-se em ondas de 8 s a 10 s, que são típicas do clima de ondas no Atlântico Norte.

Capítulo 5

Ensaio Experimental do Dispositivo à Escala 1:20

No seguimento dos ensaios realizados à escala 1:50, foi construído e testado no Laboratório um modelo do dispositivo atenuador de tubo distensível acoplado a uma OWC, à escala 1:20. O objectivo dos ensaios realizados com este modelo é obter a informação necessária para projectar um protótipo adequado ao clima de ondas nos Açores. Estes ensaios permitem reduzir consideravelmente os efeitos de escala, já detectados anteriormente nos ensaios realizados à escala 1:50, e deste modo conseguir obter previsões da potência extraída e do desempenho mais próximas da realidade.

5.1 Modelo físico e condições impostas

5.1.1 OWC e tubo distensível

O modelo à escala 1:20 utiliza um tubo de borracha ligeiramente mais curto que o anterior, com cerca de $L = 2,15 \text{ m}$ de comprimento, mas com um diâmetro $d = 30 \text{ cm}$ antes da pressurização e uma espessura de parede $w = 2 \text{ mm}$. O tubo está ligado neste caso a um sistema OWC de maiores dimensões, através de um cotovelo em PVC com $0,289 \text{ m}$ de

diâmetro (fig. 5.1). A profundidade de imersão da boca da OWC é $a = 8,5 \text{ cm}$. Também neste caso o tubo é fechado por um nariz de madeira que flutua livremente alinhado com a direcção das ondas incidentes. A chaminé vertical tem um diâmetro $2r = 0,289 \text{ cm}$ e, na parte superior, compreende uma câmara pneumática com $h_1 = 1,419 \text{ m}$. A câmara comunica com a atmosfera através de uma placa com orifício. Foram testados PTOs com diferentes diâmetros de orifício $d_0 = 20 - 60 \text{ mm}$. A altura de água na chaminé é $h_0 = 0,296 \text{ m}$, em relação à superfície livre exterior em repouso. Esta altura de coluna de água garante uma pressão de $2,9 \text{ kPa}$ no interior do tubo, o que determina um diâmetro de tubo pressurizado $d = 0,348 \text{ m}$. O comprimento total da coluna de água, medido desde a boca da OWC até superfície livre no interior da chaminé é $l = 0,76 \text{ m}$. O conjunto do tubo e sistema OWC/PTO são apoiados na mesma plataforma tubular assente no fundo que já foi anteriormente descrita em §4.1.2. As tabelas 5.1 e 5.2 reúnem todas as dimensões do modelo físico.

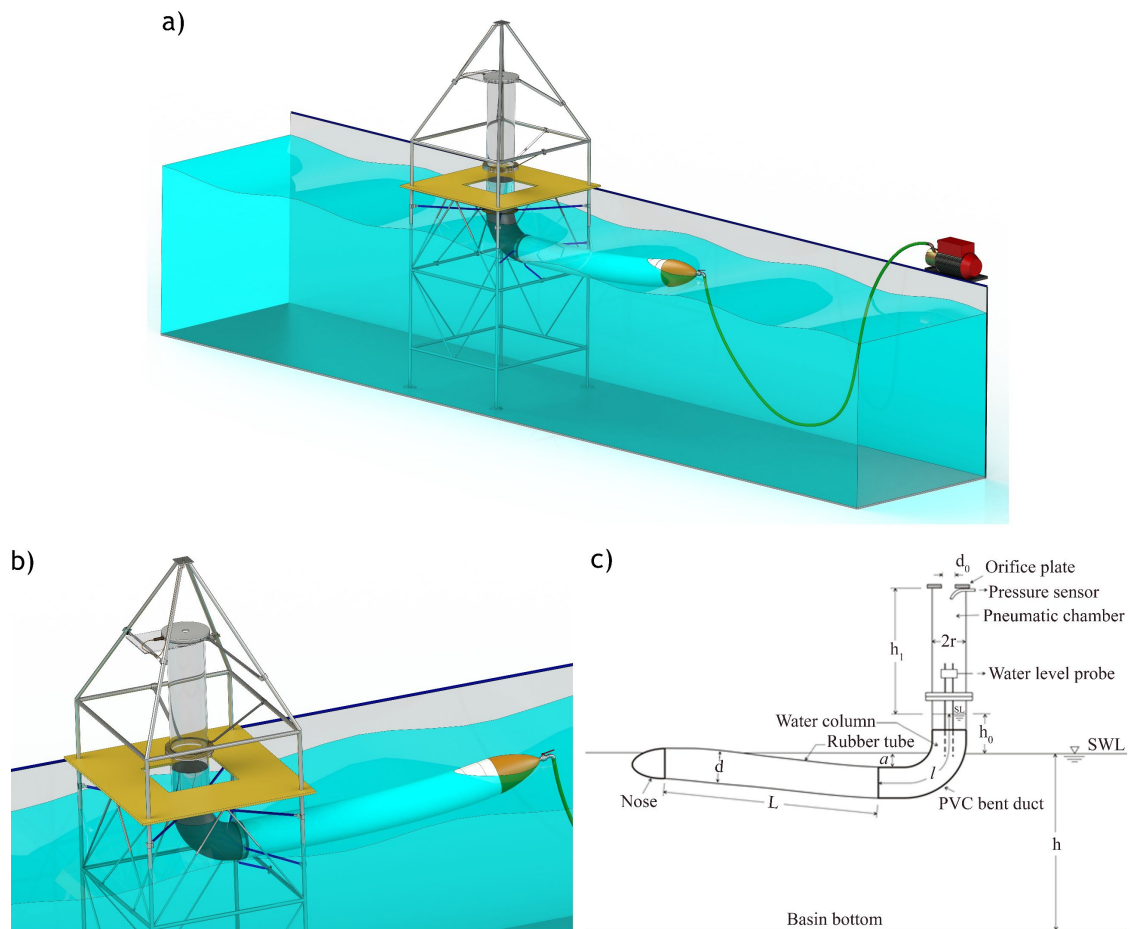


Figura 5.1: Modelo do dispositivo atenuador de tubo distensível. a) vista geral; b) pormenor da OWC e PTO; c) diagrama e dimensões.

Tabela 5.1: Dimensões do tubo distensível.

Comprimento L (m)	Diâmetro d (m)	Parede w (mm)	Pressão h_0 (m. c. a.)
2,15	0,348	2	0,296

Tabela 5.2: Dimensões sistema OWC / PTO.

Diâmetro $2r$ (m)	Comprimento da OWC l (m)	Altura da câmara pneumática h_1 (m)	Diâmetro do orifício d_0 (mm)
0,289	0,76	1,419	20–60

5.1.2 Ondas geradas no tanque e análise de reflexão

O modelo físico à escala 1:20 foi montado e ensaiado no tanque hidrodinâmico do Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Turbomáquinas da UBI, cujas características estão reunidas em §4.1.2. Durante os ensaios a profundidade da água no tanque foi fixada em $h = 1,9$ m. Esta profundidade corresponde a 38 m à escala real. Nesta campanha de ensaios foi aperfeiçoado o método de análise de reflexão das ondas, que utiliza neste caso três sondas de nível entre o gerador e o modelo. As três sondas foram posicionadas ao longo do eixo longitudinal do tanque de ondas, sendo que a distância entre a primeira e terceira sonda é $x_{13} = 1,22$ m e $x_{12} = 0,27$ m entre a primeira e segunda. Esta configuração permite aplicar o método dos mínimos quadrados para extrair a amplitude onda incidente que é descrito em Mansard e Funke (1980). A descrição deste método é dada no Anexo B. A utilização de 3 sondas em vez de um método com duas sondas, como por exemplo o de Boer (1981) anteriormente empregue no modelo à escala 1:50, tem as seguintes vantagens: a) fornece melhores resultados numa banda de frequências mais alargada; b) tolera melhor os desvios em relação à teoria linear; c) é consideravelmente menos sensível ao espaçamento crítico entre as sondas. A comparação entre os resultados obtidos pelos dois métodos atesta a validade das medições do campo de ondas realizadas. Ocasionalmente foram posicionadas duas sondas transversais junto ao modelo, de modo a monitorar o aparecimento de modos transversais estacionários entre as paredes no tanque.

Como já foi referido, durante os ensaios experimentais a profundidade da água h foi mantida igual a 1,9 m. Isto corresponde a 38 m de profundidade à escala real e representa o

funcionamento do dispositivo em águas intermédias. Efectivamente, profundidades entre 20 m e 50 m podem ser encontradas a uma distância de 380 a 900 m da costa Este da ilha do Corvo e de 680 a 1300 m da costa Oeste. Como foi discutido em §1.1.3, nesta zona o clima de ondas é caracterizado por períodos entre 5 s a 8 s e alturas de onda entre 1 m a 5 m. Convertidas para a escala do modelo estas condições são: períodos $T = 1,12 - 1,79$ s e alturas $H = 0,05 - 0,25$ m. No laboratório foram então geradas duas séries de ondas com períodos entre 1,06 s e 1,98 s e alturas entre 0,068 m e 0,246 m. A tabela 5.3 mostra as principais características do campo de ondas gerado. A primeira série de ondas compreende 24 condições ($H - T$) geradas no tanque. A segunda série reproduz 37 condições.

Tabela 5.3: Campo de ondas incidentes gerado para o modelo à escala 1:20.

Série de ondas	T (s)	k	H (cm)	H/λ
1	1,06 – 1,96	1,08 – 3,61	6,8 – 23,4	0,01 – 0,12
2	1,06 – 1,98	1,06 – 3,59	7,2 – 24,6	0,01 – 0,13
Série de ondas	h/λ	c (m/s)	Ur	P_i (W/m)
1	0,33 – 1,09	1,65 – 2,96	0,06 – 0,42	9,01 – 58,40
2	0,32 – 1,09	1,65 – 2,98	0,07 – 0,47	11,25 – 64,22

5.1.3 Características do PTO

Como já foi referido anteriormente, a extracção de potência é feita por meio de uma placa com orifício de arestas vivas e diâmetro d_0 , através do qual é exalado ou inalado o caudal de ar Q . A fig. 5.2 mostra o topo da câmara pneumática que emerge da plataforma que suporta o modelo. Foram testadas de forma sequencial 8 placas, com orifícios de diferentes diâmetros d_0 entre 20 mm e 60 mm, bem assim como o caso em que a câmara pneumática comunica directamente com a atmosfera. Estas 9 impedâncias aplicadas no PTO, multiplicadas pelo número de condições nas duas séries de ondas geradas dão 549 condições de teste diferentes.

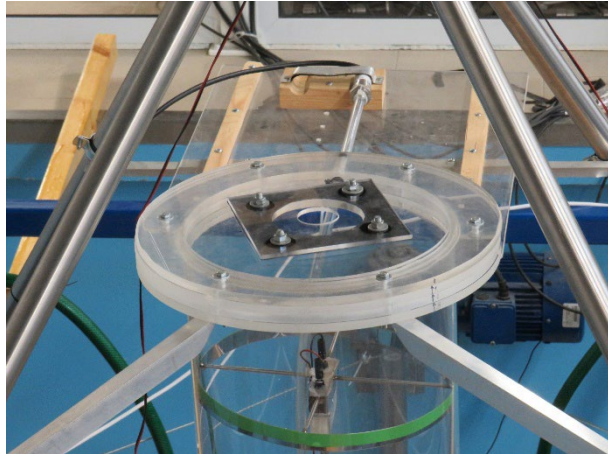


Figura 5.2: Topo da câmara pneumática e placa com o orifício do PTO.

Uma vez mais o escoamento de ar através do PTO é assumido como sendo compressível e o cálculo do caudal volúmico é baseado na metodologia descrita em §3.3. A fig. 5.3 mostra uma série temporal de 5 segundos do deslocamento da superfície livre da coluna de água $z(t)$, da pressão na câmara pneumática $p(t)$ e do factor de expansibilidade ε . Para este exemplo é considerado o caso em que o sistema está equipado com um orifício de diâmetro $d_0 = 30 \text{ mm}$, sujeito às ondas da série 1 de período $T = 1,17 \text{ s}$. Quando o deslocamento da OWC atinge o seu ponto máximo ou mínimo, o caudal é zero e o coeficiente de expansibilidade ε é igual a 1. Por outro lado, quanto maior é o diferencial de pressão menor é o ε e maior será a redução do caudal. Esta redução atinge no máximo 0,5% quando $\varepsilon = 0,995$.

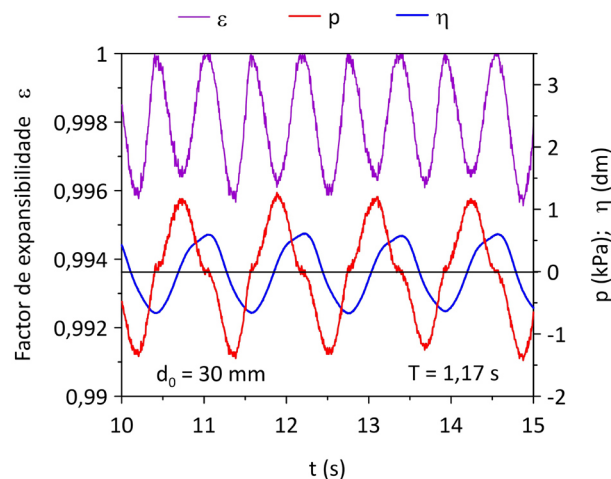


Figura 5.3: Registo de 5 s das séries temporais do deslocamento da OWC z , pressão relativa na câmara pneumática p e do factor de expansibilidade ε , para o sistema com um orifício de diâmetro $d_0 = 30 \text{ mm}$, sujeito a ondas da série 1 com $T = 1,17 \text{ s}$.

Para determinar o caudal de ar através do PTO, para além do factor de expansibilidade é necessário extrair o coeficiente de descarga para cada orifício testado. Para o mesmo caso da figura anterior – quando o sistema PTO está equipado com um orifício de diâmetro $d_0 = 30 \text{ mm}$ e sujeito às ondas de período $T = 1,17 \text{ s}$ da série 1 –, a fig. 5.4 ilustra agora os valores do coeficiente de descarga C_d calculados em §3.3. Nestas condições o número de Reynolds médio do escoamento de ar através do orifício é $3,74 \times 10^4$. O C_d calculado iterativamente é neste caso inferior ao valor fixo que é usualmente assumido de 0,6. A diferença não é desprezável, situando-se entre 0,3% e 0,7%. Para além disso verificou-se que o efeito combinado do factor de expansibilidade ε e do C_d resulta num aumento desta diferença percentual. Como seria de esperar, os valores instantâneos de ε e C_d representados reflectem bem a assimetria entre a inalação e exalação de ar através do orifício PTO.

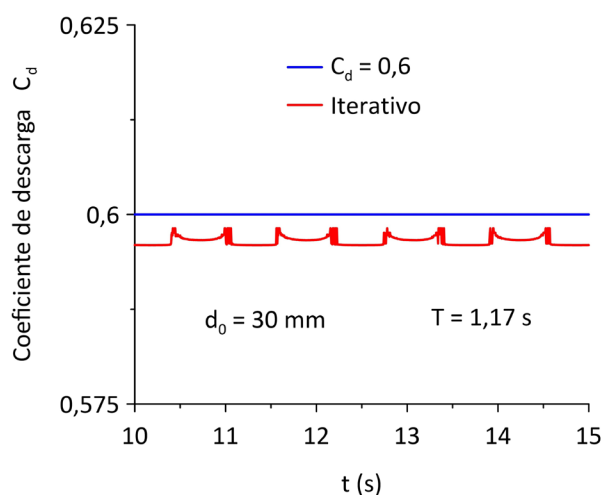


Figura 5.4: Comparação entre o coeficiente de descarga fixo $C_d = 0,6$ e calculado iterativamente segundo Miller (1996), para o sistema com um orifício com $d_0 = 30 \text{ mm}$, sujeito a ondas da série 1 com $T = 1,17 \text{ s}$.

A fig. 5.5 representa a característica pressão-caudal de todos os orifícios do PTO testados. É bem visível a assimetria entre os processos de inalação ($p < 0$) e exalação ($p > 0$) da câmara pneumática, uma característica sobejamente comentada na literatura. Como em §4.3.2, os orifícios de maior diâmetro (menor impedância) resultam em pressões baixas e caudais altos. Contrariamente, orifícios de pequeno diâmetro (maior impedância) resultam em pressões altas e caudais baixos. Para a menor impedância ($d_0 = 60 \text{ mm}$), o caudal volúmico varia entre $-68,21 \text{ L/s}$ e $+69,70 \text{ L/s}$ e a pressão na câmara está entre $-0,87 \text{ kPa}$ e $+0,94 \text{ kPa}$. Para a maior impedância ($d_0 = 20 \text{ mm}$), o caudal volúmico varia entre $-14,9 \text{ L/s}$ e $+14,08 \text{ L/s}$ e a pressão na câmara está entre $-3,26 \text{ kPa}$ e $+3,20 \text{ kPa}$. O orifício de $d_0 = 37,4 \text{ mm}$ garante um bom compromisso entre pressão e caudal. Será verificado mais adiante que este é o orifício que resulta na maior largura de banda de alto

desempenho. No entanto, esta impedância do PTO não é aquela que garante o desempenho máximo global.

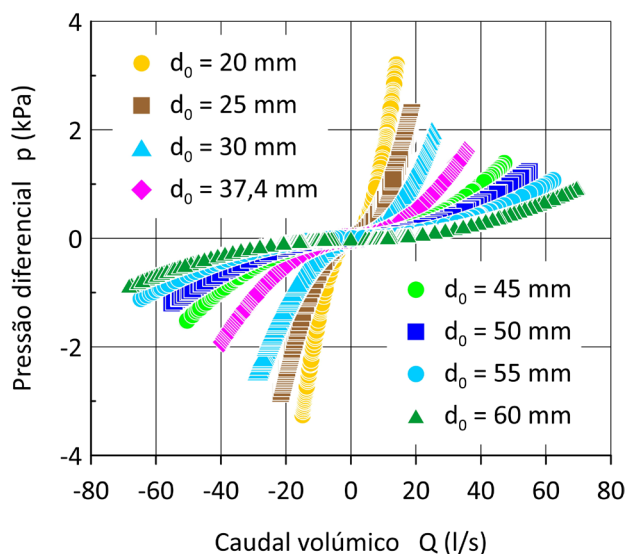


Figura 5.5: Característica pressão-caudal dos vários orifícios do PTO testados com o modelo à escala 1:20.

5.2 Análise de desempenho do sistema

O comportamento do sistema está intimamente ligado à ressonância da OWC, cujo período é neste caso $T_0 = 1,75$ s, e ao período de sintonização do tubo $T_1 = 1,44$ s. Igualmente importante é a relação entre o comprimento das ondas e o comprimento do tubo. Quando $\lambda = L$ o período das ondas é $T = 1,17$ s e quando $\lambda = 2L$ o período é $T = 1,7$ s. Seguidamente será feita uma análise do desempenho do dispositivo quando este é excitado pelas ondas das séries 1 e 2 (tab. 5.3), sob as condições impostas pelo PTO representadas na fig. 5.5.

5.2.1 Factor de amplificação e energia armazenada

Na fig. 5.6 está representado o factor de amplificação ζ em função do período T das ondas incidentes da série 1. Como já era esperado, a máxima amplificação ocorre perto do período natural da OWC. Para o sistema não-amortecido a altura da oscilação da OWC

atinge neste período 7,7 vezes a altura da onda incidente. As ondas mais altas da série 2 dão origem a uma amplificação menor, atingindo um máximo de 5,5 para o sistema não amortecido, também junto ao período de ressonância T_0 . É possível observar que este máximo global é deslocado para períodos maiores, à medida que a impedância do PTO aumenta. Quando o PTO está equipado com um orifício de $d_0 = 60 \text{ mm}$ o máximo ζ ocorre agora quando $T = 1,8 \text{ s}$, sendo 5,4 para a série de ondas 1 e 4 para a série de ondas 2. Observa-se ainda que o sistema é mais sensível a variações da impedância do PTO quando a amplitude das oscilações na chaminé vertical é maior, junto à ressonância da OWC, relativamente a quando $\lambda = L$ ou $T = T_1$.

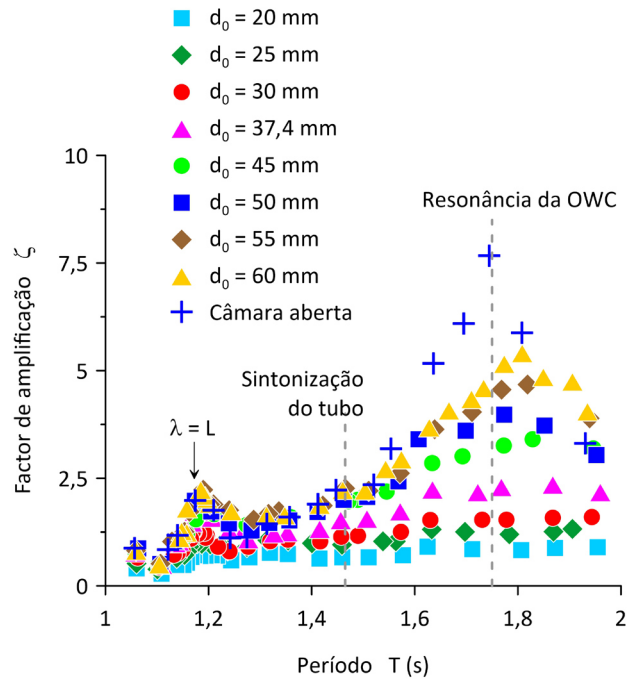


Figura 5.6: Factor de amplificação ζ em função do período das ondas incidentes T , para as ondas da série 1 e todas as impedâncias do PTO testadas.

Outro parâmetro que permite avaliar a resposta do sistema às ondas incidentes é a fracção da energia contida numa onda incidente de largura b que é armazenada nas oscilações da OWC E_S/E_i :

$$\frac{E_S}{E_i} = \frac{\rho_1 g \eta^2 \pi r^2 / 4}{\rho_1 g b \lambda H^2 / 8} = \frac{1}{4} k b \left(\frac{r}{b} \right)^2 \zeta^2 \quad (5.1)$$

Como se vê nesta equação a fracção energia incidente que é armazenada na coluna de água oscilante depende muito da constrição imposta pelo tanque $(r/b)^2$. A fig. 5.7 mostra E_S/E_i em função do período das ondas incidentes, para todos os orifícios testados sob a acção das ondas incidentes da série 2. À semelhança do factor de amplificação, quanto maior for a impedância imposta no PTO, menor é amplitude de oscilação da OWC e portanto a fracção de energia armazenada é também menor. Para as ondas da série 2 pode observar-se que a energia armazenada é máxima em períodos ligeiramente superiores a T_0 , i.e. para $T = 1,79$ s, atingindo 15% da energia das ondas incidentes. Para as ondas menos energéticas da série 1, o sistema pode armazenar até 23% da energia incidente quando $T = T_0$, dependendo da impedância do PTO imposta. Surpreendentemente, não se observa nenhum pico de ζ e de E_S/E_i junto período de sintonização do tubo T_1 .

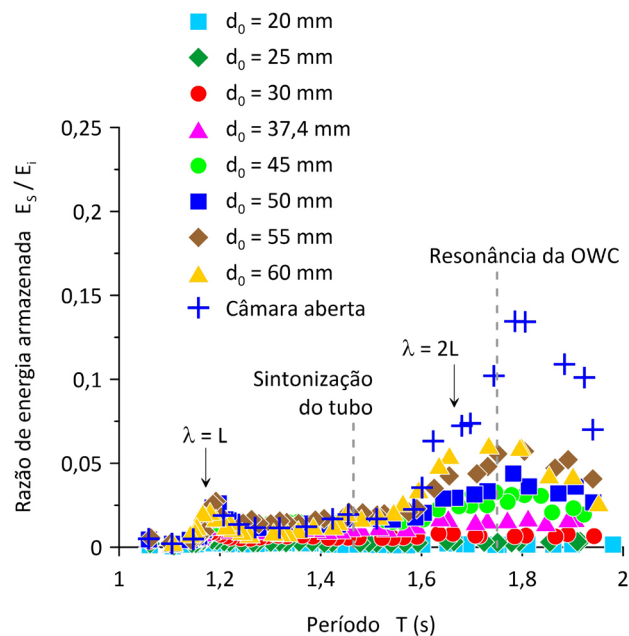


Figura 5.7: Razão de energia armazenada na OWC E_S/E_i em função do período das ondas incidentes T , para as ondas da série 2 (direita).

Relacionando agora o comprimento do tubo com o comprimento de onda, observa-se um máximo local do factor de amplificação ζ (fig. 5.6) e da energia armazenada E_S/E_i (fig. 5.7) quando o comprimento de onda é igual ao comprimento do tubo ($\lambda = L$). Quando o comprimento de onda é igual a duas vezes o comprimento do tubo ($\lambda = 2L$) também é possível observar um aumento de ζ e de E_S/E_i , a par de um alargamento da banda de períodos de elevada amplificação. Isto revela a importância da escolha do comprimento do tubo para melhorar a resposta do sistema.

5.2.2 Potência extraída e comprimento de captura

A importância de todos os parâmetros discutidos anteriormente sobre o desempenho do dispositivo é seguidamente analisada. Na fig. 5.8 estão representados os valores instantâneos da pressão medida na câmara pneumática $p(t)$, caudal volúmico de ar para escoamento compressível $Q(t)$ e potência extraída no PTO $P(t) = |p(t)| \times |Q(t)|$. Igualmente representada está a potência média extraída ao longo de um período de oscilação da coluna de água P . Os valores apresentados dizem respeito ao sistema equipado com um orifício de diâmetro $d_0 = 30 \text{ mm}$, excitado pelas ondas da série 1 com período $T = 1,17 \text{ s}$. Como se verá mais adiante este é o período em que $\lambda = L$, o que corresponde ao C_W máximo do dispositivo. Regra geral, para cada período a potência extraída é menor na exalação.

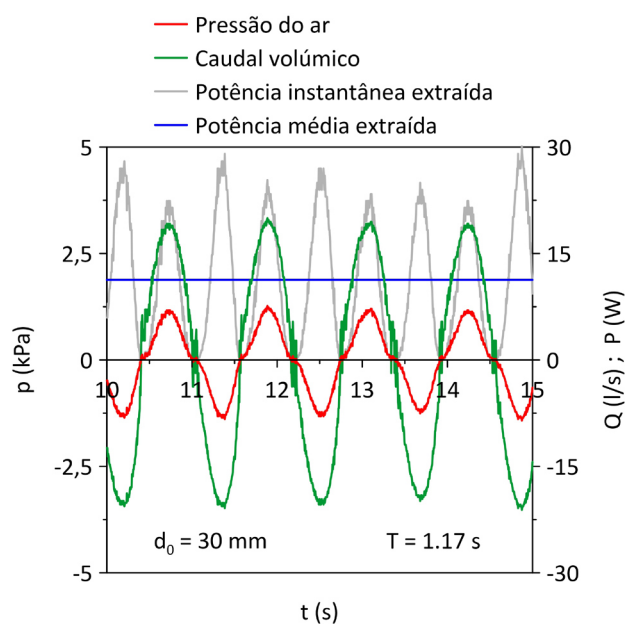


Figura 5.8: Registo de 5 s das séries temporais da pressão relativa na câmara pneumática $p(t)$, caudal de ar através do orifício $Q(t)$, potência instantânea $P(t)$ e potência média extraída no PTO P , para o sistema com um orifício de diâmetro $d_0 = 30 \text{ mm}$, sujeito a ondas da série 1 com $T = 1,17 \text{ s}$.

O desempenho do dispositivo pode uma vez mais ser estimado através do seu comprimento de captura C_W , que é dado pela eq. (3.5) em diâmetros do tubo. A fig. 5.9 mostra C_W em função do período das ondas incidentes T , para todos os orifícios testados sob a acção da série de ondas 1.

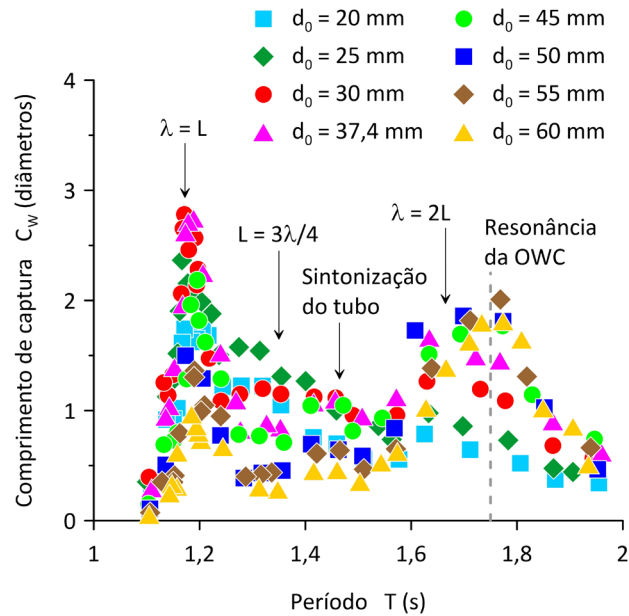


Figura 5.9: Comprimento de captura de energia C_W em função do período das ondas incidentes T da série 1.

Nestas condições C_W atinge cerca de 2 diâmetros do tubo junto ao período natural da OWC ($T = T_0 = 1,75$ s), para um orifício de diâmetro $d_0 = 55$ mm. Neste caso o tubo desenvolve um segundo modo de flexão, com o dobro do período, acoplado a movimentos de alongamento e retracção intensos. Tal como já se antevia através da tendência do factor de amplificação ζ o comprimento de captura correspondente às ondas da série 2 é em geral inferior, atingindo $C_W = 1,9$ diâmetros para $T = T_0$. Perto deste período, quando $T = 1,7$ s, o comprimento de onda é igual a duas vezes o comprimento do tubo ($\lambda = 2L$) e ao mesmo tempo desenvolve-se um segundo modo de flexão. A proximidade entre a ressonância da OWC e $\lambda = 2L$ dá origem a um largo patamar onde $C_W > 1$, entre $T = 1,6$ s e $T = 1,9$ s. Junto ao período de sintonização do tubo $T_1 = 1,44$ s a intensidade das ondas de pressão no tubo aumenta, passando este a oscilar no terceiro modo de flexão. No entanto não se observa qualquer máximo local de C_W nesta região. Apesar disso, esta é a única zona em que o sistema tem maior comprimento de captura para as ondas mais energéticas da série 2. O máximo global de C_W ocorre para um orifício de diâmetro $d_0 = 30$ mm, quando $T = 1,17$ s, atingindo 2,78 e 2,36 diâmetros do tubo para as séries de ondas 1 e 2 respectivamente. Neste período o comprimento das ondas incidentes é igual ao comprimento do tubo e os três graus de liberdade do sistema parecem estar acoplados, o que dá origem ao máximo comprimento de captura de energia do dispositivo. É importante referir que este máximo global pode estar estimado por excesso, devido à presença de ondas estacionárias transversais no tanque quando $kb = 2\pi$. A presença destas ondas estacionárias transversais, de parede a parede do tanque, é um fenómeno bem conhecido e que foi observado neste período durante as experiências. Se considerarmos os resultados obtidos à escala 1:50, é provável que o valor

real de C_W neste período se aproxime de 2 diâmetros da OWC. Para ondas de período inferior a este os modos de pulsação e de flexão do tubo não são significativos, mas pôde observar-se difracção das ondas em redor do tubo e rebentação ao longo do seu dorso. Isto resulta numa redução abrupta do comprimento de captura de energia.

5.2.3 Comparação entre os modelos incompressível e compressível

Durante os ensaios realizados à escala 1:50, que são reportados no capítulo anterior, verificou-se que o facto de se desprezar a compressibilidade do ar conduz à obtenção de resultados sobre-estimados ou sub-estimados, dependendo da pressão na câmara pneumática. É legítimo procurar saber se esta tendência se verifica no presente modelo à escala 1:20. A fig. 5.10 mostra a variação percentual entre o comprimento de captura estimado, assumindo escoamento compressível e assumindo escoamento incompressível, em função da pressão na câmara pneumática. Neste gráfico estão representados os resultados para os casos extremos em que $d_0 = 20 \text{ mm}$ e $d_0 = 60 \text{ mm}$. À semelhança do que foi observado no modelo à escala 1:50, ignorar a compressibilidade resulta numa estimativa do C_W por defeito, para pressões baixas. Para pressões altas o C_W obtido assumindo escoamento incompressível é estimado por excesso, podendo chegar a ser 25% maior que o real. No entanto, a pressão na câmara para a qual esta mudança de comportamento ocorre é menor para o modelo de maior escala (0,1 kPa).

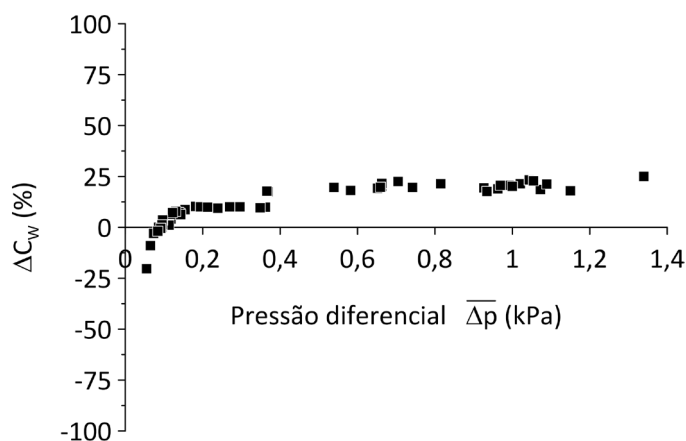


Figura 5.10: Variação percentual do comprimento de captura ΔC_W devida a ignorar a compressibilidade do ar em função da pressão diferencial média na câmara pneumática, para os orifícios de diâmetro $d_0 = 20 \text{ mm}$ e $d_0 = 60 \text{ mm}$, sob a acção das ondas incidentes da série 1.

5.3 Síntese das principais conclusões

Complementarmente às conclusões extraídas dos ensaios à escala 1:50 referidos no capítulo anterior, os ensaios realizados à escala 1:20 permitem avançar mais conclusões sobre o funcionamento do dispositivo. Foi confirmado que, para pressões baixas na câmara pneumática, ignorar a compressibilidade do ar resulta numa sub-valorização do comprimento de captura do dispositivo. Para pressões altas o oposto é verdade. O C_W máximo do dispositivo ocorre quando o comprimento de onda coincide com o comprimento do tubo, muito embora o factor de amplificação do sistema ζ seja máximo quando a coluna de água oscilante está em ressonância. Esta é uma das virtualidades introduzidas pela adição do tubo ao sistema OWC. No entanto, se a influência das paredes laterais do tanque for ignorada, é de esperar que os picos de C_W atingidos quando $\lambda = L$ e quando o sistema oscila em T_0 sejam comparáveis ($C_W = 2$ diâmetros do tubo). Um sistema multi-resonante traz efectivamente grandes vantagens neste contexto. No nosso sistema, verificou-se que para impedâncias do PTO elevadas o sistema tem alto desempenho, quando opera com ondas de pequenos períodos, enquanto para impedâncias do PTO baixas o sistema tem alto desempenho para períodos grandes. Consequentemente o comprimento de captura de energia C_W pode ser superior a 1 diâmetro do tubo para uma gama alargada de períodos de onda incidente, se for aplicado um controlo adequado ao sistema. Uma outra constatação é que quando o dispositivo opera com as ondas da série 1, que são mais lineares que as ondas da série 2, o sistema tem em geral melhor C_W , excepto na ressonância do tubo. Isto sugere que deva existir um comprimento mínimo do tubo necessário para que as ondas de pressão se desenvolvam completamente, antes de atingirem a entrada da OWC. Finalmente, o C_W obtido com o modelo à escala 1:20 é em geral mais elevado do que o C_W do modelo à escala 1:50. Visto que a razão entre o diâmetro do tubo e a largura do tanque é muito superior no modelo à escala 1:20, isto sugere que pode haver vantagem em que o protótipo do dispositivo funcione inserido num canal. Em alternativa o sistema pode ser inserido numa fileira de dispositivos semelhantes, paralelamente dispostos a uma distância b uns dos outros. Todas estas constatações estão na origem dos ensaios realizados com o presente modelo inserido num canal de focagem, que serão apresentados no capítulo seguinte.

Capítulo 6

Comparação e Validação dos Resultados Experimentais Obtidos

Para validar as previsões de comprimento de captura anteriormente obtidas para o dispositivo atenuador de tubo distensível, à escala 1:20, são neste capítulo apresentadas comparações com resultados experimentais e previsões teóricas de referência, publicadas por diferentes autores. São considerados resultados de referência para dispositivos com tubo distensível e OWCs convencionais. Adicionalmente, por forma a melhor compreender as vantagens de acoplar um tubo a um sistema OWC, o C_W do dispositivo é comparado com o obtido com a mesma OWC sem o tubo de borracha instalado, sujeita às mesmas condições de excitação. Estes resultados obtidos sem o tubo distensível instalado são também validados com resultados teóricos e experimentais de referência. O impacto do declive das ondas incidentes H/λ no factor de amplificação é discutido, tendo em vista a não-linearidade da resposta do sistema com tubo distensível. Por fim, comparações com resultados obtidos anteriormente por Mendes et al. (2017), à escala 1:50, permitem esclarecer alguns dos efeitos não-lineares e descobrir efeitos de escala nas presentes previsões de desempenho do dispositivo.

6.1 Comparação com resultados padrão existentes na literatura

6.1.1 Validação através de resultados experimentais para um tubo à escala 1:25

Para comparar dois modelos físicos de um dispositivo a diferentes escalas há que garantir, em primeiro lugar, que existe semelhança dinâmica entre os modelos. Chaplin et al. (2012) ensaiaram um tubo distensível à escala 1:25, ligado a um PTO pneumático de característica linear. Este modelo é essencialmente semelhante ao dispositivo ensaiado à escala 1:20 no presente trabalho. As principais diferenças residem no facto de o nosso PTO exibir uma característica não linear e de o tubo possuir três graus de liberdade no presente modelo. O modelo à escala 1:25 é excitado por ondas lineares, enquanto o modelo à escala 1:20 foi sujeito à acção de ondas lineares e ondas de amplitude finita. No essencial há que garantir que ambos os modelos são comparados em condições de impedância normalizada compatíveis.

A impedância normalizada Z do dispositivo de tubo distensível conectado a um sistema OWC é definida como o quociente entre a impedância média do PTO $\overline{Z_{PTO}}$ e a impedância introduzida pelo tubo distensível Z_{tube} . Assumindo que a característica do orifício do PTO de área A_0 é $Q = C_0 A_0 \sqrt{\Delta p / \rho^*}$, onde C_0 é um coeficiente de impedância adimensional. A impedância do PTO é $Z_{PTO} = \rho^* Q / (C_0 A_0)^2$ e representa a pressão diferencial na câmara pneumática dividida pelo caudal. Supondo agora que a sua variação no tempo é sinusoidal, a impedância média do PTO $\overline{Z_{PTO}}$ [$kPa m^{-3} s$] é:

$$\overline{Z_{PTO}} = \frac{2\rho^* q}{\pi A_0^2 C_0^2} \quad (6.1)$$

Nesta equação q é o caudal volúmico máximo num período T e ρ^* é a massa volúmica do ar a montante do orifício. O coeficiente de impedância C_0 pode ser determinado a partir da característica do orifício, utilizando a pressão diferencial na câmara pneumática Δp e o caudal volúmico Q :

$$C_0 = \frac{Q}{A_0 \sqrt{\Delta p / \rho^*}} \quad (6.2)$$

Como foram consideradas todas as componentes em frequência das séries temporais de Q e p medido, C_0 não é constante em cada período e é portanto necessário tomar o seu valor médio.

A impedância do tubo distensível Z_{tube} é, por seu lado:

$$Z_{tube} = \frac{\rho_1 U}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)} \quad (6.3)$$

onde ρ_1 é a massa volúmica da água, $U = 1/\sqrt{D \rho_1}$ é a velocidade de propagação dos pulsos de pressão no tubo na ausência de histerese e D é a distensibilidade do tubo.

Uma vez definida a impedância adimensional do sistema, podemos agora comparar os resultados do presente sistema com as previsões obtidas por Chaplin et al. (2012), em condições de funcionamento compatíveis. Na fig. 6.1 estão representadas quatro impedâncias normalizadas Z do presente modelo físico à escala 1:20, cujo $Z_{tube} = 24,044 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$. Estas impedâncias normalizadas variam com o caudal de forma linear. Estão igualmente representadas neste gráfico duas das impedâncias do modelo à escala 1:25, que são constantes ao longo do ciclo de funcionamento.

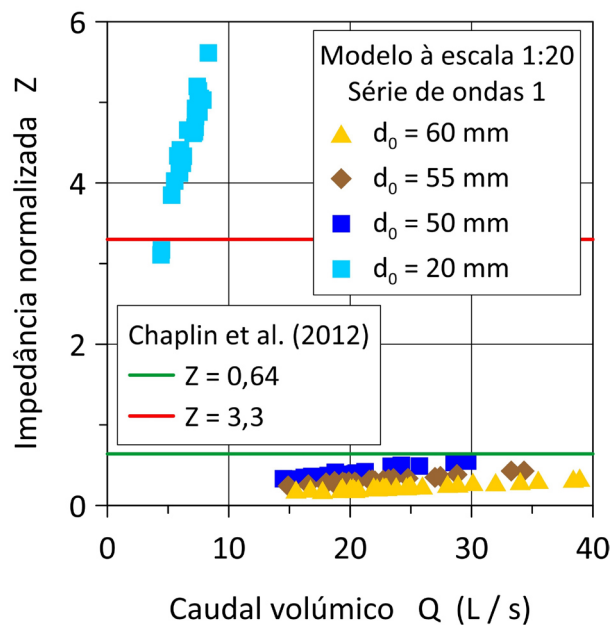


Figura 6.1: Impedância normalizada Z em função do caudal volúmico Q , para o presente modelo à escala 1:20 e para o modelo à escala 1:25 de Chaplin et al. (2012).

A fig. 6.2 mostra os comprimentos de captura C_W dos dois modelos à escala 1:20 e 1:25, para as impedâncias apresentadas na figura anterior. Por conveniência C_W é aqui dado em função do período normalizado T/T_1 , onde T_1 é o período de sintonização do tubo distensível do modelo correspondente. Para o modelo à escala 1:25 de Chaplin et al. (2012) são apresentados resultados experimentais e previsões teóricas baseadas na teoria de Froude-Krilov. No caso das menores impedâncias (fig. 6.2, lado esquerdo) o comportamento de C_W é semelhante em ambos os modelos. No entanto o comprimento de captura máximo do presente modelo está deslocado para períodos maiores. Adicionalmente este máximo é superior neste modelo, o que provavelmente é devido ao acoplamento da ressonância da OWC com o modo de flexão $\lambda = 2L$. No modelo à escala 1:25 este acoplamento não existe, porque o comprimento do tubo é maior e este está fixo em ambas as extremidades. Para as impedâncias maiores (fig. 6.2, lado direito), o andamento de C_W dos dois modelos é idêntico e atinge um valor máximo comparável.

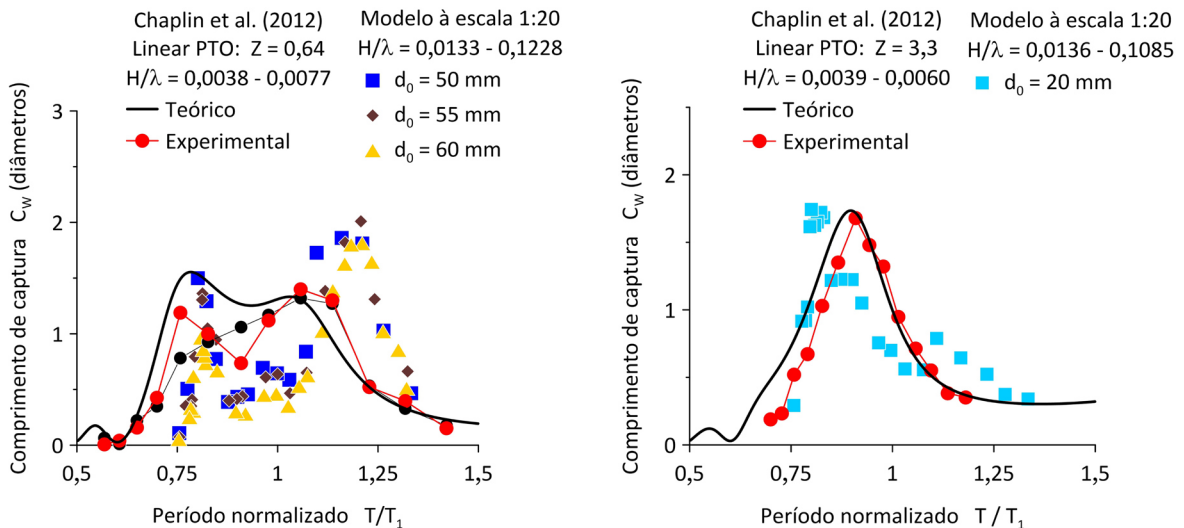


Figura 6.2: Comprimento de captura C_W em função do período normalizado T/T_1 : a) presente o modelo à escala 1:20 em ondas da série 1, com $Z = 0,19 - 0,55$, e modelo à escala 1:25 de Chaplin et al. (2012) com impedância constante $Z = 0,64$ (esquerda); b) presente modelo à escala 1:20 em ondas da série 1, com $Z = 3,11 - 5,61$, e modelo à escala 1:25 de Chaplin et al. (2012) com impedância constante $Z = 3,30$ (direita).

6.1.2 Comparação com previsões teóricas obtidas para OWCs

O modelo físico à escala 1:20 foi igualmente testado sem tubo distensível acoplado (fig. 6.3). Neste caso, a superfície livre da OWC em repouso está ao mesmo nível da água exterior. O comprimento da OWC é então $l = 0,635 \text{ m}$ e altura da câmara pneumática

aumenta para $h_1 = 1,715 \text{ m}$. À semelhança do modelo com tubo, o diâmetro interno da OWC e câmara pneumática é $2r = 28,9 \text{ cm}$ e a profundidade da água no tanque foi mantida a $h = 1,9 \text{ m}$. Nesta OWC sem o tubo distensível, a coluna de água oscilante entra em ressonância quando o período das ondas incidentes é igual ao período natural da OWC $T_0 = 1,6 \text{ s}$. O sistema foi testado com as ondas da série 1, cujas características estão apresentadas na tab. 5.3. Para além do caso em que a câmara pneumática está aberta à atmosfera, foram testados 9 orifícios do PTO com diâmetros d_0 entre 20 mm e $77,2 \text{ mm}$. Ao todo foram ensaiadas 180 condições de excitação e impedância do PTO diferentes.

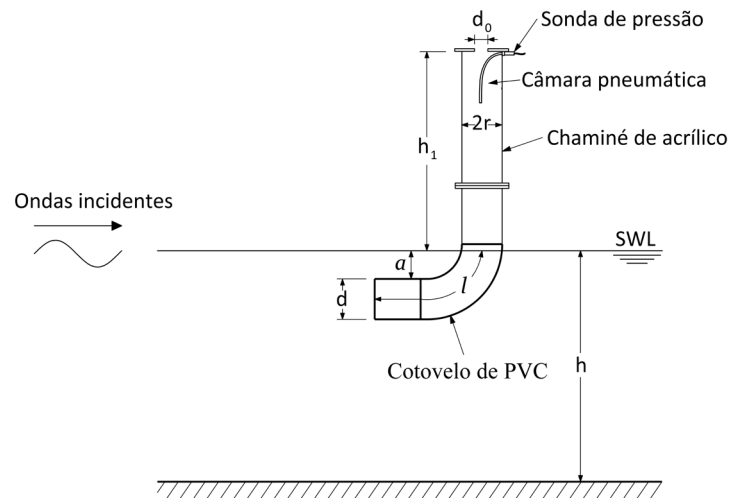


Figura 6.3: Representação do sistema OWC circular sem tubo distensível.

Para validar os resultados experimentais obtidos para este sistema, estes são em seguida comparados com previsões teóricas existentes na literatura para OWCs de secção circular. Na fig. 6.4 o comprimento de captura C_W obtido para o nosso sistema é comparado com as previsões analíticas de Evans e Porter (1997) em Teoria Linear, para uma OWC circular vertical com profundidade de imersão constante $a/h = 1/2$. C_W é expresso em diâmetros de OWC, em função do período normalizado T/T_0 . As previsões analíticas consideram os casos em que a razão entre raio da OWC e a profundidade é $r/h = 1/4$ e $r/h = 1/8$. Note-se que no nosso modelo a razão r/h é igual a $1/13$. As previsões de Evans e Porter (1997) indicam que a diminuição do raio da OWC resulta num aumento do C_W máximo e numa diminuição da gama de períodos de elevado desempenho. Pode no entanto observar-se que os resultados experimentais obtidos com o nosso modelo, cujo $r/h = 1/13$, comparam melhor com as previsões analíticas para a OWC de maior $r/h = 1/4$, muito embora tenha um C_W sensivelmente inferior. Para períodos pequenos, longe da ressonância da OWC, o nosso sistema com um cotovelo orientado para as ondas incidentes atinge um C_W mais elevado do que as previsões teóricas. O pequeno pico que é observado em $T/T_0 =$

0,68 é visível tanto nas previsões teóricas, como nos resultados experimentais. Este máximo local está relacionado com o fenómeno conhecido por “*sloshing*” na superfície da OWC. Em termos gerais, o comprimento de captura experimental obtido segue a tendência das previsões teóricas. No entanto, as diferenças observadas junto à ressonância da OWC indicam a ocorrência de perdas viscosas importantes que reduzem o desempenho do sistema. Cumulativamente, é de referir que o modelo à escala 1:20 foi testado em ondas de pequena e grande amplitude, enquanto que as previsões de Evans e Porter (1997) dizem apenas respeito a ondas de amplitude infinitesimal.

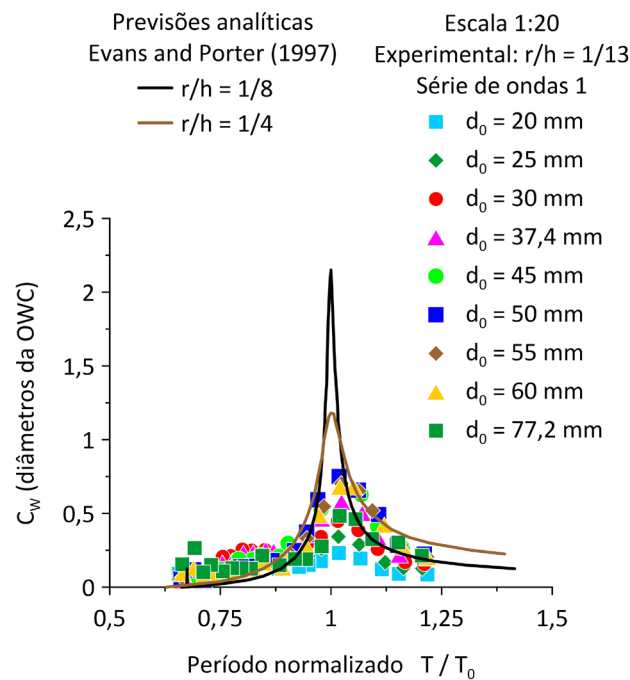


Figura 6.4: Comprimento de captura C_W em função do período normalizado T/T_0 , para o presente o modelo à escala 1:20 sob a ação das ondas da série 1, comparado com as previsões teóricas de Evans e Porter (1997) para uma OWC circular vertical com profundidade de imersão fixa $a/h = 1/2$.

O comprimento de captura experimental obtido com o presente modelo à escala 1:20 é em seguida comparado na fig. 6.5 com as previsões teóricas de Martins-Rivas e Mei (2009), para uma OWC vertical circular assente no fundo. A profundidade de imersão do lábio frontal da OWC considerada é $a/h = 1/5$. Uma vez mais o comprimento de captura C_W é dado em diâmetros da OWC, em função do período normalizado T/T_0 . Os resultados experimentais obtidos estão de acordo com as previsões obtidas por Rivas e Mei (2009) com a OWC de menor raio ($r/h = 1/4$), atingindo até um C_W ligeiramente superior junto à ressonância da OWC ($T/T_0 = 1$). Quando $T/T_0 = 0,68$, o efeito do *sloshing* da superfície da OWC é novamente visível em ambos os modelos experimental e teórico. Em suma pode concluir-se que uma OWC circular de menor diâmetro, com cotovelo orientado para as

ondas incidentes, pode atingir comprimentos de captura comparáveis a uma OWC circular de maior diâmetro, assente no fundo.

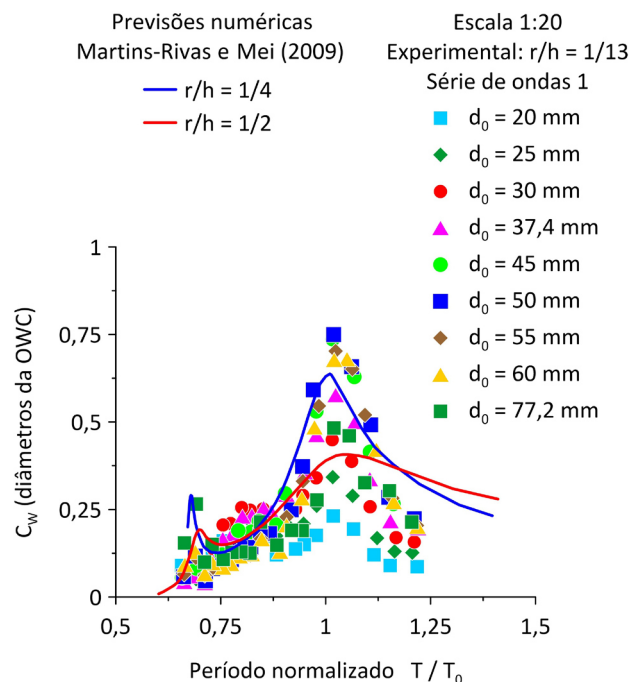


Figura 6.5: Comprimento de captura C_w em função do período normalizado T/T_0 , para o presente o modelo à escala 1:20 sob a acção das ondas da série 1, comparado com as previsões teóricas de Martins-Rivas e Mei (2009) para uma OWC circular vertical assente no fundo com profundidade de imersão do lábio frontal $a/h = 1/5$.

6.2 Comparação dos desempenhos do sistema OWC com e sem tubo

Após a validação dos resultados obtidos com o sistema à escala 1:20 com e sem tubo, vamos em seguida comparar os resultados obtidos nos dois casos. Esta comparação permite avaliar as vantagens de acoplar um tubo distensível a uma OWC de secção circular. Na fig. 6.6 estão representadas as respostas da OWC com e sem tubo, em termos do seu factor de amplificação ζ , para os casos em que a câmara pneumática está aberta para a atmosfera e quando o PTO está equipado com um orifício de diâmetro $d_0 = 60 \text{ mm}$. É possível observar que, para impedâncias comparáveis, o acoplamento de um tubo distensível à OWC resulta num factor de amplificação superior para todos os períodos testados. Junto ao período de ressonância da OWC este aumento pode chegar a ser de 50%. Adicionalmente, para os

períodos menores ($T = 1,2$ s) verifica-se que o sistema com tubo distensível apresenta um segundo pico, onde ζ atinge 2,2. Em contrapartida o sistema sem tubo tem apenas um pico de amplificação, centrado na ressonância da OWC. Este comportamento reflecte-se em todas as impedâncias testadas. Em termos do factor de amplificação, o sistema com tubo distensível é claramente vantajoso. No entanto, é conveniente também analisar a evolução do desempenho do sistema.

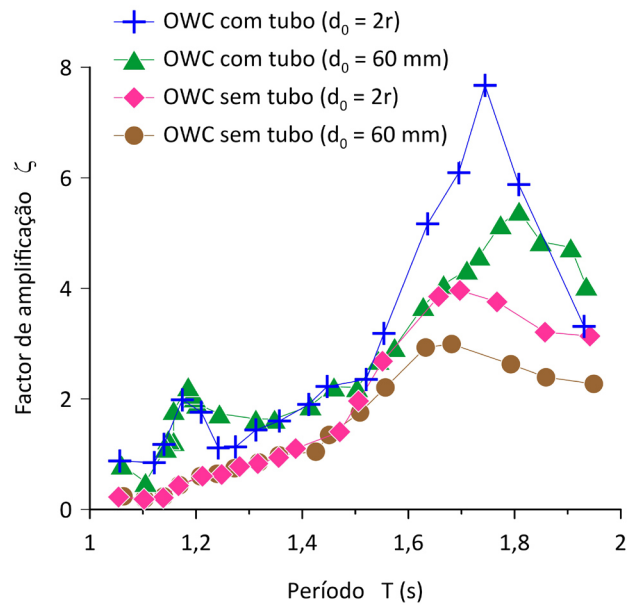


Figura 6.6: Comparação do factor de amplificação ζ do dispositivo com e sem tubo distensível, em função do período T das ondas incidentes pertencentes à série de ondas 1, para o sistema não amortecido e amortecido com $d_0 = 60$ mm.

A fig. 6.7 apresenta agora os envelopes de comprimento de captura do sistema com e sem o tubo distensível. Estes envelopes contêm todos os pontos de medida obtidos nestes dois casos, sob a acção das ondas incidentes da série 1 e todas as impedâncias do PTO testadas. Os resultados são apresentados em função do período das ondas incidentes T e o comprimento de captura C_W é dado em diâmetros da OWC. Tal como no caso do factor de amplificação ζ , o sistema sem o tubo distensível tem apenas um pico significativo de C_W perto do período natural da coluna de água oscilante, atingindo no máximo $C_W = 0,75$ diâmetros da OWC para um orifício de $d_0 = 50$ mm. Comparando o comprimento de captura máximo dos dois modelos, nestas condições de ressonância da OWC, o C_W máximo do sistema com tubo é 3 a 4 vezes maior do que o do sistema sem tubo. Adicionalmente, a

eficácia do dispositivo sem tubo é praticamente nula para as ondas de pequeno período. Por outro lado, para pequenos períodos ($\lambda = L$), o sistema com tubo atinge um C_W comparável ao da coluna de água em ressonância ($T = 1,75$ s). Nos períodos intermédios, a ressonância dos pulsos de pressão no tubo garante igualmente um bom desempenho, bem acima da OWC sem tubo.

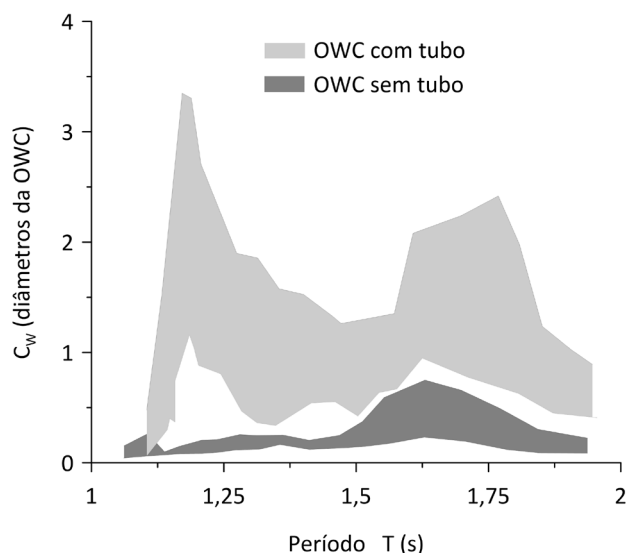


Figura 6.7: Envelopes de comprimento de captura C_W da OWC com e sem tubo, para as ondas incidentes da série 1.

6.3 Possíveis efeitos não-lineares e de escala

Para o modelo à escala 1:20, a dependência do factor de amplificação ζ do declive H/λ das ondas incidentes da série 1 é analisada na fig. 6.8. Fazendo variar a abertura do PTO do presente sistema conseguem-se amplificações até $\zeta = 5,5$. O factor de amplificação de uma OWC sem tubo não ultrapassa $\zeta = 3$, para uma impedância comparável (ver fig. 6.6). Como seria de esperar, ζ aumenta à medida que a impedância diminui e diminui acentuadamente com o declive H/λ das ondas incidentes. O decréscimo do factor de amplificação é quase linear até cerca de $H/\lambda = 0,02$, independentemente da impedância do sistema. Para declives superiores pode observar-se o comportamento não-linear do sistema. Para um dado declive da onda existe uma máxima impedância que conduz a amplitudes de oscilação da OWC maiores que a amplitude das ondas incidentes ($\zeta > 1$). Quanto menor o declive, maior é a gama de impedâncias aceitáveis.

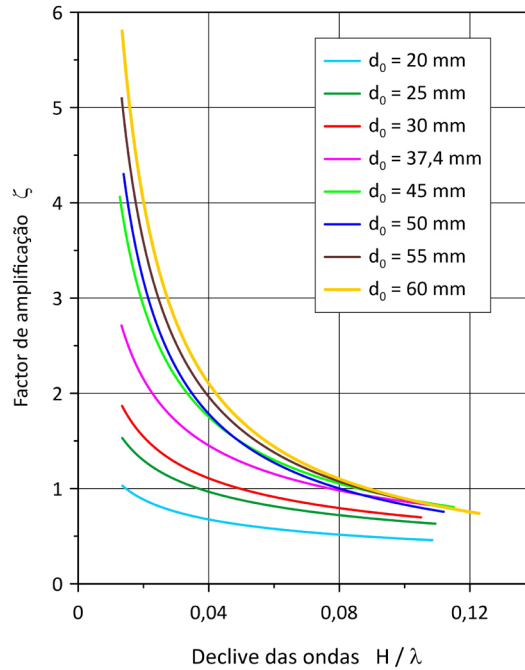


Figura 6.8: Regressões do factor de amplificação do modelo à escala 1:20 em função do declive H/λ das ondas incidentes da série 1, para as diferentes impedâncias do sistema.

Por forma a poder avaliar os efeitos de escala é necessário comparar os resultados obtidos com dispositivo às escalas 1:50 (§4) e 1:20 (§5). Para as ondas incidentes da série 1, a fig. 6.9 mostra os envelopes do comprimento de captura C_W nestes dois casos. Dada a importância do comprimento L do tubo distensível no desempenho do dispositivo, esta comparação é feita em função do número de onda adimensional kL . Note-se que a razão das forças hidrostáticas de restituição e forças de compressão do ar $\rho_1 g h_1 / (p_0 \gamma)$ é 0,084 para o modelo à escala 1:50 e 0,098 para o maior modelo. Isto implica que as câmaras pneumáticas dos dois modelos estão escaladas de forma semelhante (Falcão & Justino, 1999) e que os efeitos de escala associados à compressibilidade do ar são comparáveis nos dois modelos. Quando $kL = 2\pi$ o comprimento da onda incidente é igual ao comprimento do tubo ($\lambda = L$). Nestas condições o número de Reynolds do escoamento de água na OWC $Re = 2r\dot{z}/\nu_1$ é $Re = 4,55 \times 10^4$ para o modelo de menor escala e $Re = 6,75 \times 10^4$ no modelo à escala 1:20. Relativamente ao escoamento de ar através do PTO, $Re = 4Q/\pi v d = 2,41 \times 10^4$ para o modelo 1:50 e $Re = 3,74 \times 10^4$ para o modelo 1:20. Isto sugere que as perdas por resistência viscosa sobre as paredes da conduta da OWC bem assim como as perdas localizadas no orifício do PTO são superiores no modelo à escala 1:50. Esta tendência também se verifica quando $kL = \pi$, onde o comprimento da onda incidente é igual ao dobro do comprimento do tubo $\lambda = 2L$. Cumulativamente, o quociente entre o diâmetro do tubo e a largura do tanque também ajuda a que o C_W do modelo à escala 1:20 seja substancialmente

superior ao do modelo à escala 1:50. Note-se que d/b não excede 10% no menor modelo e corresponde a 17% no maior modelo, o que introduz um importante efeito de blocagem benéfico para a extracção de energia das ondas incidentes. Cumulativamente, a gama valores do número de Keulegan-Carpenter $K_C = \pi H/d$ é $K_C = 1,01 - 3,73$ para o modelo à escala 1:50 e $K_C = 0,61 - 2,22$ para o modelo à escala 1:20. Conforme seria de esperar, as perdas por separação do escoamento e efeitos não-lineares são significativamente superiores para o tubo à escala 1:50, relativamente ao tubo à escala 1:20.

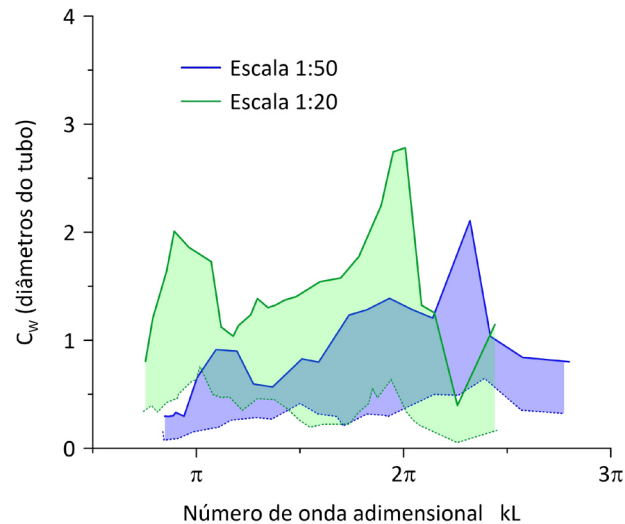


Figura 6.9: Envelopes de comprimento de captura C_w em diâmetros do tubo, em função do número de onda adimensional kL , para as ondas incidentes da série 1 testadas com os modelos à escala 1:50 e 1:20.

6.4 Síntese das principais conclusões

As comparações levadas a cabo neste capítulo permitiram validar os resultados obtidos e extrair mais algumas conclusões. Foi observado que o máximo comprimento de captura de uma OWC circular com cotovelo alinhado com as ondas incidentes pode ser comparável ao previsto para uma simples OWC circular vertical de profundidade de imersão fixa ou assente no fundo, com um diâmetro sensivelmente 3 vezes maior. Se assumirmos que o comprimento da coluna de água é o mesmo nos dois casos, isto significa que a profundidade de imersão da boca da OWC é menor no caso em que a OWC tem um cotovelo. A OWC pode então operar em águas de menor profundidade, junto à costa, onde a direcção de incidência das ondas varia menos. Neste capítulo demonstramos que uma das vantagens de adicionar um tubo distensível a uma OWC é permitir a extracção de energia das ondas

incidentes com mais do que um grau de liberdade, o que resulta em desempenhos significativamente superiores aos do sistema OWC sem tubo. Os três parâmetros que governam o funcionamento do dispositivo com tubo distensível são o comprimento do tubo L , o período natural da OWC T_0 e o período de ressonância do tubo T_1 . Foi possível também observar que, para operar com ondas de grande comprimento de onda, pode ser vantajoso utilizar um tubo mais curto – capaz de funcionar com os três graus de liberdade em acoplamento –, em vez de um tubo mais comprido. Neste último caso o tubo funciona essencialmente graças à propagação de ondas de pressão induzidas no seu interior e, conseqüentemente, extrai menos energia. A comparação dos comprimentos de captura dos dois modelos à escala 1:20 e 1:50 permitiu ainda verificar que o primeiro apresenta valores de C_W superiores, o que resulta não só de um efeito de constrição benéfico imposto pelas paredes do canal de ondas, mas também pelo facto de as perdas neste modelo à escala 1:20 serem globalmente menores.

Capítulo 7

Metodologias Implementadas para Melhoria de Desempenho

O modelo do dispositivo à escala 1:20 que foi anteriormente estudado em §5 tenta reproduzir o funcionamento de um protótipo de tubo distensível a operar no mar dos Açores, em águas de 38 *m* de profundidade. Tendo em conta que nos Açores profundidades desta ordem são encontradas relativamente perto da costa – ver §1.1.3 –, é pertinente desenvolver estratégias de acomodação do sistema a águas pouco profundas junto à costa e até mesmo na linha de costa. Na primeira parte deste capítulo são descritas as principais estratégias já desenvolvidas por outros investigadores para melhorar o rendimento de dispositivos de energia das ondas. Em seguida a nossa atenção foca-se no desenvolvimento de um canal de focagem, que tem por missão concentrar a energia das ondas que incidem no tubo distensível. Finalmente são comparados os desempenhos de três configurações: i) um sistema que opera no offshore, ligado a uma plataforma assente no fundo do mar; ii) um sistema na linha de costa; iii) um sistema que opera na linha de costa incorporado num canal de focagem.

7.1 Revisão das estratégias mais utilizadas

No contexto da melhoria de desempenho, será nesta secção dada especial atenção aos métodos aplicados a OWCs e aos seus sistemas de extracção de potência pneumáticos. Uma revisão abrangente sobre dispositivos de coluna de água oscilante convencionais e turbinas de ar é apresentada em Falcão e Henriques (2016). Estes sistemas já foram largamente estudados, quer quando operam isolados ou quando inseridos em portos de focagem. Começaremos por rever a utilização de paredes laterais projectadas para a frente, destinadas a focar a energia das ondas incidentes na OWC. Em seguida é também discutida a utilização de válvulas de controlo de caudal em sistemas PTO pneumáticos. Por fim serão analisados alguns métodos de controlo de fase, que são normalmente aplicados a este tipo de dispositivos.

7.1.1 Portos de focagem

A utilização de paredes que se projectam para a frente do dispositivo foi inicialmente proposta por Ambli et al. (1982), como parte integrante do projecto *Kvaerner Multiresonant OWC*. Estes autores estudaram os efeitos de adicionar paredes paralelas à boca de uma OWC, que se estendem em direcção às ondas incidentes. Estes efeitos resultam do surgimento de múltiplas ressonâncias das ondas entre as paredes, que também contribuem para aumentar o rendimento global do dispositivo. Dois anos depois Count e Evans (1984) demonstraram analiticamente, e também numericamente, que esta solução é adequada para aumentar o rendimento de sistemas OWC de secção rectangular. Estes investigadores apresentam previsões para os casos nos quais as paredes projectadas têm comprimento igual à largura da OWC ou o dobro desta largura. Foi demonstrado que a amplificação das ondas entre as paredes projectadas é máxima quando o comprimento de onda é cerca de 4 vezes o comprimento do canal. As ressonâncias múltiplas, que são determinadas pela relação entre o comprimento de onda e o comprimento do canal, aumentam a gama de períodos em que a amplificação é elevada, relativamente ao mesmo sistema sem as paredes projectadas. O comprimento de captura máximo é por esta via transportado para períodos mais elevados; quanto maior o comprimento das paredes maior é esta mudança. Posteriormente McIver e Evans (1988) analisam em teoria linear o

rendimento de OWCs, também de secção rectangular, encastradas na linha de costa ou num quebra-mar. Consideram primeiro a influência da razão entre o comprimento das paredes projectadas e a largura da OWC, concluindo que o aumento desta razão resulta num acréscimo do comprimento de captura máximo. No entanto, este aumento é acompanhado por uma redução da gama de períodos de alto rendimento. Contrariamente, um canal paralelo mais curto e mais largo reduz o comprimento de captura máximo mas aumenta a gama de períodos onde o rendimento é elevado. Como havia sido constatado por Count e Evans em 1984, McIver e Evans também concluem que a inclusão de um canal de paredes paralelas transporta o rendimento máximo para períodos maiores, permitindo assim o projecto de dispositivos mais pequenos. Os benefícios de instalar uma fileira de dispositivos semelhantes entre si, ao longo de uma parede reflectora, foram também estudados. Quando os dispositivos multiresonantes estão encastrados numa parede reflectora, a potência máxima que pode ser extraída depende apenas da relação entre o espaçamento dos dispositivos e o comprimento das ondas incidentes.

Já nos anos 90 Whittaker e Stewart (1993) investigaram a utilização de paredes convergentes, por forma a focar a energia das ondas sobre o dispositivo OWC. Estes autores realizaram testes experimentais de radiação com um modelo de secção rectangular. Foram testadas quatro configurações da OWC: a) uma OWC simples e isolada; b) uma OWC isolada com paredes frontais paralelas; c) uma OWC inserida numa parede reflectora; d) uma OWC com um canal de focagem, embutidos numa parede reflectora. Os ensaios realizados demonstraram que o comprimento de captura máximo de uma OWC isolada, com paredes frontais paralelas, é praticamente o mesmo que o rendimento obtido com uma OWC simples e isolada. Cumulativamente, a adição de uma parede reflectora aumenta o comprimento de captura máximo para o dobro e a utilização de um canal de focagem, com parede reflectora, aumenta o comprimento de captura para o triplo ou mais. Posteriormente Tseng et al. (2000) testaram um modelo à escala 1:20 de uma OWC circular assente no fundo, tendo um diâmetro de 0,6 m. Neste modelo a entrada da OWC tem duas paredes laterais projectadas para a frente, com uma abertura de 60° entre elas. A razão entre o comprimento das paredes e o diâmetro da OWC é neste caso 0,8. Os ensaios foram realizados em águas de 0,6 m de profundidade, com ondas de períodos $T = 1,34 - 2,68$ s e declive $H/\lambda = 0,0081 - 0,0395$. Estes investigadores esclarecem os processos de conversão de energia no dispositivo e dão o seu rendimento hidrodinâmico e global. O balanço de energia realizado indica que apenas 28,5% da energia incidente é convertida em energia pneumática, devido às elevadas perdas verificadas no processo. Mais recentemente David et al. (2018) estudam a influência do comprimento do canal de focagem e do seu ângulo de abertura no rendimento de uma OWC, com secção rectangular, instalada em águas restritas de profundidade

constante. É avançada uma relação ideal entre o comprimento do canal e largura da OWC, relação esta que está de acordo com a que foi anteriormente prevista por Deng et al. (2014) para OWCs de secção circular. Muitos outros investigadores têm estudado as vantagens da utilização de paredes frontais em dispositivos OWC. Uma descrição mais pormenorizada de alguns destes trabalhos é dada em Mendes et al. (2023).

7.1.2 Estratégias de controlo

A grande maioria dos dispositivos de energia das ondas serve-se da oscilação de corpos, que é excitada pelas ondas incidentes, para absorver energia. É sabido que esta extracção de energia é máxima quando a frequência das ondas incidentes coincide com a frequência natural do dispositivo em questão. Adicionalmente, o controlo da fase entre a velocidade das oscilações no dispositivo e as oscilações da força de excitação que nele actua pode resultar num aumento substancial do rendimento e da largura de banda de frequências de alto rendimento. Isto é especialmente verdade para dispositivos que têm apenas uma ressonância, como são as OWC convencionais, que têm dificuldade em manter o seu rendimento elevado em ondas irregulares. Falnes (2002) e mais recentemente Wang et al. (2018) e Maria-Arenas et al. (2019), apresentam uma revisão dos métodos de optimização e controlo utilizados para este fim em sistemas de energia das ondas.

A utilização de métodos de controlo destinados à optimização de WECs foi primeiro proposta por Budal e Falnes (1977, 1978) e independentemente por Salter et al. (1976) e Salter (1980). Os métodos propostos dependiam da utilização de um PTO controlável, capaz não só de extrair energia do dispositivo mas também de fornecer energia a este. Na prática quando a velocidade de oscilação estava adiantada em relação à força de excitação, o PTO extraía energia por forma a que a velocidade diminuísse. Caso contrário o PTO fornecia energia ao sistema, acelerando a oscilação. Desta forma era possível manter os dois parâmetros em fase. Fazendo uma analogia para os sistemas eléctricos, o objectivo era controlar a potência reactiva por forma a maximizar a potência activa. É desta analogia que nasceu o termo *Reactive Control*, que foi introduzido por Salter (1979). Korde (1991, 1995) propõe diversos sistemas PTO capazes de realizar este tipo de controlo em dispositivos OWC, à escala de modelo ou de protótipo. Mais recentemente, este tipo de controlo tem sido aperfeiçoado com a utilização de algoritmos de optimização MPC (Faedo et al., 2017). O MPC (*Model Predictive Control*), inicialmente proposto como uma melhoria ao controlo

reactivo, tem sido utilizado em conjunto com redes neuronais para prever a onda futura e ajustar em tempo real a impedância e força de restituição do PTO (Anderlini, 2017).

Falnes e Budal (1978) e Budal e Falnes (1981) propuseram um outro tipo de controlo de fase aproximado chamado de *Latching Control*. Neste tipo de controlo, o dispositivo é preso em determinados momentos da oscilação, por forma que este suba e desça em fase com a força de excitação. Ao contrário do controlo reactivo que é por natureza contínuo, neste caso o controlo é discreto. Este método, que foi também proposto independentemente por Guenther et al. (1979) e por French (1979b), é menos eficaz do que os métodos contínuos em termos de aumento de rendimento, mas pode ser benéfico em casos onde a amplitude de oscilação do dispositivo necessita de ser regulada ou limitada. É de notar que para este tipo de controlo de fase discreto é necessário prever o comportamento da onda incidente com uma antecedência de cerca de um quarto de comprimento de onda. Em alternativa, podem ser instaladas bóias que medem a onda incidente antes de esta atingir o dispositivo. Este tipo de controlo é mais indicado para dispositivos de corpo oscilante; em OWCs o *Latching Control* implicaria fazer parar a oscilação da coluna de água em certas alturas da sua oscilação. Dada a inércia da água e o facto de existir uma câmara pneumática acima da OWC, este controlo introduz grandes desafios de engenharia. Henriques et al. (2013) reportam sobre a aplicação de *Latching Control* a uma bóia do tipo Spar sujeita a ondas regulares.

Uma estratégia bastante estudada que evita a necessidade de prever o comportamento da onda incidente é o chamado *Damping Control*, também conhecido como *Resistive Control* (Garcia-Rosa, 2017 e Nielsen et al, 2017). Neste caso, é projectado um PTO que é capaz de ajustar a sua impedância proporcionalmente à velocidade de oscilação do dispositivo. Este método simples depende apenas da medição da velocidade do PTO e é comumente encontrado em dispositivos de demonstração actuais. No entanto, apesar da simplicidade deste método, a determinação da impedância óptima torna-se difícil para ondas irregulares. Neste caso o controlo de impedância tem de ser efectuado em tempo real, com o PTO a ser ajustado constantemente, dependendo da frequência da excitação. Este tipo de controlo pode ser efectuado em OWCs através da utilização de válvulas, que controlam o caudal que atravessa a turbina de ar. Falcão e Justino (1999) reportam sobre a utilização de válvulas de controlo numa OWC equipada com uma turbina Wells, que permitem variar a impedância imposta pela turbina.

Dado o foco actual na I&D em estratégias de controlo de sistemas de energia das ondas, existem muitos outros métodos para além destes três principais. A sua aplicabilidade a um dispositivo deve ser no entanto avaliada caso a caso, dado o nível de complexidade

introduzido no PTO do dispositivo e aos custos associados. No caso do presente dispositivo, a aplicação de um controlo do tipo resistivo aparentemente seria o mais indicado.

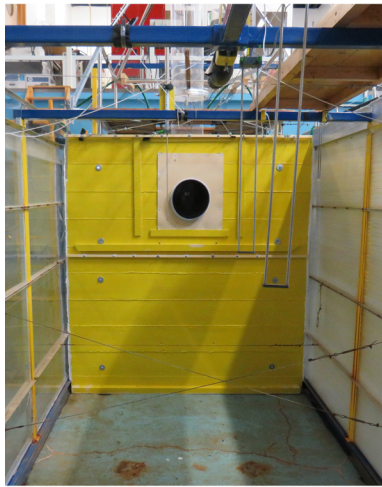
7.2 Modelos na linha de costa

O modelo anteriormente estudado em §5 corresponde à situação do dispositivo isolado a operar no offshore (configuração A). Para o dispositivo funcionando na linha de costa foram consideradas duas situações: o modelo embutido a uma barreira reflectora (configuração B) e o modelo incorporado num canal de focagem (configuração C). Os modelos físicos correspondentes a estas duas últimas configurações são seguidamente descritos em pormenor.

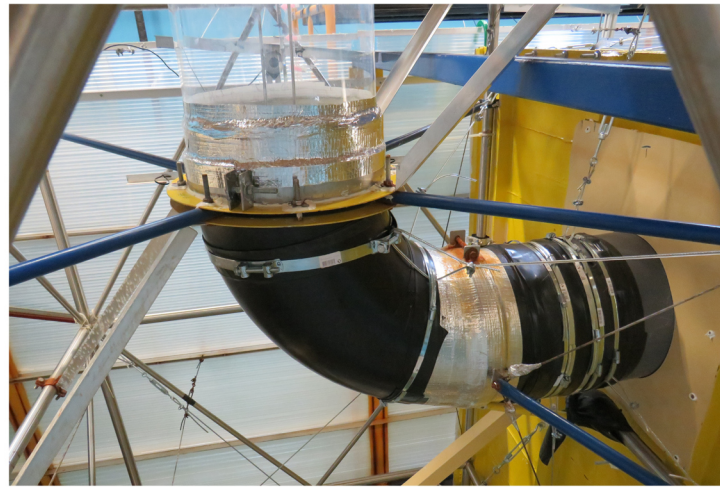
7.2.1 Modelo com barreira reflectora

Na configuração B o tubo distensível está encastrado numa barreira vertical que atravessa o canal de parede a parede, atrás da qual está instalada a coluna de água oscilante, câmara pneumática e PTO. Esta barreira está fixa à plataforma tubular assente no fundo. A fig. 7.1(a) mostra a boca da OWC na barreira vertical, onde será ligado o tubo distensível. na fig. 7.1(b) está uma vista lateral do conjunto atrás da barreira, que mostra o cotovelo da OWC.

O sistema completo pode ser visualizado na fig. 7.2. A barreira vertical tem uma altura de $2,15\text{ m}$ e uma largura igual à largura do tanque $b = 2,06\text{ m}$. A profundidade da água no tanque é $h = 1,9\text{ m}$, $8,5\text{ cm}$ acima do topo da boca da OWC. Para compatibilizar a OWC com a barreira vertical foi necessário alongar o cotovelo com um elemento de PVC de $40,2\text{ cm}$ de comprimento. Nesta configuração o tubo distensível tem um comprimento $L = 1,71\text{ m}$ e a altura estática $h_0 = 24,6\text{ cm}$ garante um diâmetro pressurizado $d = 35,2\text{ cm}$. À semelhança da configuração A, a espessura de parede do tubo de Latex é $w = 2\text{ mm}$ e o diâmetro da chaminé é $2r = 28,9\text{ cm}$. A altura estática da água na chaminé h_0 define neste caso uma câmara pneumática de altura $h_1 = 1,469\text{ m}$, no topo da qual se insere uma placa de suporte para a instalação dos orifícios do PTO.



(a)



(b)

Figura 7.1: Barreira vertical e boca da OWC (a); cotovelo e chaminé vertical atrás da barreira (b).

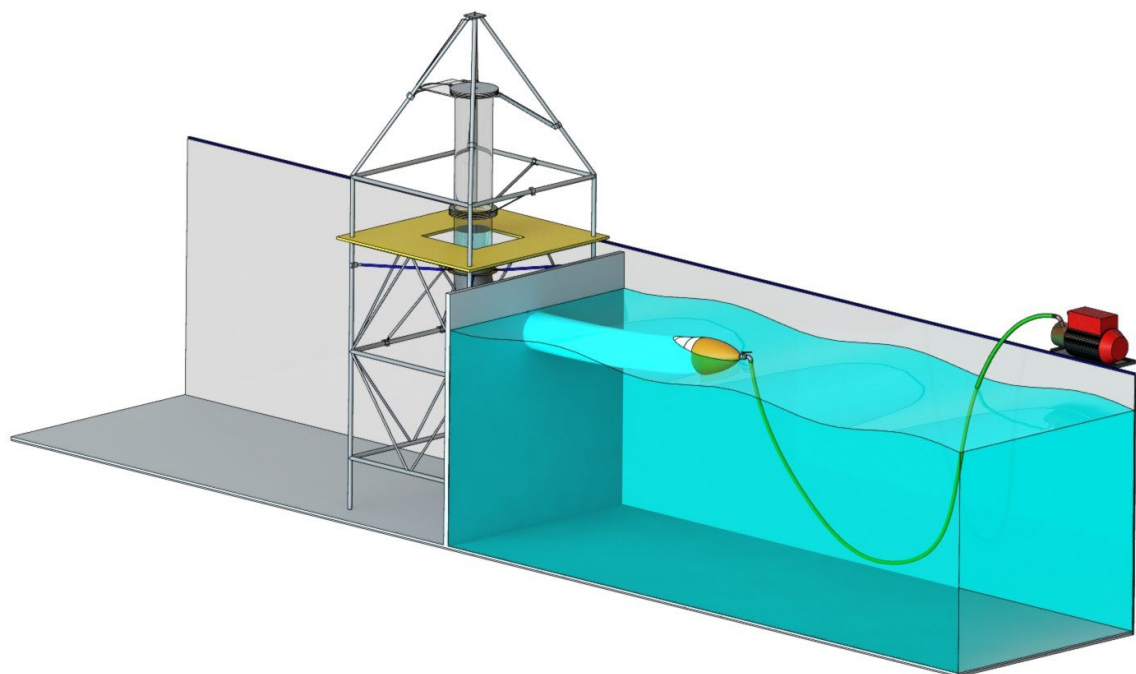


Figura 7.2: Representação do sistema completo na configuração B.

7.2.2 Modelo com canal de focagem

O modelo físico correspondente à configuração C consiste em adaptar um canal de focagem à barreira vertical, como mostra a fig. 7.3. Este canal de focagem é constituído por uma rampa com uma inclinação de aproximadamente 30° , que suporta duas paredes convergentes com um ângulo de abertura $\theta = 37,54^\circ$ entre si (fig. 7.4). No interior do canal, junto à barreira vertical, a profundidade da água é $0,555\text{ m}$. A rampa inclinada estende-se um comprimento $X_S = 2,415\text{ m}$ na horizontal, a contar da barreira. O tubo distensível é o mesmo da configuração B, estando inteiramente confinado ao canal de focagem com comprimento normal à barreira $X = 1,846\text{ m}$, à exceção do nariz de madeira. Entre as paredes convergentes do canal de focagem e as paredes do tanque existe uma abertura de largura $e = 6.5\text{ cm}$.

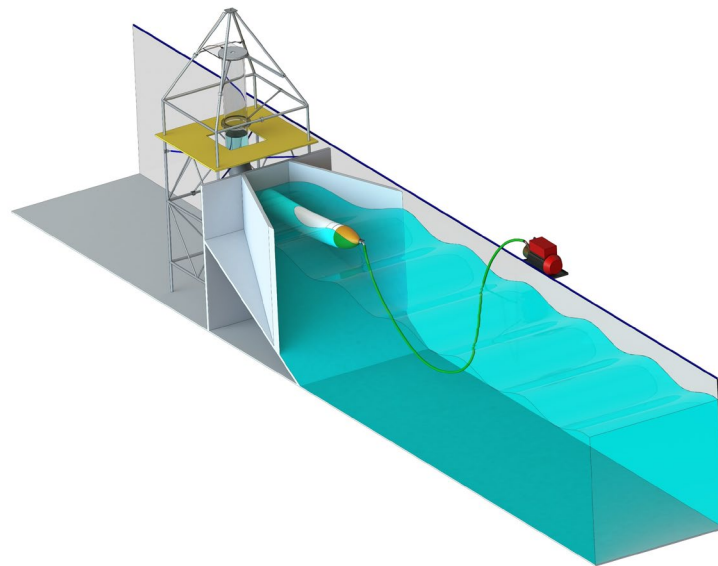


Figura 7.3: Dispositivo com canal de focagem (configuração C) no tanque de ondas.

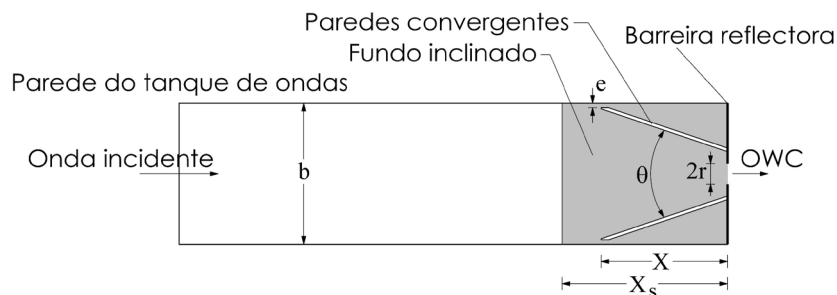


Figura 7.4: Canal de focagem.

As principais dimensões do tubo distensível, da OWC e da câmara pneumática são comuns às configurações B e C, sendo apresentadas na tabela 7.1.

Tabela 7.1: Dimensões principais da OWC, PTO e tubo distensível, nas configurações B e C.

$2r$ (cm)	l (m)	h_1 (m)	L (m)	d (cm)	w (mm)	a (cm)	h_0 (cm)
28,9	1,11	1,469	1,71	35,2	2	8,5	24,6

7.3 Resultados experimentais alcançados

7.3.1 Condições impostas e resposta do sistema

Para avaliar a resposta do dispositivo nas configurações B e C foram geradas em média 40 ondas diferentes no tanque hidrodinâmico, para cada uma das impedâncias do PTO, cujas características são apresentadas na tabela 7.2. Para cada configuração foram testados 6 orifícios de diferentes diâmetros, mais o caso em que a câmara pneumática está aberta para a atmosfera; os diâmetros d_0 dos orifícios testados variam entre 20 e 50 mm para a configuração B e entre 15 e 37,4 mm para a configuração C. Ao todo foram testadas 560 condições diferentes para cada configuração.

Tabela 7.2: Campos de ondas incidentes geradas no tanque hidrodinâmico.

Configuração	T (s)	k	H (cm)	H/λ
B	1,14 – 2,50	0,73 – 3,12	4,0 – 18,8	0,01 – 0,09
C	1,15 – 2,49	0,73 – 3,02	3,8 – 15,8	0,01 – 0,07
Configuração	h/λ	c (m/s)	Ur	P_i (W/m)
B	0,22 – 0,94	1,77 – 3,45	0,07 – 0,73	5,53 – 63,83
C	0,22 – 0,91	1,80 – 3,44	0,05 – 0,74	3,69 – 65,58

A fig. 7.5 mostra a resposta do sistema às ondas incidentes em termos do factor de amplificação ζ , para todas as impedâncias do PTO testadas nas configurações B (lado esquerdo) e C (lado direito). Os resultados são apresentados em função do período T da onda incidente. À semelhança da configuração A, a amplificação máxima está associada à

ressonância da OWC. No entanto, na configuração B observa-se que o factor de amplificação aumenta notoriamente para as grandes impedâncias quando $kb = \pi$, possivelmente devido à influência das paredes do tanque. A ressonância do tubo, que coincide com as ondas de comprimento igual a duas vezes o comprimento do tubo – o que ocorre para $T = T_1 = 1,48\text{ s}$ – não tem influência significativa no factor de amplificação. Para ondas de pequeno período, perto de $T = 1,25\text{ s}$, é visível um pequeno máximo local de ζ que está associado a uma segunda ressonância, a três quartos do comprimento de onda ($L = 3\lambda/4$). Esta ressonância aparenta ser idêntica à dos sistemas acústicos, em tubos abertos numa das extremidades. Como se verá na próxima subsecção, no nosso caso esta ressonância a três quartos do comprimento de onda é benéfica para o comprimento de captura do dispositivo.

Relativamente à configuração C (fig. 7.5, lado direito), pode observar-se uma redução do factor de amplificação ζ quando o comprimento das ondas incidentes é o dobro do comprimento do fundo inclinado ($X_s = \lambda/2$). Isto ocorre quando o sistema opera com a chaminé aberta. Quando o sistema opera sujeito às impedâncias impostas pelos diferentes orifícios do PTO, este efeito não é visível. Como se verá mais adiante, nesta configuração o C_W do dispositivo é máximo para $X_s = \lambda/2$. Ao contrário do que foi observado na configuração B a influência das paredes laterais do tanque não é visível, pois o canal convergente não permite a formação de ondas transversais estacionárias. Para $T = T_1 = 1,48\text{ s}$ a ressonância do tubo dá origem, nesta configuração, a um pequeno máximo local de ζ para qualquer impedância imposta no PTO. Finalmente para períodos abaixo de $T = 1,26\text{ s}$ – período em que o comprimento das ondas é igual ao comprimento do fundo inclinado X_s –, o factor de amplificação do sistema tende para zero. A influência de todos estes efeitos no desempenho do dispositivo será discutida na próxima subsecção.

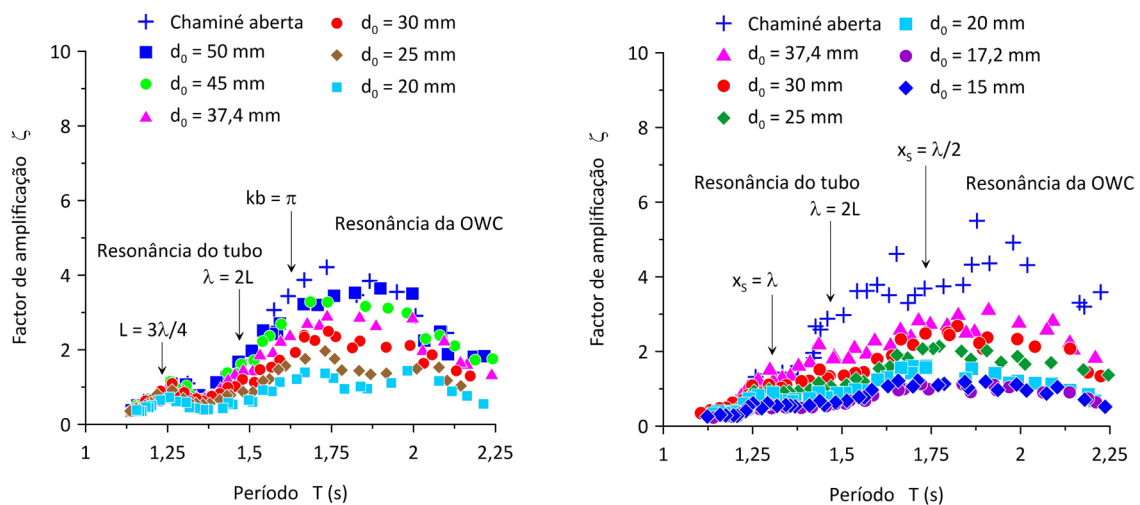


Figura 7.5: Factor de amplificação ζ em função do período T das ondas incidentes, para o sistema nas configurações B (lado esquerdo) e C (lado direito).

7.3.2 Comprimento de captura de energia

A eficácia do dispositivo na extracção de energia das ondas será aqui também analisado através o comprimento de captura C_W . A fig. 7.6 dá a variação de C_W em função do período T da onda incidente, quando o tubo opera encastrado numa parede reflectora (configuração B).

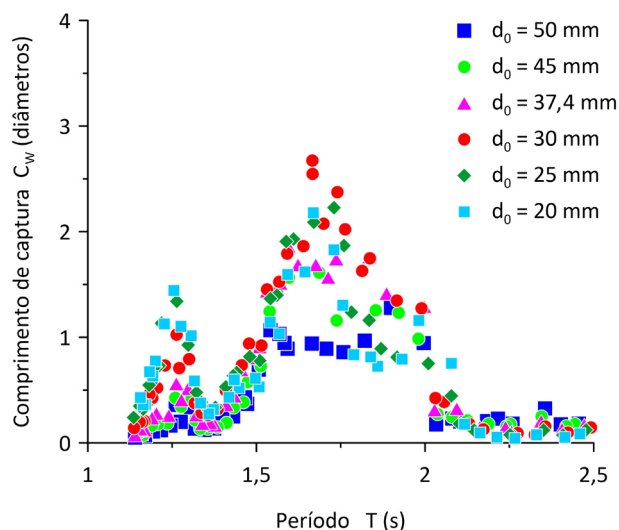


Figura 7.6: Comprimento de captura C_W do dispositivo na configuração B, em função do período da onda incidente T , para todas as impedâncias do PTO testadas.

É possível observar na Fig. 7.6 que para períodos longos, acima de $T = 2,1 s$, o comprimento de captura é próximo de zero. $T = 2,1 s$ corresponde ao período em que o comprimento da onda incidente é igual a quatro vezes o comprimento do tubo ($L = \lambda/4$). Para períodos compreendidos entre $T = 1,6 s$ e $T = 2 s$, C_W é superior a 1 diâmetro do tubo devido à ressonância da OWC. O comprimento de captura máximo observado é $C_W = 2,7$ diâmetros do tubo e ocorre para um orifício de diâmetro $d_0 = 30 mm$, quando as ondas incidentes têm um período $T = 1,67 s$. Note-se que este máximo pode estar estimado por excesso, devido à influência das paredes do tanque quando $kb = \pi$. Se o efeito das paredes for ignorado, o máximo comprimento de captura deverá ser da ordem de 2,5 diâmetros do tubo. Para $T = 1,53 s$ – que é perto da ressonância do tubo distensível –, $C_W = 1,5$ diâmetros com um orifício de diâmetro $d_0 = 30 mm$, descendo de seguida para 0,94 diâmetros quando $T = T_1 = 1,48 s$. Coincidentemente, neste período o comprimento da onda incidente é aproximadamente o dobro do comprimento do tubo. O comprimento de captura é próximo de zero entre $T = 1,53 s$ e $T = 1,27 s$, antes de subir de novo até atingir cerca de 1,5 diâmetros do tubo para $T = 1,24 s$ com um orifício de diâmetro $d_0 = 20 mm$. Isto ocorre quando o tubo é ressonante a três quartos do comprimento de onda ($L = 3\lambda/4$). Para

períodos inferiores a este, as perdas de energia aumentam abruptamente devido à difracção em redor do tubo e rebentação das ondas no seu dorso. Isto resulta numa perda substancial do comprimento de captura do dispositivo.

Durante os ensaios procurou observar-se o comportamento do tubo distensível recorrendo a uma câmara de vídeo submersível. Este expediente permitiu apreender a dinâmica do sistema durante o processo de extracção de energia das ondas incidentes. A figura 7.7 ilustra os movimentos do tubo encastrado numa parede reflectora (configuração B), para alguns dos pontos de interesse referidos anteriormente.

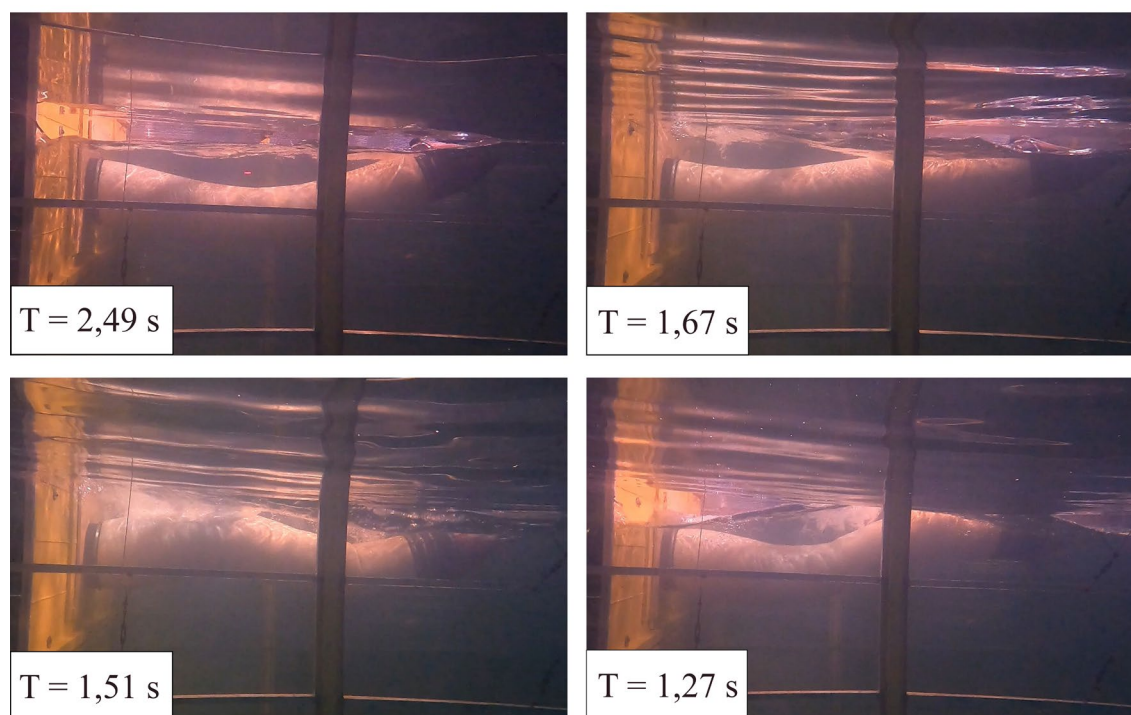


Figura 7.7: Movimentos de flexão e alongamento do tubo distensível, a par das ondas de pressão no seu interior, durante o processo de extracção de energia das ondas incidentes pelo dispositivo na configuração B.

É de notar que para períodos grandes ($T = 2,49 s$) o tubo oscila no segundo modo de flexão e os movimentos de alongamento e pulsação do tubo são praticamente inexistentes. O comprimento de captura do dispositivo é praticamente zero nestas condições. Para períodos menores que $T = 2,1 s$ o comportamento do tubo muda e a sua eficácia na captura de energia aumenta visivelmente. Especificamente para $T = 1,67 s$, o tubo oscila no terceiro modo de flexão com pequena intensidade. Nestas condições o comprimento de captura do dispositivo é máximo ($C_W = 2,7$ diâmetros). O alongamento do tubo é significativo e as ondas de pressão longitudinais começam a ser visíveis. Os movimentos de alongamento do tubo que ocorrem para períodos entre $1,6 s$ e $2 s$ estão relacionados com a proximidade à ressonância da OWC. Quando $T = 1,51 s$, perto da ressonância do tubo distensível, é visível que as ondas de pressão dentro do tubo são

intensas e estão acopladas com o terceiro modo de flexão do tubo. Como já foi referido acima, este é o período em que o comprimento do tubo é aproximadamente metade do comprimento de onda. Finalmente para períodos pequenos ($T = 1,27 s$) o tubo flexa em ressonância, a três quartos do comprimento de onda ($L = 3\lambda/4$).

O comprimento de captura C_W do dispositivo inserido num canal de focagem (configuração C) é seguidamente apresentado na fig. 7.8, em função do período da onda incidente. Numa primeira análise, esta configuração dá lugar a uma melhoria substancial do desempenho do dispositivo. De facto, o comprimento de captura máximo é maior que 1 diâmetro do tubo em praticamente toda a gama de períodos testados e maior que 1,5 diâmetros do tubo para períodos entre $T = 1,25 s$ e $T = 2 s$. À semelhança da configuração B, para períodos acima de $T = 2,16 s$ o comprimento C_W aproxima-se de zero, independentemente da impedância aplicada no PTO. O comprimento de captura máximo ocorre quando as ondas incidentes têm um período $T = 1,74 s$, atingindo $C_W = 2,96$ diâmetros do tubo para um orifício de diâmetro $d_0 = 25 mm$. É interessante observar que, nestas condições, o comprimento da onda incidente é o dobro do comprimento da planta do fundo inclinado ($X_s = \lambda/2$). Perto do período de sintonização do tubo ($T_1 = 1,48 s$) observa-se um patamar de alto desempenho em que $C_W = 2$ diâmetros do tubo. Neste período as ondas incidentes têm um comprimento que é o dobro do comprimento do tubo. Este patamar em que C_W é aproximadamente igual a 2 diâmetros do tubo estende-se até $T = 1,3 s$, onde as ondas incidentes têm aqui um comprimento $\lambda = X_s$. Simultaneamente, para $T \cong 1,25 s$, o tubo está em ressonância a $3/4$ do comprimento de onda.

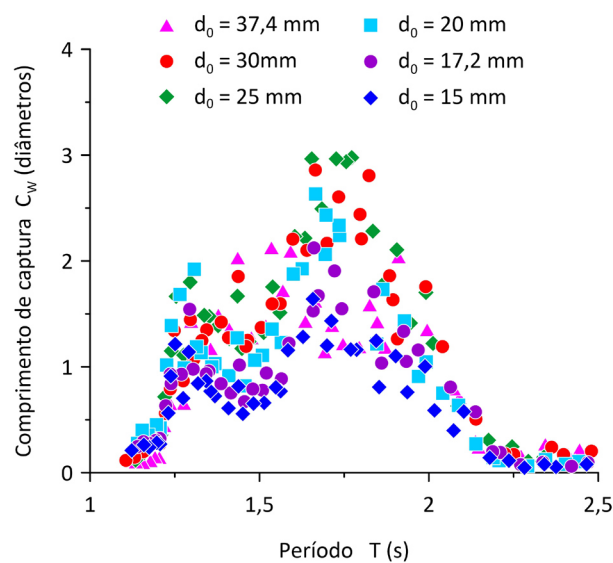


Figura 7.8: Comprimento de captura C_W do dispositivo na configuração C, em função do período da onda incidente T , para todas as impedâncias do PTO testadas.

Uma vez mais, a utilização de uma câmara submersa permitiu observar o comportamento do tubo distensível durante o processo de extracção de energia das ondas incidentes. As fotografias da fig. 7.9 ilustram a dinâmica do tubo distensível incorporado num canal de focagem (configuração C), em quatro períodos importantes. O segundo modo de oscilação do tubo em flexão é dominante para ondas de grande período ($T = 2,25$ s). Dado que o C_W é praticamente zero neste período, poderá dizer-se que este modo de oscilação não contribui significativamente para a absorção de energia pelo dispositivo. Para ondas incidentes de período $T = 1,76$ s, cujo comprimento é o dobro do comprimento da planta do fundo inclinado ($\lambda = 2X_s$), a amplitude das oscilações da OWC é máxima e podem ser observados intensos movimentos de alongamento/retracção do tubo. Nestas condições começa a desenvolver-se um terceiro modo de oscilação do tubo em flexão. Perto da ressonância do tubo ($T = T_1$), as ondas de pressão no tubo são visivelmente intensas e este oscila num terceiro modo de flexão. Recorde-se que o comprimento da onda incidente é o dobro do comprimento do tubo nesta situação. Finalmente, para períodos pequenos ($T = 1,25$ s), o acoplamento de $L = 3\lambda/4$ e $X_s = \lambda$ dá origem a um aumento da intensidade do terceiro modo de oscilação do tubo em flexão e das ondas de pressão no seu interior.

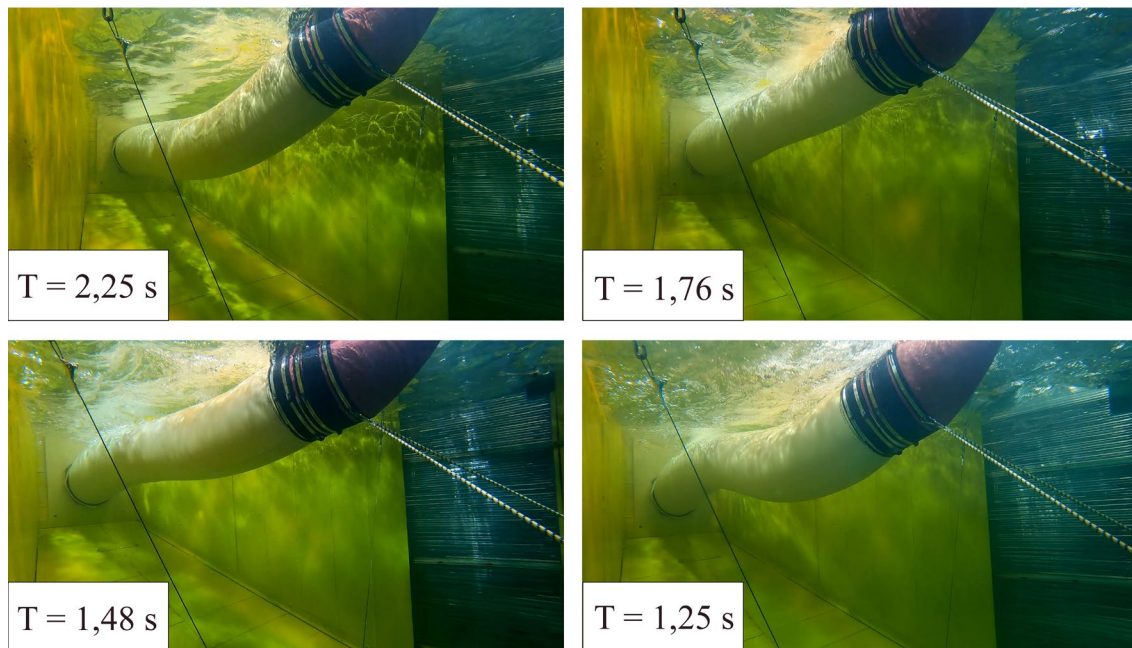


Figura 7.9: Fotografias da resposta do tubo distensível, para o dispositivo na configuração C.

Em suma, os movimentos de alongamento do tubo são dominantes no que toca à sua contribuição para a extracção de energia. O terceiro modo de oscilação do tubo também demonstrou ser importante para manter o comprimento de captura do dispositivo elevado. Por sua vez, as ondas de pressão no tubo necessitam de estar acopladas a pelo menos um

dos outros dois modos de funcionamento do tubo para contribuírem de forma significativa para a extracção de energia.

7.3.3 Comprimento de captura máximo alcançado

Com vista à comparação entre as três configurações A, B e C estudadas, no que diz respeito à eficácia do dispositivo, a fig. 7.10 mostra o comprimento de captura máximo alcançado pelo sistema quando devidamente sintonizado para T_0 e T_1 . Os comprimentos de captura aqui representados para cada configuração correspondem ao C_W máximo obtido com a melhor impedância do PTO testada em cada período das ondas incidentes. Entre $T = 1,5$ s e $T = 2$ s – região onde ocorre a ressonância da OWC –, a inclusão do dispositivo numa barreira vertical (configuração B) resulta num aumento máximo de 35% em C_W , relativamente ao sistema na configuração A. Por sua vez, o canal de focagem (configuração C) dá origem a um aumento de até 48%. Na ressonância do tubo ($T = T_1$), a configuração B tem um comprimento de captura 6% inferior ao da configuração A e o C_W atingido pela configuração C é essencialmente o dobro do atingido pela configuração A. Por razões ainda não inteiramente conhecidas a descida acentuada de C_W observada para a configuração B, em $T = 1,35$ s, não ocorre nas restantes configurações. Para os períodos mais pequenos, abaixo de $T = 1,25$ s, a configuração A é nitidamente superior às restantes. No entanto, nestas condições o sistema sofre da influência das paredes do tanque quando $kb = 2\pi$. Assim sendo, este C_W elevado possivelmente só será atingível por um *array* de dispositivos idênticos, espaçados uma distância b entre si.

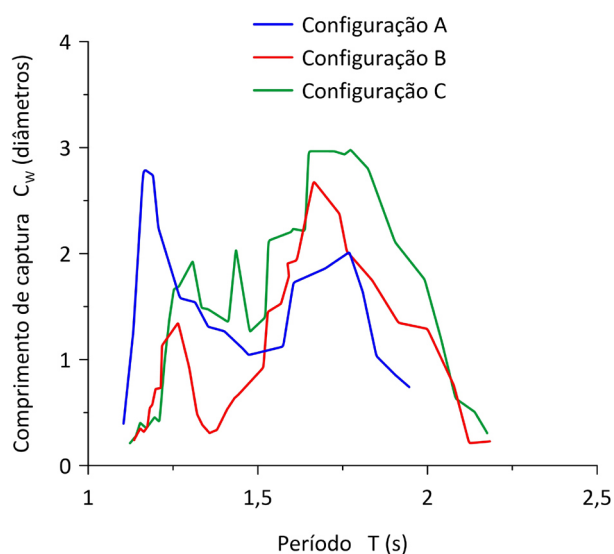


Figura 7.10: Comprimento de captura máximo em função do período das ondas incidentes, para as três configurações estudadas.

7.4 Síntese das principais conclusões

Resumindo agora as principais conclusões extraídas anteriormente, pode dizer-se com segurança que o dispositivo instalado na linha de costa, com ou sem canal de focagem, apresenta uma eficácia sensivelmente maior que o sistema a operar no offshore. Da análise dos vídeos que registam o comportamento do tubo distensível durante o processo de absorção de energia, tornou-se evidente que o sistema actual opera com três graus de liberdade – em flexão, pulsação e alongamento/retracção –, o que garante os elevados comprimentos de captura atingidos numa gama alargada de períodos de onda incidente. Uma particularidade interessante a referir é que, dado que as ondas no offshore têm menor comprimento de onda, o comprimento de tubo necessário para garantir $L = \lambda$ é menor do que se o dispositivo funcionasse com ondulação de fundo, de maior comprimento de onda, junto à costa. Contudo, neste último caso o tubo garante um comprimento de captura elevado para $L = 3\lambda/4$, o que também reduz o comprimento de tubo adequado para funcionar junto à costa. Para ondas de períodos entre 5,6 s e 9 s à escala real, um tubo distensível com 7 m de diâmetro e 34 m de comprimento, a operar num canal de focagem, consegue absorver toda a energia de uma frente de onda de comprimento entre 10 m e 21 m aproximadamente. Para garantir que o dispositivo tenha um comprimento de captura comparável com o C_W máximo que apresenta em condições de sintonização às ondas dominantes, em todos os outros períodos de funcionamento é necessário aplicar uma estratégia de controlo de fase adequada ao sistema.

Capítulo 8

Concepção de um Sistema de Energia das Ondas para os Açores

O dispositivo atenuador de tubo distensível com OWC demonstrou ser capaz de extrair eficazmente energia das ondas do mar, particularmente no contexto do clima de ondas que se observa no Grupo Ocidental do Arquipélago dos Açores. A investigação realizada permite extrair importantes conclusões que são indispensáveis ao projecto e implantação de um dispositivo à escala real, nas ilhas do Corvo e Flores. Esta actividade pode ser enquadrada no Programa Operacional Açores 2030 – Direcção Regional do Planeamento e Fundos Estruturais (2022) –, que avalia o contexto político-económico dos Açores e identifica oportunidades relevantes para o desenvolvimento da energia das ondas na região. Antes de lançar as bases para a concepção de um dispositivo à escala real, o levantamento do potencial das ondas anteriormente efectuado com base no KNMI ERA-40 é aqui actualizado a partir dos dados do projecto CLIMAAT [A.8.1]. É neste capítulo apresentado um layout do dispositivo, em conjunto com uma previsão do seu desempenho e capacidade instalada à escala real, quando este opera nas condições de mar previstas. As limitações de operacionalidade e impacto ambiental são aspectos relevantes que são igualmente discutidos.

8.1 O sistema electroprodutor dos Açores

A rede eléctrica da Região Autónoma dos Açores distribui actualmente electricidade por 130 235 consumidores, alimentando os 242 201 habitantes da região. Em 2022 a produção de energia termoeléctrica representou 64,9% da produção total. Dos 35,1% restantes, 21% teve origem em fontes geotérmicas, 4,2% correspondeu a produção hídrica, 8,3% correspondeu a produção eólica, 1,2% foi obtido a partir de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos), 0,3% foi solar e 0,1% proveio do biogás (EDA, 2023). Do total de energia produzida 44,2% foi consumida em comércio e serviços, 36,4% foi consumo doméstico e 16,7% foi consumo industrial. Os relatórios EDA (2021, 2023) e EDA Renováveis (2021) permitem caracterizar em pormenor o complexo electroprodutor actual do arquipélago.

No grupo Oriental do Arquipélago, constituído pelas ilhas de Santa Maria e São Miguel, a produção de electricidade é bastante diversificada. O sistema electroprodutor da ilha de Santa Maria é constituído por duas centrais termoeléctricas a gás, um parque eólico e uma central fotovoltaica. Em 2022 a Central Termoeléctrica do Aeroporto, com 6,9 MW, foi responsável por 87,4% da produção de electricidade. Por seu lado o Parque Fotovoltaico do Aeroporto de 600 KW, que foi inaugurado em 2020, produziu 4,3% do total da energia eléctrica produzida na ilha. O parque eólico do Figueiral de 1,5 MW produziu, por sua vez, 8% do total de energia eléctrica no ano 2022. Finalmente, os restantes 0,3% dizem respeito a microprodução fotovoltaica e a gás. Quanto à ilha de São Miguel, o seu sistema electroprodutor é o maior do arquipélago e compreende as seguintes centrais: a central termoeléctrica a fuel-óleo do Caldeirão com 98,1 MW; as centrais geotérmicas do Pico Vermelho com 13 MW e da Ribeira Grande com 16,6 MW; 7 centrais hídricas – Tambores (0,1 MW), Canário (0,4 MW), Foz da Ribeira Quente (0,8 MW), Ribeira da Praia (0,8 MW), Nova (0,6 MW), Túneis (1,7 MW) e Salto do Cabrito (0,7 MW); o parque eólico dos Graminhais com 9 MW; as centrais a biogás da Agraçor com 0,8 MW e Musami com 1 MW. No período de Janeiro a Dezembro de 2022 a produção termoeléctrica constituiu 56% da produção total de electricidade. A segunda maior fatia da produção correspondeu às centrais geotérmicas, que produziram 33,4% do total. A restante produção dividiu-se pelas centrais hídricas (6,1%), pelo parque eólico dos Graminhais (3,6%), biogás (0,1%) e microprodução.

O sistema electroprodutor da ilha Terceira, que pertence ao grupo Central, é constituído pela central Termoeléctrica de Belo Jardim (58,1 MW), pela central geotérmica do Pico Alto (4,7 MW), por 3 centrais hídricas – Nasce D'Água (0,7 MW), Cidade (0,3 MW) e

S. João de Deus (0,4 MW) – e pelo parque eólico da Serra do Cume (9 MW). As centrais termoeléctricas foram responsáveis por 69,8% da produção total de electricidade em 2022, enquanto a central geotérmica do Pico Alto e o parque eólico da Serra do Cume contribuíram com 9,7% e 10,4%, respectivamente. As centrais hídricas produziram apenas 0,8% do total nesse ano. Na ilha da Graciosa, ainda no grupo Central, a produção de electricidade é garantida pela central termoeléctrica a gás da Graciosa (4,7 MW) e por produção industrial eólica e fotovoltaica. Em 2022 a central termoeléctrica foi responsável por 42,5% da produção na ilha. É de notar que a produção industrial eólica e fotovoltaica, fora da gestão directa da EDA, foi respectivamente responsável por 50,5% e 6,9% da produção neste período. Nas restantes 3 ilhas do grupo Central a produção eléctrica é maioritariamente feita a partir de combustíveis fósseis. Na ilha de S. Jorge cerca de 91,6% da produção foi garantida pela central termoeléctrica a gás do Caminho Novo (8,2 MW), sendo que o parque eólico do Pico da Urze (1,8 MW) satisfaz apenas 8,2%. Os restantes 0,2% dizem respeito a microprodução fotovoltaica. Na ilha do Pico 90,4% da produção é devida à central a fuel óleo do Pico (16,8 MW), sendo que o único outro produtor relevante foi o parque de energia eólica Terras do Canto (2,4 MW), que satisfaz 9,6% da produção. Finalmente, na ilha do Faial a central termoeléctrica de Santa Bárbara (19,1 MW) foi responsável por 89,1% da produção eléctrica. Dos restantes 10,9%, o parque eólico do Salão (4,3 MW) satisfaz 10,4% e a central hídrica do Varadouro (0,3 MW) correspondeu a 0,4%.

Focando em seguida a atenção no grupo Ocidental, que é de especial interesse para o presente trabalho, a produção é maioritariamente termoeléctrica e hídrica na ilha das Flores. Em 2022 52,3% da produção foi conseguida pela central a gás das Flores (3,7 MW) e 42% pela central hídrica de Além Fazenda (1,6 MW). A central eólica da Boca da Vereda (0,6 MW) contribuiu ainda com 5,7%. Na ilha do Corvo, a mais pequena do arquipélago, a central termoeléctrica do Corvo (0,9 MW) é responsável por 97,8% da produção eléctrica. Os restantes 2,2% dizem respeito ao parque fotovoltaico do Pão de Açúcar (0,1 MW). No entanto, como se verá na próxima secção, existe uma forte motivação política para alterar este paradigma.

8.2 Programa operacional Açores 2020-2030

O programa Operacional Açores 2030 (POA 2030) – Direcção Regional do Planeamento e Fundos Estruturais (2022) – é um programa participado pelos fundos Europeus FEDER e FSE+, para funcionar no período entre 2021 e 2027. O programa tem

um envelope financeiro de 1140 milhões de euros e apresenta objectivos/prioridades de investimento orientados para crescimento económico inteligente, fomento do emprego qualificado, coesão social, mobilidade enquanto pilar da coesão económica e social, sustentabilidade ambiental e resiliência às alterações climáticas. Neste programa salienta-se o potencial da Região Autónoma dos Açores ao nível da exploração científica e económica, em particular no domínio marítimo. Complementarmente, é também dada ênfase à sua grande capacidade de gerar valor e emprego através da exploração sustentável de recursos endógenos diferenciados. Os investimentos previstos pelo POA 2030 na investigação e desenvolvimento das diferentes áreas de interesse justifica-se pela escassez de avanços tecnológicos do tecido empresarial que foi verificada no período entre 2014 e 2020. Muito dependente de investimentos públicos, sempre limitados por natureza, o tecido empresarial dos Açores não atingiu os níveis de inovação necessários para o desenvolvimento de novos produtos, processos e serviços.

O aproveitamento da energia das ondas insere-se precisamente num dos cinco princípios orientadores da estratégia Regional definidos na Resolução do Concelho do Governo nº 207/2021, de 17 de Agosto. Concretamente, o Objectivo Político 2 (OP2) pretende promover a sustentabilidade ambiental, a resiliência às alterações climáticas, a prevenção de riscos, a produção energética a partir de fontes endógenas e sustentáveis e a protecção dos ecossistemas regionais em articulação com o desenvolvimento da economia do sector primário. Saliente-se que o OP2 representa uma fatia de 17% da dotação financeira total do POA 2030.

Neste contexto o projecto e instalação de um dispositivo de aproveitamento de energia das ondas nos Açores poderá ser inserido na prioridade de investimento PI2.2 (promover energias renováveis) ou PI2.5 (Promover o acesso à água e gestão sustentável da água). A prioridade de investimento PI2.2, que corresponde a 0,4% do orçamento do POA, tem o objectivo de reduzir os custos de importação de combustíveis fósseis para a produção de energia eléctrica, estimulando a produção regional a partir de recursos endógenos renováveis. Uma das tipologias de acção desta prioridade é de especial interesse para o presente estudo, pois incide exactamente no investimento em projectos-piloto de produção de energia eléctrica proveniente de marés, ondas e correntes marítimas, bem assim como na sua ligação à rede. Alternativamente, o dispositivo ora estudado também pode ser utilizado para dessalinizar água do mar. Neste caso o desenvolvimento e instalação de um dispositivo deste tipo insere-se na PI2.5, que compreende 3,9% do orçamento do POA. Esta prioridade de investimento visa sobretudo fomentar projectos de construção e melhoria de infraestruturas de abastecimento de água ou descarbonização dos sistemas já existentes, entre outros.

8.3 Dados do projecto CLIMAAT

O projecto CLIMAAT – Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos –, que foi desenvolvido no âmbito da iniciativa comunitária INTERREG_III, tem como programa o desenvolvimento de metodologias de abordagem do estudo da meteorologia e do clima das regiões insulares atlânticas [A.8.1]. Em simultâneo, o projecto visa recolher e compilar a informação climática relevante destas regiões. Para isso foram instaladas 6 bóias ondógrafo (Bond 1 a 6), espalhadas pelo arquipélago dos Açores conforme mostra a fig. 8.1. Estas bóias fornecem medições diárias de altura de onda significativa, altura máxima, período médio, período máximo, período da onda de máxima altura e direcionalidade das ondas. De especial interesse para o presente trabalho são os dados obtidos pela bóia Bond 3, localizada ao largo da Ilha das Flores.



Figura 8.1: Localização das 6 bóias ondógrafo do Projecto CLIMAAT.

Os valores recolhidos do CLIMAAT permitem validar as previsões que foram anteriormente apresentadas com base no KNMI ERA-40 Wave Atlas. Como exemplo de condições extremas, durante a passagem da depressão Kamiel – de 27/02/2023 a 28/02/2023 – a altura significativa das ondas medidas pela bóia A esteve compreendida entre 2,87 m e 4,12 m, com um período médio de 7,2 s no dia 27/02 e 8,45 s no dia 28/02.

A onda mais alta que foi medida teve uma altura de 7,03 m, com um período de 14,1 s. Comparativamente, durante os dias que seguiram a tempestade (01-03-2023 a 06-03-2023) a altura significativa das ondas esteve entre 2,52 m e 3,37 m, com um período médio de 6,8 s. Desta vez a onda mais energética tinha uma altura significativa de 4,5 m, com um período de 8,6 s.

Como referido em §1, as previsões obtidas a partir do KNMI ERA-40 Wave Atlas indicam que o clima de ondas no Grupo Ocidental do Arquipélago dos Açores é caracterizado por ondas com uma altura significativa entre 1 e 5 m e um período médio de entre 4 e 8 s. As medições do Projecto CLIMAAT para os dias entre 01-02-2023 a 06-03-2023 estão compreendidas nesta gama. No entanto, como seria de esperar, as previsões não são representativas das condições extremas verificadas durante a passagem de tempestades. Como tal, estudos complementares sobre a resiliência do dispositivo a condições extremas são ainda necessários.

8.4 Dispositivo atenuador de tubo distensível à escala real

As previsões de comprimento de captura obtidas durante o presente trabalho indicam que o dispositivo atenuador de tubo distensível com OWC deverá operar junto à costa, preferencialmente num canal de focagem.

8.4.1 Vantagens da sua implantação junto à costa

Uma das vantagens da implantação do dispositivo junto à costa é a sua acessibilidade. Este aspecto não é de somenos importância, uma vez que os diferentes sistemas a instalar estarão sujeitos a uma manutenção e controlo dos equipamentos frequente. É também sabido que a dispersão da direcção de incidência das ondas é menor junto à costa, facto que é de extrema importância para dispositivos do tipo atenuador. A Fig. 8.2 mostra a evolução da perda de potência entre águas profundas e restritas, em função do potencial energético das ondas e períodos (Folley & Whittaker, 2009). Estes resultados foram obtidos para uma inclinação do leito oceânico de 1:100, que pode ser considerada

típica para a plataforma continental Europeia. A título de exemplo, nestas condições e considerando uma potência incidente de 70 kW/m , espera-se uma redução de 10% na transição de águas profundas para pouco profundas. Adicionalmente, para esta potência incidente e declives batimétricos mais elevados como os encontrados em ambiente insular, esta redução deverá ser ainda menor.

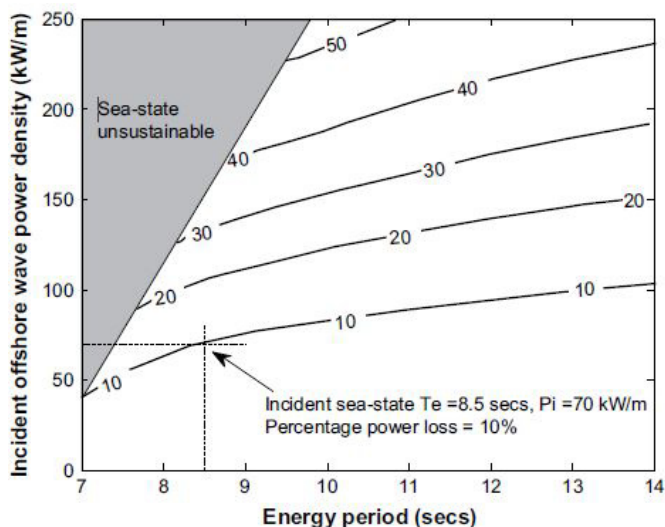


Figura 8.2: Perda de potência percentual na transição de offshore para a linha da costa.
Fonte: Folley e Whittaker (2009).

Adicionalmente, a operação junto à costa permite explorar possíveis locais de instalação na sombra da ilha, onde o sistema está mais protegido contra condições climáticas extremas. A título de exemplo a fig. 8.3 mostra as previsões de altura significativa das ondas em redor do Grupo Ocidental do Arquipélago dos Açores, para o dia 28 de Fevereiro de 2023 aquando da passagem da depressão Kamiel. Nestas condições tempestuosas, é talvez de considerar localizar o dispositivo a Sudeste das ilhas, em vez de tentar aproveitar o potencial máximo das ondas que incidem de Noroeste.

A opção de instalar o dispositivo junto à costa ou até mesmo na costa, dá ainda a possibilidade de o incorporar em estruturas pré-existentes do tipo quebra-mar. Isto permitiria reduzir consideravelmente os custos de investimento inicial, bem assim como partilhar os custos operacionais entre as entidades gestoras do porto e do dispositivo. Convém ainda referir que sendo as ilhas dos Açores de origem vulcânica, à excepção de Santa Maria, as fundações do dispositivo serão necessariamente menos profundas. Outra forma de tornar este tipo de dispositivos mais atractivos economicamente é evitar os custos associados com a construção do canal de focagem e aproveitar a ocorrência de zonas de concentração naturais perto da costa. A central piloto Pico OWC – Falcão (2000) –, localizada em Porto Cachorro na ilha do Pico, é disto exemplo. A linha de costa nessa zona

apresenta diversas reentrâncias, com paredes praticamente verticais, proporcionando profundidades mínimas de entre 6 m e 8 m mesmo junto à costa.

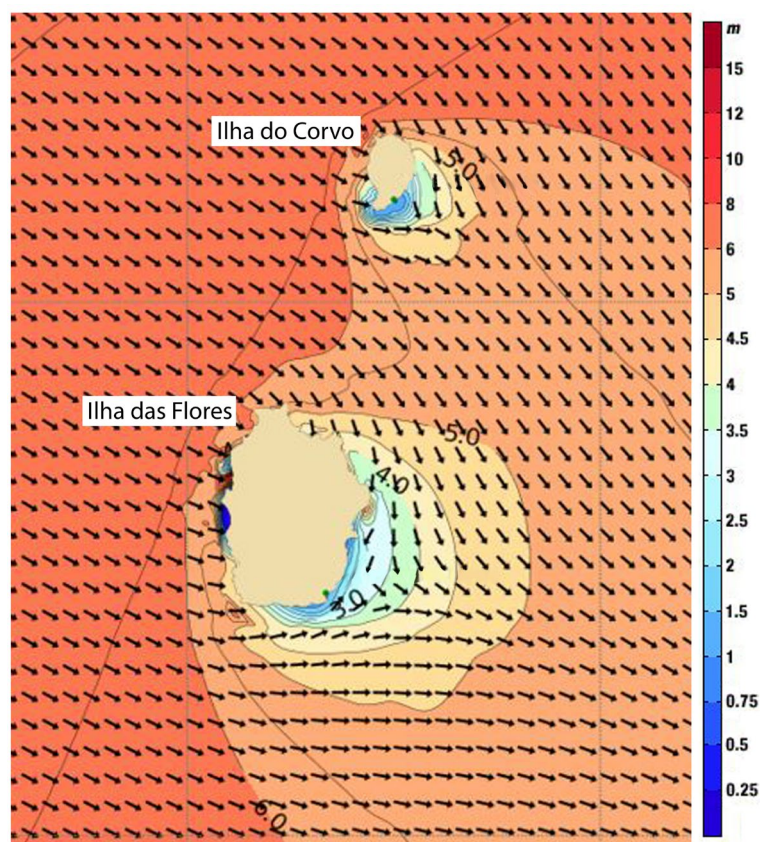


Figura 8.3: Iso linhas de altura de onda significativa no Grupo Ocidental do Arquipélago dos Açores, no dia 28/02/2023.

Fonte: Ref. [A.8.2].

8.4.2 Limitações de operacionalidade e impacto ambiental

A implantação de dispositivos para aproveitamento de energia das ondas tem um inevitável impacto sobre a fisiografia costeira. Para além do impacto visual, as obras a realizar favorecem a erosão costeira e por vezes também afectam os ecossistemas marinhos. Particularmente na Ilha do Corvo, a maior parte das costas Sul, Oeste e Norte da Ilha pertencem à Área Protegida de gestão de Recursos da Costa do Corvo. Nesta área são protegidos arcos, grutas semi-submersas e algumas poças de maré que servem de áreas de maternidade de certas espécies de peixe. Neste contexto, um estudo aprofundado de impacto ambiental é essencial para avaliar a viabilidade de um projecto deste tipo.

Por outro lado, a construção de um quebra-mar para alojar o dispositivo tem de ser também ponderada cuidadosamente. A acumulação de sedimentos na face exterior do quebra-mar, que normalmente seriam depositados na costa da ilha, pode acelerar processos de erosão costeira possivelmente destruindo não só zonas balneares mas também habitats naturais de espécies marinhas. Se a acumulação de sedimentos for excessiva, a topografia do fundo mar pode ainda mudar e alterar as características das ondas incidentes. Esta alteração pode ser prejudicial para o funcionamento do dispositivo de energia das ondas.

Um aspecto importante a ter ainda em conta é o descomissionamento destes sistemas no final da sua vida útil. Um exemplo disto é a central Pico OWC, em Porto Cachorro, que está actualmente em ruína. A EDA parece ter-se demitido da realização da tarefa de descomissionamento da central, o que põe em risco a recuperação deste local para actividade humana e agrava o impacto ambiental na região.

8.4.3 *Layout* do dispositivo num canal de focagem

Para contornar alguns dos inconvenientes anteriormente referidos sobre a implantação do dispositivo de energia das ondas junto à costa, este pode ser incorporado no quebra-mar de um porto concebido para abrigar embarcações pesqueiras. A fig. 8.4 ilustra o protótipo do dispositivo de tubo distensível com OWC incorporado num quebra-mar com canal de focagem. As paredes do canal têm um ângulo de abertura de cerca de 38° e estendem-se ao longo de um fundo com uma inclinação de 30° . A boca do canal de focagem tem uma largura de 38 m, onde a profundidade da água é cerca de 32 m. O fundo inclinado estende-se um pouco para além da boca do canal de focagem, até uma profundidade de 38 m. O tubo distensível com um comprimento de cerca de 34 m, em borracha, está ligado à boca da OWC na parede do quebra-mar. Na outra extremidade o tubo é fechado por um nariz flutuante, ancorado no fundo do mar. O tubo é pressurizado regulando o nível de água na OWC, até o seu diâmetro atingir cerca de 7 m. De acordo com o Instituto Hidrográfico Português (IHP), a amplitude das marés no grupo Ocidental do Arquipélago dos Açores é de 0,5 m a 1,5 m. De acordo com estes valores, a profundidade de imersão do topo da boca da OWC é 1,7 m.

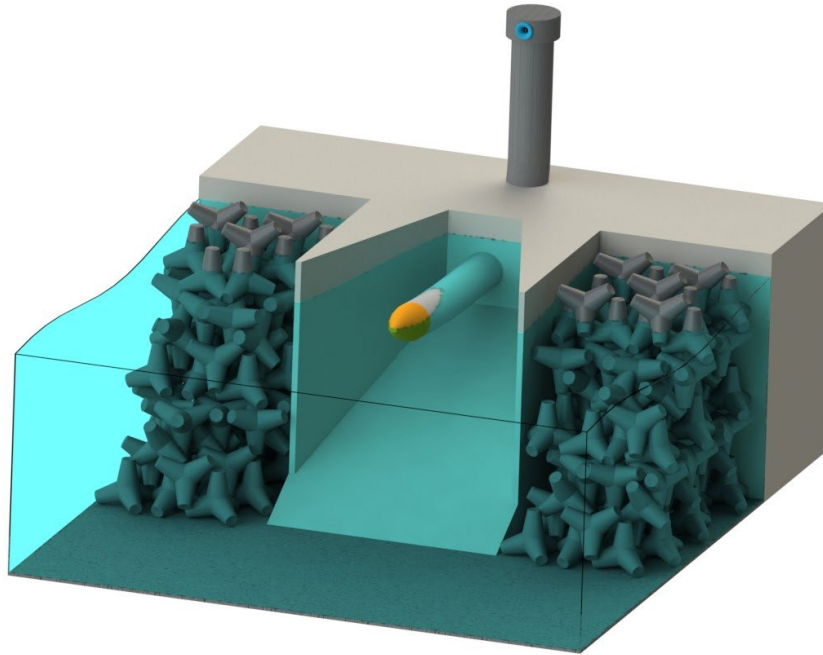


Figura 8.4: Representação do protótipo do dispositivo de tubo distensível com OWC, operando num canal de focagem, incorporados num quebra-mar.

Nas experiências anteriormente realizadas o modelo reduzido à escala 1:20 refere-se às dimensões do tubo. Admitindo agora que as dimensões da câmara pneumática do modelo possivelmente não respeitam as condições de semelhança das forças de compressão na câmara entre o modelo e o protótipo, somos levados a concluir que a estimativa de comprimento de captura do presente dispositivo tenha sido obtida por excesso. Estes aspectos estão sucintamente descritos em Falcão e Henriques (2018). De acordo com as previsões obtidas, assumindo então $C_W > 1,5$ numa perspectiva conservadora, o dispositivo representado na fig. 8.4 pode absorver toda a energia de uma frente de ondas de largura superior a $10,5 m$ para uma gama de períodos de onda incidente $T = 5,6 s - 8,9 s$. Tendo em conta que nas Ilhas do Grupo Ocidental as ondas incidentes cujos períodos variam entre $5 s$ e $8 s$ correspondem a 70% das observações, é de esperar que este C_W seja atingido com regularidade. Recordando que a potência da energia das ondas disponível na ilha do Corvo está entre $50 kW/m - 110 kW/m$ e assumindo $C_W = 1,5$ diâmetros do tubo, uma estimativa preliminar da potência pneumática extraída pela turbina é de $0,53 MW$ a $1,16 MW$. Numa previsão mais ambiciosa, mas ainda abaixo da capacidade máxima do sistema, a potência sobe para $0,7 - 1,54 MW$ se assumirmos que C_W é igual a 2 diâmetros do tubo. Os principais resultados deste estudo estão descritos em Mendes et al. (2022). Nesta extrapolação da potência extraída pelo protótipo é conveniente ter em atenção os efeitos de escala.

8.5 Possíveis aplicações para o Grupo Ocidental do Arquipélago

Duas aplicações possíveis e necessárias nas ilhas do Corvo e Flores são o abastecimento de electricidade à rede local e a dessalinização de água do mar para consumo doméstico. Numa perspectiva mais abrangente poderia ser também equacionada a produção e armazenamento de hidrogénio verde em ilhas de maior dimensão, para a sua utilização em redes de transporte público. Como foi referido anteriormente, a estimativa preliminar da potência pneumática extraída pela turbina é de 0,53 *MW* a 1,16 *MW*. Mesmo aplicando um rendimento de conversão realista a esta potência, tendo em conta que o sistema electroprodutor actual da ilha do Corvo tem uma capacidade instalada inferior a 1 *MW*, este dispositivo poderia alimentar grande parte ou em certas circunstâncias a totalidade do consumo eléctrico da ilha. Em alternativa esta potência poderia ser utilizada para dessalinizar água do mar, de forma semelhante ao que é feito em Porto Santo no Arquipélago da Madeira. Desde 2019, a central dessalinizadora de Porto Santo conta com um conjunto de unidades de produção por Osmose Inversa, com uma capacidade de produção combinada de cerca de 6500 m^3 de água por dia [A.8.3]. O consumo energético total da instalação, sem bombagem para a rede de abastecimento de água potável, é de 3,5 *kW* por m^3 de água produzida. Segundo a ARM (Águas e Resíduos da Madeira), a central foi dimensionada para 2 *MW* [A.8.4]. De acordo com a Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos dos Açores (ERSARA, 2022), em 2022 a rede de abastecimento de água potável da Ilha do Corvo distribuiu em média um volume de 194 m^3/dia a cerca de 430 consumidores. Comparativamente, os Municípios das Lajes das Flores e Santa Cruz das Flores distribuíram em conjunto 1564 m^3/dia a 3823 consumidores. Assim sendo, um sistema de dessalinização de dimensão consideravelmente menor que o instalado na ilha do Porto Santo seria suficiente para suprir todo o consumo destas ilhas. Em conclusão, o dispositivo atenuador de tubo distensível instalado num canal de focagem deverá ser capaz de alimentar um sistema de abastecimento com as dimensões desejadas para o Grupo Ocidental dos Açores.

8.6 Estimativa da energia a ser produzida pelo dispositivo

Como já foi referido, na Região Autónoma dos Açores mais de metade da produção total de electricidade tem origem em combustíveis fósseis, sendo que as ilhas mais pequenas

dos Grupos Central e Ocidental se apoiam quase exclusivamente na produção termoelétrica. Um protótipo do presente dispositivo de recuperação de energia das ondas utilizando um tubo de 7 m de diâmetro e 34 m de comprimento, equipado com um canal de focagem, pode ser um bom candidato para reduzir esta dependência.

Baseando-nos na extrapolação dos resultados experimentais que foi apresentada por Brito-Melo et al. (1995), para a central do Pico, vamos aplicar uma metodologia semelhante para o caso das ilhas do Grupo Ocidental dos Açores. De acordo com o estudo que foi concluído no presente trabalho, um protótipo do dispositivo a operar junto à costa da ilha do Corvo ou das Flores consegue absorver toda a energia contida numa frente de ondas com uma largura entre 10,5 e 20,6 m ($C_w = 1,5 - 2,96$ diâmetros do tubo). Para esta estimativa assume-se que o dispositivo foi instalado na costa Oeste da ilha e que só consegue utilizar ondas que incidem de W-NW. O clima de ondas ao largo da costa Oeste da ilha do Corvo é então caracterizado por ondas com 5 a 9 s de período, 1 a 5 m de altura e uma potência disponível de cerca de 80 a 110 kW/m (Matos et al., 2015). Podemos aplicar uma perda de energia de 20% na transição entre águas profundas e águas restritas (Folley & Whittaker, 2009). Daqui resulta uma potência disponível junto à costa da ilha de 64 a 88 kW/m. Uma estimativa conservadora para a potência extraída pelo PTO do dispositivo será então de 0,672 MW a 0,924 MW. Segundo os desenvolvimentos recentes de turbinas de ar bi-radiais relatados por Falcão e Henriques (2016), o rendimento médio destas turbinas é de aproximadamente 70%. Ainda segundo Brito-Melo et al. (1995) uma estimativa adequada para o rendimento total do gerador eléctrico é 95%. Desprezando as perdas mecânicas, o rendimento total do sistema será de 67%, o que resulta numa potência eléctrica de 450,24 - 619,08 kW a ser transferida para a rede. Em termos da produção anual de energia eléctrica para abastecimento da comunidade, é necessário determinar primeiro o ciclo de trabalho anual do dispositivo. O número de horas de funcionamento pode ser obtido a partir das previsões do KMNI (Caires et al., 2013 e A.1.1); como as ondas que incidem de Oeste-Noroeste - com períodos de 5 a 9 s e alturas entre 1 a 5 m - representam 23,2% do total de observações, será de esperar que o ciclo de funcionamento do dispositivo seja 2032 horas por ano. Nestas condições, o presente dispositivo consegue fornecer entre 914,9 e 1258 MWh/ano à rede eléctrica local da ilha do Corvo.

Todas estas considerações necessitam ainda de ser confirmadas a partir do factor de capacidade que é normalmente assumido para este tipo de dispositivos. Segundo Magagna et al. (2016), o factor de capacidade para as tecnologias do tipo OWC é de 25%. Tendo em conta que todas as ondas que incidem na costa Oeste da ilha do Corvo de entre Sul e Norte - com períodos de 5 a 9 s e 1 a 5 m de altura - representam 61,37% do total de observações

do atlas KNMI (Caires et al., 2013 e A.1.1), o ciclo de trabalho do dispositivo será então de 5376 horas por ano. Consequentemente, a potência eléctrica emitida para a rede seria neste caso de 168 – 231 *kW* e a energia fornecida à rede é de 903 – 1242 *MWh/ano*.

Capítulo 9

Conclusão Geral

O embargo das nações Árabes ao fornecimento de crude aos países ocidentais que apoiaram a Guerra do Yom-Kippur deu origem à primeira crise petrolífera de 1973. Em consequência deste embargo, os países industrializados investiram no desenvolvimento de novas tecnologias de energia alternativa. Na sequência de um artigo publicado na Nature por Steven Salter, em 1974, a energia das ondas suscitou grande interesse a partir desta data. A segunda crise petrolífera de 1979, que veio na sequência da Revolução Iraniana, deu um novo impulso ao desenvolvimento destas tecnologias.

No contexto da dependência de combustíveis fósseis, é interessante saber um pouco da História da produção eléctrica nas Ilhas do Grupo Ocidental dos Açores. Segundo Canto et al. (2015) a electrificação da ilha do Corvo teve início em 1963, quando o Presidente da Câmara David dos Santos inaugurou a rede de distribuição de baixa tensão na Vila do Corvo. A produção era feita a partir de uma pequena central termoeléctrica monofásica de 17 *kVA*. Em 1968 a central foi ampliada com um segundo gerador termoeléctrico de 20 *kVA*. Cerca de 10 anos depois, dada a insuficiente capacidade de produção e a primitiva rede de distribuição, o Governo Regional decidiu em 1978 criar novas instalações eléctricas. Foram instalados dois novos grupos termoeléctricos de 50 *kVA* cada e a rede de distribuição foi renovada. No ano seguinte, como complemento desta renovação, o sistema de iluminação pública foi também melhorado. Quatro anos depois, à medida que o consumo eléctrico foi

aumentando, foram em 1984 instalados dois novos grupos termoelétricos com 106 *kVA* cada. Em 1985 entrou em actividade a Central da Horta da Funda, que dispunha de quatro geradores termoelétricos com uma potência total de 386 *kW*. Esta central esteve em funcionamento até 2007, data em que foi desactivada e substituída pela Central Termoelétrica do Corvo. Esta central, também conhecida como Central do Rego d'água, iniciou o seu funcionamento com dois geradores Perkins com uma potência total de 536 *kW*. A sua capacidade foi desde então aumentada e conta actualmente com cinco grupos geradores cuja potência instalada é de cerca de 0,84 *MW*. A utilização de energias renováveis na Ilha do Corvo teve início apenas recentemente, aquando da instalação do parque fotovoltaico do Pão de Açúcar. Este parque conta com 252 painéis fotovoltaicos de 340 *Wp* cada, totalizando uma potência instalada de 85,7 *kWp*.

A electrificação da Ilha das Flores teve início cerca de 30 anos antes da electrificação da Ilha do Corvo. Em 1937 o Dr. José Faria – um médico natural da Póvoa do Varzim – teve a iniciativa de apresentar uma proposta de electrificação para a Vila das Lajes. Neste contexto foi formada uma sociedade que, um ano mais tarde, inaugurou a Luz Elétrica das Lajes com a instalação de um gerador de 46 *kVA*. Na altura, este gerador era accionado por um velho motor Deutz. O sucesso desta instalação motivou finalmente a integração da Câmara Municipal da Vila das Lajes na iniciativa. Já no Município de Santa Cruz, o impulsionador da sua electrificação foi José Flores na década de 40. Este armador de transportes marítimos e baleeiro foi responsável pela criação da cooperativa Hidroelétrica da Ilha das Flores. Com o objectivo de electrificar a vila de Santa Cruz foi adquirido um alternador de 100 *kVA*, accionado por um motor Deutz, que iniciou a produção em 1948 sob a alçada da Fábrica Baleeira do Boqueirão. Em 1951, um estudo de viabilidade na Ribeira de Além Fazenda concluiu que o aproveitamento hidroelétrico da ribeira seria mais rentável que a criação de uma central térmica. Este estudo motivou a construção da Central Hidroelétrica de Além fazenda, que veio a ser inaugurada em 1967. Esta central híbrida era constituída inicialmente por três geradores hidráulicos de 0,3 *MW* cada, bem como por um grupo termoelétrico de 0,4 *MW*. Esta central foi sendo sucessivamente ampliada ao longo da década de 80 do século XX. Em 1983 foi instalado um 4º grupo hidroelétrico de 0,6 *MW*, seguido de um novo grupo termoelétrico de 0,6 *MW* em 1987. A parte termoelétrica da central foi novamente aumentada em 1989 (em 0,5 *MW*) e em 1991 (em 0,5 *MW*). Em 2002 entrou em actividade o parque Eólico da Vereda, constituído por dois aerogeradores da Enercon de 300 *kW* cada. Em 2011 entra em actividade a Central Termoelétrica das Flores, com dois geradores de 1 *MW* cada. Actualmente toda a produção termoelétrica desta lha é feita nesta central, sendo que a Central de Além Fazenda produz agora energia hídrica apenas.

Apesar das energias renováveis já terem começado a ser introduzidas no grupo Ocidental do Arquipélago, uma grande parte da produção ainda depende de combustíveis fósseis. Isto garante uma boa oportunidade para o desenvolvimento de novas tecnologias que diversifiquem a produção eléctrica destas ilhas, assegurando em simultâneo a sustentabilidade ambiental da região e dando resposta às metas impostas pela União Europeia e Governo Nacional. O presente estudo enquadra-se nestes objectivos. Consiste em desenvolver um dispositivo de tubo distensível destinado à recuperação de energia das ondas, adaptado para operar no Grupo Ocidental do Arquipélago dos Açores, em particular na Ilha do Corvo.

O dispositivo é constituído essencialmente por um tubo de borracha flutuante, cheio de água, que é fechado a montante por um nariz e cuja parte traseira está conectada a uma coluna de água oscilante. As ondas incidentes induzem pulsos de pressão no interior do tubo que, por sua vez, activam as oscilações da coluna de água. Nestes dispositivos a extracção de potência é normalmente realizada por uma turbina de ar acoplada a um gerador eléctrico, sistema que é activado pela pressão numa câmara pneumática induzida pelas oscilações da coluna de água. Ao longo do presente estudo foi desenvolvida uma metodologia original para o cálculo do caudal de ar que atravessa o PTO, baseada no algoritmo de Miller para a determinação do coeficiente de descarga e com base no coeficiente de expansibilidade das normas da ASME. Isto permite tomar em consideração a compressibilidade do ar na câmara pneumática, o que tem particular importância para a determinação rigorosa da potência que é extraída pelo dispositivo. Para pressões altas na câmara pneumática foi observado que ignorar a compressibilidade do ar resulta numa estimativa por excesso do desempenho do dispositivo. Para pressões menores as previsões obtidas resultam por defeito. Assim sendo, o impacto de desprezar a compressibilidade do ar depende significativamente dos valores de impedância impostos pelo PTO. Verificou-se ainda que para impedâncias do PTO elevadas o sistema apresenta comprimentos de captura elevados quando opera com ondas de pequeno período. Ao invés, para ondas de grande período é conveniente reduzir a impedância do PTO por forma a garantir um bom desempenho.

Os principais parâmetros que governam o funcionamento deste sistema são o comprimento, o diâmetro e a espessura do tubo distensível, bem assim como o período natural da OWC. Com base nos ensaios experimentais realizados com dois modelos físicos do dispositivo à escala 1:50 e 1:20, destinados a operar no offshore, sabemos que a máxima eficácia do sistema é alcançada quando o comprimento da onda incidente é igual ao comprimento do tubo e este oscila num terceiro modo de flexão. No entanto, o factor de amplificação da OWC é máximo quando esta opera perto do seu período natural ou próximo do período em que o comprimento de onda é duas vezes o comprimento do tubo. Nestes

períodos ocorre um patamar de elevado comprimento de captura. Entre estes dois máximos, o acoplamento entre a pulsação e a flexão do tubo contribui para o bom desempenho do sistema. Estes mecanismos puderam ser observados durante a realização das experiências através da janela de visualização do tanque hidrodinâmico do Laboratório de Mecânica dos Fluidos. Foi assim demonstrado que, em termos práticos, é vantajoso projectar um tubo cujo comprimento está entre meio comprimento de onda e um comprimento de onda, por forma a aproveitar os três graus de liberdade do tubo em acoplamento com as ressonâncias do sistema. Um tubo demasiado longo funciona essencialmente graças à propagação das ondas de pressão longitudinais induzidas no seu interior. Tubos com um comprimento inferior a metade do comprimento de onda não são adequados para o presente sistema, uma vez que não extraem eficazmente a energia das ondas incidentes.

Por forma a adaptar o dispositivo para operar junto à costa, este deve ser ainda equipado com um canal de focagem que permitirá aumentar consideravelmente o máximo desempenho do sistema e, concomitantemente, alargar a banda de frequências de elevado desempenho. O ensaio experimental desta configuração à escala 1:20 demonstrou que o comprimento de captura do sistema *onshore* é sensivelmente maior que o do sistema a operar no *offshore*. Adicionalmente, o máximo desempenho é neste caso conseguido para ondas de maior período, perto da ressonância da OWC. A utilização de um canal de focagem contribui ainda para alargar a gama de períodos de elevada eficácia. Cumulativamente, a sintonização do dispositivo para operar com ondas de grande comprimento permite que sejam utilizados tubos mais curtos, mas ainda assim capazes de aproveitar os acoplamentos já referidos. Esta escolha leva à diminuição das dimensões do canal de focagem, conduz a uma redução dos custos da instalação e diminui os impactos sobre o tráfego marítimo e ambiental. O sistema deverá preferencialmente ser integrado num porto ou num quebra-mar, por forma a reduzir também os custos de investimento e operacionais da sua instalação, funcionamento e manutenção.

Em tamanho real o tubo terá um diâmetro compreendido entre 7 e 9,5 m, dependendo da pressurização imposta pela OWC. Junto à costa da ilha do Corvo, um tubo com 34 m de comprimento deverá ser adequado e a sua espessura de parede será função do material e da frequência de sintonização pretendida. De acordo com os resultados obtidos, este dispositivo pode operar eficazmente quando sujeito a ondas de 5 s a 9 s de período e 1 a 5 m de altura significativa. Segundo as previsões do atlas de ondas do KNMI, estas condições são representativas do clima observado na costa Oeste da ilha do Corvo, onde a potência disponível é 64 a 88 kW/m. Prevê-se então que o dispositivo seja capaz de fornecer entre 900 e 1200 MWh/ano à rede eléctrica da ilha. Tendo em conta que, segundo o POEE da EDA (EDA, 2022) foram produzidos apenas 1653 MWh para a rede eléctrica do Corvo

durante o ano de 2022, esta estimativa indica que o nosso dispositivo poderá contribuir de forma significativa para a redução da dependência de combustíveis fósseis na ilha do Corvo. Complementarmente, a energia produzida pode também ser utilizada para dessalinização de água do mar para consumo doméstico ou produção de hidrogénio verde.

Finalmente, é importante deixar delineadas algumas direcções para futuros desenvolvimentos do dispositivo atenuador de tubo distensível. As principais vertentes de aprofundamento do estudo aqui apresentado são então: i) a influência do sistema de amarração do nariz do tubo ao fundo do mar sobre o desempenho do dispositivo; ii) o desenvolvimento e aplicação de uma estratégia de controlo de fase para o PTO, com vista à melhoria do desempenho do sistema; iii) a análise das condições de sobrevivência e desempenho do dispositivo em condições extremas, e sob acção de ondas de incidência oblíqua; iv) o desenvolvimento de uma turbina de ar capaz de operar nas condições de pressão/caudal típicas de um sistema desta natureza.

Bibliografia

- Algie, C., Ryan, S., & Fleming, A. (2017). Predicted power performance of a submerged membrane pressure-differential wave energy converter. *International Journal of Marine Energy*, 20, 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2017.09.005>
- Ambli, N., Bønke, K., Malmö, O., & Reitan, A. (1982). The Kvaerner multiresonant OWC. *Proc. of the 2nd International Symposium on Wave Energy Utilization*, 275–296.
- Anderlini, E., Forehand, D., Bannon, E., & Abusara, M. (2017). Reactive control of a wave energy converter using artificial neural networks. *International Journal of Marine Energy*, 19, 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2017.08.001>
- Andrade, C., Pires, H. O., Taborda, R., & Freitas, M. C. (2007). Projecting future changes in wave climate and coastal response in Portugal by the end of the 21st century. *Journal of Coastal Research, Special Issue 50*, 253–257.
<http://www.jstor.org/stable/26481593>
- ASME. (2004). *Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzle and Venturi, ASME MFC-3M-2004, Revision of ASME MFC-3M-1989 (R1995)*. American National Standard issued by the American Society of Mechanical Engineers (ASME). <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/mfc-3m-measurement-fluid-flow-pipes-using-orifice-nozzle-venturi>
- Babarit, A., Wendt, F., Yu, Y.-H., & Weber, J. (2017). Investigation on the energy absorption performance of a fixed-bottom pressure-differential wave energy converter. *Applied Ocean Research*, 65, 90–101.
<https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.03.017>
- Barstow, S. F., Mørk, G., Lønseth, L., Schjølberg, P., Machado, U., Athanassoulis, G., Belibassakis, K., Gerostathis, T., Stefanakos, C., & Spaan, G. (2003). WORLDWAVES: High Quality Coastal and Offshore Wave Data Within Minutes for Any Global Site. *Volume 3: Materials Technology; Ocean Engineering; Polar and Arctic Sciences and Technology; Workshops*, 633–642.
<https://doi.org/10.1115/OMAE2003-37297>

- Bellamy, N. (1982). Development of the SEA Clam wave energy converter. *Proc. of the 2nd International Symposium on Wave Energy Utilization*, 24 pp.
- Bellamy, N. W., Bucchi, A., & Hearn, G. E. (2016). Analysis of the SEA-OWC-Clam wave energy device – Part A: Historical development, hydrodynamic and motion response formulations & solutions. *Renewable Energy*, 88, 220–235.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.032>
- Boccotti, P. (2003). On a new wave energy absorber. *Ocean Engineering*, 30(9), 1191–1200. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(02\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(02)00102-6)
- Boer, K. (1981). *Estimation of Incident and Reflected Wave Characteristics of Perpendicular Wave Action* (Report S 434, Vol. I). The Waterloopkundig Laboratorium, Delft Hydraulics Laboratory.
- Braga, F. P. (2017). *Estudo Preliminar de um Dispositivo para Aproveitamento de Energia das Ondas no Arquipélago dos Açores* [Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electromecânica]. Universidade da Beira Interior.
- Brito-Melo, A., Sarmiento, A. J. N. A., & Gato, L. M. C. (1995). Mathematical Extrapolation of Tank Testing Results: Application to the Azores Wave Pilot Plant. *Proc. of the 2nd European Wave Power Conference, EUR 16932 EN*, 141–147.
<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/42ce1898-f2aa-496e-8d1a-b6a8dd2053a3>
- Bucchi, A., & Hearn, G. E. (2016). Analysis of the SEA-OWC-Clam wave energy device part B: Structural integrity analysis. *Renewable Energy*, 99, 253–269.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.059>
- Budal, K., & Falnes, J. (1977). Optimum operation of improved wavepower converter. *Marine Science Communications*, 3, 133-150.
- Budal, K., & Falnes, J. (1978). *A system for the conversion of sea wave energy* (British patent No.1522661). The Patent Office London.
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/019881706/publication/GB1522661A?q=GB1522661>
- Budal, K., & Falnes, J. (1981). *Apparatus for utilising or absorbing wave energy* (British Patent No. 1587344). The Patent Office London.

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/019883432/publication/GB1587344A?q=gb1587344>

- Budar, K., & Falnes, J. (1975). A resonant point absorber of ocean-wave power. *Nature*, 256(5517), 478–479. <https://doi.org/10.1038/256478a0>
- Caires, S., Sterl, A., Komen, G., & Swail, V. (2013). *Global Wave Climatology Atlas*. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), Ministry of Infrastructure and Environment, De Bilt. http://www.projects.knmi.nl/wave_atlas
- Canto, C. A., Botelho, F., Martins, L. M., & Mendes, N. (2015). *Marcos da Electrificação dos Açores*. Fundação Engº José Cordeiro, Nova Gráfica.
- Chaplin, J. R., Farley, F. J. M., Prentice, M. E., Rainey, R. C. T., Rimmer, S. J., & Roach, A. T. (2007a). Development of the Anaconda all-rubber WEC. *Proc. of the 7th European Wave and Tidal energy Conference*, 13 pp. <https://eprints.soton.ac.uk/53315/>
- Chaplin, J. R., Farley, F. J. M., & Rainey, R. C. T. (2007b). Power Conversion in the Anaconda WEC. *Proc. of the International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, 4 pp. http://www.iwwwfb.org/abstracts/iwwwfb22/iwwwfb22_o8.pdf
- Chaplin, J. R., Farley, F. J. M., Hearn, G. E., Heller, V., & Mendes, A. C. (2010). Hydrodynamic Performance of the Anaconda Wavepower Device. *Proc. of the HYDRALAB III Stakeholder Dissemination Meeting*, 4 pp.
- Chaplin, J. R., Heller, V., Farley, F. J. M., Hearn, G. E., & Rainey, R. C. T. (2012). Laboratory testing the Anaconda. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1959), 403–424. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0256>
- Chaplin, J., Farley, F., Greaves, D., Hann, M., Kurniawan, A., & Cox, M. (2015). Numerical and experimental investigation of wave energy devices with inflated bags. *Proc. of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC)*, 10 pp.
- Choplain, N. (2012). *Interactions of a submerged membrane with water waves and its use in harnessing nearshore wave power* [Thesis submitted in partial fulfilment for the degree of Doctor of Philosophy]. University of Southampton.
- Choplain, N., & Chaplin, J. R. (2012). Use of a Rectangular Liquid-Filled Bottom-Mounted Distensible Device to Harness Nearshore Wave Power. *Proc. of the 22nd International*

- Offshore and Polar Engineering Conference*, ISOPE-I-12-111, 652–658.
<http://publications.isope.org/proceedings/ISOPE/ISOPE%202012/start.htm>
- Cleason, L., Forsberg, J., Rylander, A., & Sjöström, B. O. (1982). Contribution to the theory and experience of energy production and transmission from the buoy-concept. *Proc. of the 2nd International Symposium on Wave Energy Utilization*, 345–370.
- Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Pontes, M.-T., Schild, P., Sjöström, B.-O., Sørensen, H. C., & Thorpe, T. (2002). Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(5), 405–431.
[https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00009-6)
- Cockerell, C., Platts, M. J., & Comyns-Carr, R. (1978). The development of the wave-contouring raft. *Proc. of the Wave Energy Conference*, 7–16.
<http://www.homepages.ed.ac.uk/shs/Wave%20Energy/1978%20Heathrow%20wave%20energy%20conference.pdf>
- Cockerell, C., Gifford, E. W. H., Woolley, M. V., & Platts, M. J. (1981). *Engineering development of the Lancaster flexible bag* (Technical report WP 134, E/5A/CON/1551). Wavepower Limited. <https://era.ed.ac.uk/handle/1842/37389>
- COGEA, & WAVEC. (2018). *Market Study on Ocean Energy: Final Report*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2771/89934>
- Collins, I., Hossain, M., Dettmer, W., & Masters, I. (2021). Flexible membrane structures for wave energy harvesting: A review of the developments, materials and computational modelling approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111478. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111478>
- Comissão Europeia. (2022). *Recomendação da Comissão de 18/05/2022 relativa à aceleração dos procedimentos de concessão de licenças para projetos no domínio da energia renovável e à facilitação dos contratos de aquisição de energia* (Documento C/2022/3219 final). Comissão Europeia. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=PI_COM:C\(2022\)3219](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=PI_COM:C(2022)3219)
- Cordonnier, J., Gorintin, F., De Cagny, A., Clément, A. H., & Babarit, A. (2015). SEAREV: Case study of the development of a wave energy converter. *Renewable Energy*, 80, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.061>

- Cornett, A. M. (2008). A Global Wave Energy Resource Assessment. Proc. of the 18th *International Offshore and Polar Engineering Conference*, 318–326.
<http://publications.isope.org/proceedings/ISOPE/ISOPE%202008/papers/Io8TPC-579Corn.pdf#page=1>
- Count, B. M., & Evans, D. V. (1984). The influence of projecting sidewalls on the hydrodynamic performance of wave-energy devices. *Journal of Fluid Mechanics*, 145(1), 361–376. <https://doi.org/10.1017/S0022112084002962>
- da Silva, J. C. V. F. (2012). A Plataforma Continental Portuguesa – Análise do Processo de Transformação do Potencial Estratégico em Poder Nacional. *Cadernos Navais N^o 43*. Edições Culturais da Marinha. https://www.marinha.pt/pt/a-marinha/estudos-e-reflexoes/cadernos-navais/Documents/cadernosnavais_n43.pdf
- David, D. R., Vallam, S., & Annamalaisy, S. S. (2018). Effect of Harbour Walls on the Efficiency of an Oscillating Water Column. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 144(2), 1–16. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000429](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000429)
- de Sousa Prado, M. G., Gardner, F., Damen, M., & Polinder, H. (2006). Modelling and test results of the Archimedes wave swing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 220(8), 855–868.
<https://doi.org/10.1243/09576509JPE284>
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists* (Vol. 2). World Scientific. <https://doi.org/10.1142/1232>
- Delmonte, N., Barater, D., Giuliani, F., Cova, P., & Buticchi, G. (2015). Review of Oscillating Water Column Converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(2), 1698–1710. <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2490629>
- Deng, Z., Huang, Z., & Law, A. W. K. (2014). Wave power extraction from a bottom-mounted oscillating water column converter with a V-shaped channel. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 470(2167), 20140074. <https://doi.org/10.1098/rspa.2014.0074>
- Direcção Regional do Planeamento e Fundos Estruturais. (2022). *Açores 2030 – Programa Operacional*. Governo dos Açores, Secretaria Regional das Finanças, Planeamento e Administração Pública.

<https://portal.azores.gov.pt/documents/2314045/6c16ec19-79f8-2e8c-9fa6-5e6714db5b9a>

Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. (2009). *Official Journal of the European Union L140*, 52, 16–62.

https://doi.org/10.3000/17252555.L_2009.140.eng

Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. (2018). *Official Journal of the European Union L328*, 61, 83–209. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L:2018:328:TOC>

EDA. (2021). *Caracterização das Redes de Transporte e Distribuição de Energia Eléctrica em 2021*. Electricidade dos Açores.

<https://www.eda.pt/EDA/Paginas/DistribuicaoEnergia.aspx>

EDA. (2022). *Procura e Oferta de Energia Eléctrica POEE 2022*. Electricidade dos Açores.

<https://www.eda.pt/Mediateca/Publicacoes/Producao/Paginas/default.aspx>

EDA. (2023). *Procura e Oferta de Energia Eléctrica – Dezembro de 2022*. Electricidade dos Açores.

<https://www.eda.pt/Mediateca/Publicacoes/Producao/Paginas/Produ%C3%A7%C3%A3o-de-Energia-El%C3%A9trica.aspx>

EDA Renováveis. (2021). *Plano Plurianual e Orçamento 2022-2026*. Electricidade dos Açores.

<https://www.eda.pt/GrupoEda/Paginas/FichaEmpresaEDARENOVAVEIS.aspx>

ERSARA. (2022). *Relatório Anual 2022 – Controlo da Qualidade da Água para Consumo Humano*. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos. https://servicos-sraa.azores.gov.pt/grastore/ERSARA/RACQACH_2022.pdf

European Commission. (2022). *REPower Plan, Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions* (Document 52022DC023). European Commission.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483>

- Evans, D. V., & Porter, R. (1997). Efficient Calculation of Hydrodynamic Properties of OWC-Type Devices. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 119(4), 210–218. <https://doi.org/10.1115/1.2829098>
- Faedo, N., Olaya, S., & Ringwood, J.V. (2017). Optimal control, MPC and MPC-like algorithms for wave energy systems: An overview. *IFAC Journal of Systems Control*, 1, 37–56. <https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2017.07.001>
- Falcão, A. F. de O. (2000). The shoreline OWC wave power plant at the Azores. *Proc. of the 4th European Wave Energy Conference*, Paper B1, 7 pp.
- Falcão, A. F. de O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 899–918. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.003>
- Falcão, A. F. de O., & Justino, P. A. P. (1999). OWC wave energy devices with air flow control. *Ocean Engineering*, 26(12), 1275–1295. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(98\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(98)00075-4)
- Falcão, A. F. O., & Henriques, J. C. C. (2016). Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renewable Energy*, 85, 1391–1424. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.086>
- Falcão, A. F. O., & Henriques, J. C. C. (2018). The Spring-Like Air Compressibility Effect in OWC Wave Energy Converters: Hydro-, Thermo- and Aerodynamic Analyses. *Proc. of the 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Volume 11A. <https://doi.org/10.1115/OMAE2018-77096>
- Falcão, A. F. O., Sarmiento, A. J. N. A., Gato, L. M. C., & Brito-Melo, A. (2020). The Pico OWC wave power plant: Its lifetime from conception to closure 1986–2018. *Applied Ocean Research*, 98, 102104. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102104>
- Falnes, J. (2002). Optimum Control of Oscillation of Wave-Energy Converters. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 12(2). ISSN 1053-5381. <http://publications.isope.org/journals/journalJune02.htm>
- Falnes, J. (2007). A review of wave-energy extraction. *Marine Structures*, 20(4), 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2007.09.001>

- Falnes, J. & Budal, K. (1978). Wave power conversion by point absorbers. *Norwegian Maritime Research*, 6(4), 2–11.
- Farley, F. J. M. (1982). Wave energy conversion by flexible resonant rafts. *Applied Ocean Research*, 4(1), 57–63. [https://doi.org/10.1016/S0141-1187\(82\)80022-9](https://doi.org/10.1016/S0141-1187(82)80022-9)
- Farley, F. J. M. (2011). The free floating clam – a new wave energy converter. *Proc. of the 9th European Wave and Tidal Energy Conference*, 5–9.
- Farley, F. J. M. (2012). *Free floating bellows wave energy converter* (British patent N. GB2488185). UK Intellectual Property Office. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/043881373/publication/GB2488185A?q=GB2488185>
- Farley, F. J. M. (2014). *Wave power converter* (British patent N. GB2532074). UK Intellectual Property Office. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/052118212/publication/GB2532074A?q=GB2532074A%20Wave%20power%20converter>
- Farley, F. J. M. (2018). The underwater resonant airbag: a new wave energy converter. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 474(2215), 20170192. <https://doi.org/10.1098/rspa.2017.0192>
- Farley, F. J. M., & Rainey, R. C. T. (2006a). *Distensible Tube Wave Energy Converter* (British patent N. GB2434840). The Patent Office London. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/036101064/publication/GB2434840A?q=GB2434840>
- Farley, F. J. M., & Rainey, R. C. T. (2006b). Radical Design Options for Wave-profiling Wave Energy Converters. *Proc. of the 21st International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, 4 pp. http://www.iwwwfb.org/abstracts/iwwwfb21/iwwwfb21_15.pdf
- Farley, F. J. M., Rainey, R. C. T., & Chaplin, J. R. (2012). Rubber tubes in the sea. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1959), 381–402. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0193>
- Folley, M., Whittaker, T., & Osterried, M. (2004). The Oscillating Wave Surge Converter. *Proc. of the 14th International Offshore and Polar Engineering Conference, Paper*

No. 2004-JSC-377, 189–193.

[http://publications.isope.org/proceedings/ISOPE/ISOPE%202004/Table%20of%20Contents%20\(toc\).pdf](http://publications.isope.org/proceedings/ISOPE/ISOPE%202004/Table%20of%20Contents%20(toc).pdf)

Folley, M., & Whittaker, T. J. T. (2009). Analysis of the nearshore wave energy resource. *Renewable Energy*, 34(7), 1709–1715. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.01.003>

French, M. J. (1979a). *Water wave energy conversion device using flexible membranes* (United States patent N. US4164383A). U.S. Patent and Trademark Office. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/010168464/publication/US4164383A?q=US4164383A>

French, M.J. (1979b). A generalized view of resonant energy transfer. *Journal Mechanical Engineering Science*, 21(4), 299-300. https://doi.org/10.1243/JMES_JOUR_1979_021_047_02

Garcia-Rosa, P.B., Kulia, G., Ringwood, J.V., & Molinas, M. (2017). Real-Time Passive Control of Wave Energy Converters Using the Hilbert-Huang Transform. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 14705–14710. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2502>

Garrett, J. K., Witt, M. J., Blondel, P., & Johanning, L. (2017). Statistical Assessment of the Effect of a Wave Energy Converter in Falmouth Bay, UK. *Proc. of the 4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition*, 8 pp. <https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/statistical-assessment-of-the-effect-of-a-wave-energy-converter-i>

Gato, L. M. C., Henriques, J. C. C., & Carrelhas, A. A. D. (2022). Sea trial results of the biradial and Wells turbines at Mutriku wave power plant. *Energy Conversion and Management*, 268, 115936. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115936>

Greaves, D., Hann, M., Kurniawan, A., Chaplin, J., & Farley, F. (2016). The Hydrodynamics of Air-Filled Bags for Wave Energy Conversion. *Proc. of the International Conference on Offshore Renewable Energy*, 12–14. https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/251425967/The_hydrodynamics_of_air_filled_bags_for_wave_energy_conversion.pdf

Guenther, D.A., Jones, D., & Brown, D.G. (1979). An investigative study of a wave-energy device. *Energy*, 4(2), 299–306. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(79\)90129-4](https://doi.org/10.1016/0360-5442(79)90129-4)

- Hagen, G. (1978). *Wave driven generator* (United States patent N. US4077213A). U.S. Patent and Trademark Office.
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/024639087/publication/US4077213A?q=US4077213A>
- Hawthorne, W. R. (1961). The Early Development of the Dracone Flexible Barge. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 175(1), 52–83.
https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1961_175_011_02
- Henriques, J. C. C., Falcão, A. F. O., Gomes, R. P. F., & Gato, L. M. C. (2013). Latching Control of an Oscillating Water Column Spar-Buoy Wave Energy Converter in Regular Waves. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 135(2): 021902. <https://doi.org/10.1115/1.4007595>
- IRENA. (2021). Offshore Renewables: An Action Agenda for Deployment. *International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jul/IRENA_G20_Offshore_renewables_2021.pdf?rev=9e3ad6549dd44dc9aaaaedae16b747bb
- Isaacs, J. D., & Seymour, R. J. (1973). The ocean as a power resource. *International Journal of Environmental Studies*, 4(1–4), 201–205.
<https://doi.org/10.1080/00207237308709563>
- Korde, U.A. (1991). A power take-off mechanism for maximising the performance of an oscillating water column wave energy device. *Applied Ocean Research*, 13(2), 75–81.
[https://doi.org/10.1016/S0141-1187\(05\)80064-1](https://doi.org/10.1016/S0141-1187(05)80064-1)
- Korde, U.A. (1995). Control strategies for oscillating water column wave energy devices. *Proc. of the 2nd European Wave Power Conference*, 260–267.
<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/42ce1898-f2aa-496e-8d1a-b6a8dd2053a3>
- Kurniawan, A., Greaves, D., Hann, M., & Chaplin, J. (2014). Multi-resonant compressible wave energy devices. *Proc. of the 29th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, 4 pp.
http://www.iwwwfb.org/Abstracts/iwwwfb29/iwwwfb29_30new.pdf
- Kurniawan, A., & Greaves, D. (2015). Broad-banded wave power absorption with submerged balloons. *Proc. of 2nd Offshore Energy and Storage Symposium*.

<https://vbn.aau.dk/en/publications/broad-banded-wave-power-absorption-with-submerged-balloons>

- Kurniawan, A., & Greaves, D. (2016). Wave power absorption by a submerged balloon fixed to the sea bed. *IET Renewable Power Generation*, *10*(10), 1461–1467. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2016.0044>
- Kurniawan, A., Chaplin, J. R., Greaves, D. M., & Hann, M. (2017a). Wave energy absorption by a floating air bag. *Journal of Fluid Mechanics*, *812*, 294–320. <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.811>
- Kurniawan, A., Chaplin, J. R., Hann, M. R., Greaves, D. M., & Farley, F. J. M. (2017b). Wave energy absorption by a submerged air bag connected to a rigid float. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *473*(2200), 20160861. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0861>
- Kurniawan, A., Brown, S., Forehand, D., & Wolgamot, H. (2021). Wave–Structure Interactions of Flexible Bags with Elastic Tendons: Application to Wave Energy Conversion. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, *147*(1), 04020045. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000607](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000607)
- Lehmann, M., Elandt, R., Pham, H., Ghorbani, R., Shakeri, M., & Alam, M.-R. (2013). An artificial seabed carpet for multidirectional and broadband wave energy extraction: Theory and Experiment. *Proc. of the 10th European Wave & Tidal Energy Conference*, 8pp. <https://taflab.berkeley.edu/wp-content/uploads/2015/12/742-Marcus-Lehmann.pdf>
- Leighton, S., Algie, C., & Ryan, S. K. (2021). *Wave energy conversion/convertors* (United States patent N. US10883471B2). United States Patent and Trademark Office. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/059684687/publication/US10883471B2?q=US10883471B2>
- Leijon, M., Boström, C., Danielsson, O., Gustafsson, S., Haikonen, K., Langhamer, O., Strömstedt, E., Stålberg, M., Sundberg, J., Svensson, O., Tyrberg, S., & Waters, R. (2008). Wave Energy from the North Sea: Experiences from the Lysekil Research Site. *Surveys in Geophysics*, *29*(3), 221–240. <https://doi.org/10.1007/s10712-008-9047-x>

- Lewis, T. (1999). A strategic review of the wave energy resource in Ireland – Wave energy moving towards commercial viability. *Institution of Mechanical Engineers (IMECHE) Seminar*.
- Lighthill, J. (1978). *Waves in Fluids*. Cambridge University Press.
- Lighthill, J. (1979). Two-dimensional analyses related to wave-energy extraction by submerged resonant ducts. *Journal of Fluid Mechanics*, 91(2), 253–317.
<https://doi.org/10.1017/S0022112079000148>
- Magagna, D. (2018). *Ocean Energy: Technology Development Report* (EUR 29907 EN, JRC118296). Publications Office of the European Union.
<https://doi.org/10.2760/250140>
- Magagna, D. (2020). *Ocean Energy Technology Development Report 2020 (JRC123159)*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/81693>
- Magagna, D., Monfardini, R., & Uihlein, A. (2016). *JRC Ocean Energy Status Report: 2016 Edition* (EUR 28407 EN, JRC104799). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/509876>
- Malmö, O., & Reitan, A. (1986). Development of the Kvaerner Multiresonant OWC. *Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization, International Union of Theoretical and Applied Mechanics*, (pp. 57–67). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-82666-5_4
- Manasseh, R., McInnes, K. L., & Hemer, M. A. (2017). Pioneering developments of marine renewable energy in Australia. *The International Journal of Ocean and Climate Systems*, 8(1), 50–67. <https://doi.org/10.1177/1759313116684525>
- Mansard, E. P. D., & Funke, E. R. (1980). The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Squares Method. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(17), 8.
<https://doi.org/10.9753/icce.v17.8>
- Maria-Arenas, A., Garrido, A. J., Rusu, E., & Garrido, I. (2019). Control Strategies Applied to Wave Energy Converters: State of the Art. *Energies*, 12(16), 3115.
<https://doi.org/10.3390/en12163115>

- Martins-Rivas, H., & Mei, C. C. (2009). Wave power extraction from an oscillating water column at the tip of a breakwater. *Journal of Fluid Mechanics*, 626, 395–414.
<https://doi.org/10.1017/S0022112009005990>
- Masuda, Y. (1971). Wave-activated generator. *Proc. of the International Colloquium on the Exposition of the Oceans*.
- Masuda, Y. (1979). Experimental full-scale results of wave power machine Kaimei in 1978. *Proc. of the 1st Symposium on Wave Energy Utilization*, 349–363.
- Masuda, Y., Yamazaki, T., Outa, Y., & McCormick, M. E. (1988). The backward bend duct buoy-an improved floating type wave power device. *Proc. of OCEANS '88: A Partnership of Marine Interests*, 3, 1067–1072.
<https://doi.org/10.1109/OCEANS.1988.23663>
- Matos, A., Madeira, F., Fortes, C. J. E. M., Didier, E., Poseiro, P., & Jacob, J. (2015). Wave Energy at Azores Islands. *Proc. of the 7th International Short Course and Conference on Applied Coastal Research*, 12 pp.
https://www.researchgate.net/publication/301553602_Wave_Energy_at_Azores_Islands
- McCormick, M. E., Murthagh, J., & McCabe, P. (1998). Large-scale experimental study of a hinged-barge wave energy conversion system. *Proc. of the 3rd European Wave Energy Conference*, 215–222.
- McIver, P., & Evans, D. V. (1988). An approximate theory for the performance of a number of wave-energy devices set into a reflecting wall. *Applied Ocean Research*, 10(2), 58–65. [https://doi.org/10.1016/S0141-1187\(88\)80032-4](https://doi.org/10.1016/S0141-1187(88)80032-4)
- McNatt, J. C., Özkan-Haller, H. T., Morrow, M., & Delos-Reyes, M. (2014). Preliminary Modeling and Analysis of a Horizontal Pressure Differential Wave Energy Converter. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 136(1), 011901.
<https://doi.org/10.1115/1.4025437>
- Mehlum, E. (1986). TAPCHAN. *Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization* (pp. 51–55). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-82666-5_3
- Mehlum, E., & Stannes, J. (1979). Power production based on focusing of ocean swells. *Proc. of the First Symposium on Wave Energy Utilization*, 29–35.

- Mendes, A. C., & Monteiro, W. M. L. (2007). Energy-Loss Assessment for OWC Wave Power Systems in Off-Design working Conditions. *Proc. of the 17th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE-I-07-009*, 401–406. <http://publications.isope.org/proceedings/ISOPE/ISOPE%202007/toc.htm>
- Mendes, A. C., Paredes, L. M. A., Gil, F. A. S., & Chaplin, J. R. (2014). Small-Scale Model Tests of a Rubber-Tube Wave Energy Converter With Pneumatic Power Take-Off. *Proc. of the 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Volume 9A: Ocean Renewable Energy*, paper OMAE2014-23452, 10 pp. <https://doi.org/10.1115/OMAE2014-23452>
- Mendes, A. C., Braga, F. P., Paredes, L. M. A., & Chaplin, J. R. (2017). Performance Assessment of the Anaconda WEC in Regular Waves at 1:50 Model Scale. *Proc. of the 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Volume 10: Ocean Renewable Energy*, paper OMAE2017-61478, 10 pp. <https://doi.org/10.1115/OMAE2017-61478>
- Mendes, A. C., Braga, F. P., & Chaplin, J. R. (2020). Wavetank Tests With a 1:20 Scale Model of a Distensible Tube Device for Wave Power Harnessing in the Azores. *Proc. of the 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Volume 9: Ocean Renewable Energy*, paper OMAE2020-18176, 10 pp. <https://doi.org/10.1115/OMAE2020-18176>
- Mendes, A. C., Braga, F. P., & Chaplin, J. R. (2023). Performance of a Distensible-Tube Wave Attenuator in a Slender Focusing Channel. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 9, 745–766. <https://doi.org/10.1007/s40722-023-00297-8>
- Mendes, R., Calado, M., & Mariano, S. (2018). Maximum Power Point Tracking for a Point Absorber Device with a Tubular Linear Switched Reluctance Generator. *Energies*, 11(9), 2192. <https://doi.org/10.3390/en11092192>
- Miller, R. W. (1996). *Flow Measurement engineering Handbook*. McGraw-Hill Publications.
- Mollison, D. (1986). Wave Climate and the Wave Power Resource. *Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization* (pp. 133–156). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-82666-5_11

- Mollison, D., & Pontes, M. T. (1992). Assessing the Portuguese wave-power resource. *Energy*, 17(3), 255–268. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(92\)90053-3](https://doi.org/10.1016/0360-5442(92)90053-3)
- Mora-Figueroa, V. O., Olivares, C. H., Holmes, B., & O’Hagan, A. M. (2011). *Catalogue of Wave Energy Test Centres*. (Grant Agreement IEE/O9/809/SI2.558291 [1/10/2010 - 30/09/2013], 4/11/2010 SOWFIA Streamlining of Ocean Wave Farms Impact Assessment). Intelligent Energy Europe. https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/D2.1_Catalogue_of_Wave_Energy_Test_Centres.pdf
- Mørk, G., Barstow, S., Kabuth, A., & Pontes, M. T. (2010). Assessing the Global Wave Energy Potential. *Proc. of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Volume 3*, 447–454. <https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20473>
- Nielsen, K., & Smed, P. F. (1998). Point absorber—optimization and survival testing. *Proc. of the 3rd European Wave Energy Conference*, 207–214.
- Nielsen, K.M., Pedersen, T.S., Andersen, P., & Ambühl, S. (2017). Optimizing Control of Wave Energy Converter with Losses and Fatigue in Power Take off. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 14680–14685. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2497>
- Ocean Energy Systems. (2021). *Wave Energy Developments Highlights*. International Energy Agency. <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/oes-brochures/document/wave-energy-developments-highlights/>
- Ogata, T., Washio, Y., Osawa, H., Tsuritani, Y., Yamashita, S., & Nagata, Y. (2002). The Open Sea Tests of the Offshore Floating Type Wave Power Device “Mighty Whale”: Performance of the Prototype. *Proc. of the 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 4*, paper OMAE2002-28335, 517–524. <https://doi.org/10.1115/OMAE2002-28335>
- Ohneda, H., Igarashi, S., Shinbo, O., Sekihara, S., Suzuki, K., & Kubota, H. (1991). Construction procedure of a wave power extracting caisson breakwater. *Proc. of the 3rd Symposium on Ocean Energy Utilization*, 171–179.
- Orphin, J., Fleming, A., & Algie, C. (2017). Physical scale model testing of a flexible membrane wave energy converter: Videogrammetric analysis of membrane operation. *International Journal of Marine Energy*, 20, 135–150. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2017.09.004>

- Pires, H. N. O., & Pessanha, L. E. V. (1986). Wave Power Climate of Portugal. *Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization* (pp. 157–167). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-82666-5_12
- Platts, W. J. (1979). The development of the wave contouring raft. *Proc. of the International Conference on Future Energy Concepts, A79-37842 15-44*, 160–163.
- Pontes, M. T. (1998). Assessing the European Wave Energy Resource. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, *120*(4), 226–231. <https://doi.org/10.1115/1.2829544>
- Pontes, M. T., Aguiar, R., & Oliveira Pires, H. (2005). A Nearshore Wave Energy Atlas for Portugal. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, *127*(3), 249–255. <https://doi.org/10.1115/1.1951779>
- Portillo, J. C. C., Henriques, J. C. C., Gato, L. M. C., & Falcão, A. F. O. (2023). Model tests on a floating coaxial-duct OWC wave energy converter with focus on the spring-like air compressibility effect. *Energy*, *263*(A), 125549. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125549>
- Ravindran, M., & Koola, P. M. (1991). Energy from sea waves—the Indian wave energy programme. *Current Science*, *60*(12), 676–680. <http://www.jstor.org/stable/24093688>
- Reader-Harris, M. (2015). *Orifice Plates and Venturi Tubes*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16880-7>
- Renzi, E., Michele, S., Zheng, S., Jin, S., & Greaves, D. (2021). Niche Applications and Flexible Devices for Wave Energy Conversion: A Review. *Energies*, *14*(20), 6537. <https://doi.org/10.3390/en14206537>
- República Portuguesa. (2019). *Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030)*. República Portuguesa. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/pt_final_necp_main_pt_o.pdf
- República Portuguesa, Fundo Ambiental, & Agência Portuguesa do Ambiente. (2019). *Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050, Estratégia de Longo Prazo para a Neutralidade Carbónica da Economia Portuguesa em 2050 (Documento R 262/2019)*. República Portuguesa. <https://www.portugal.gov.pt/download->

ficheiros/ficheiro.aspx?v=%3d%3dBAAAAB%2bLCAAAAAAABACzMDexAAAutgem
BAAAAA%3d%3d

- Rusu, L., & Guedes Soares, C. (2012). Wave energy assessments in the Azores islands. *Renewable Energy*, 45, 183–196. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.02.027>
- Ryan, G. L., & Ryan, S. K. (2017). *Wave energy conversion* (United States patent N. US9797367). United States Patent and Trademark Office.
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/050101103/publication/US9797367B2?q=US9797367>
- Salter, S. H. (1974). Wave power. *Nature*, 249(5459), 720–724.
<https://doi.org/10.1038/249720a0>
- Salter, S.H. (1979). Power conversion systems for ducks. *Proc. of the International Conference on Future Energy Concepts, Institution of Electrical Engineers*, Publication 171, pp. 100-108.
<https://era.ed.ac.uk/bitstream/handle/1842/23670/1979%20Power%20conversion%20systems%20for%20Ducks.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Salter, S.H. (1980). *Apparatus for extracting power from waves on water*. (British patent N. GB1571790A). The Patent Office London.
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/009735787/publication/GB1571790A?q=GB1571790A>
- Salter, S. H. (1986). Progress on Edinburgh Ducks. *Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization* (pp. 35–50). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-82666-5_2
- Salter, S. (2016). Wave energy: Nostalgic Ramblings, future hopes and heretical suggestions. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2(4), 399–428.
<https://doi.org/10.1007/s40722-016-0057-3>
- Salter, S.H., Jeffery, D.C. & Taylor J.R.M. (1976). The architecture of nodding duck wave power generators. *The Naval Architect*, pp. 21-24.
<http://dx.doi.org/10.7488/era/693>
- Simões, A., Juliano, M., & Barcelos, E. (2010). Evaluation of Wave Energy Potential in The Azores Region. *Green Islands Azores*.

- Smith, W. H. F., & Sandwell, D. T. (1997). Global Sea Floor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings. *Science*, 277(5334), 1956–1962.
<https://doi.org/10.1126/science.277.5334.1956>
- SRMCT. (2014). *Estratégia Marinha para a subdivisão dos Açores - Diretiva Quadro Estratégia Marinha*. Secretaria Regional dos Recursos Naturais.
<https://www.dgrm.mm.gov.pt/as-pem-diretiva-quadro-estrategia-marinha>
- Tapoglou, E., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Ince, E., Shtjefni, D., Joanny Ordonez, G., Eulaerts, O., & Grabowska, M. (2022). *Ocean Energy in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets* (Report JRC130617). Clean Energy Technology Observatory, Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/162254>
- Tedd, J., Kofoed, J. P., Knapp, W., Friis-Madsen, E., & Sørensen, H. C. (2006). Wave Dragon: prototype wave power production. *Proc. of the 9th World Renewable Energy Congress: WREC IX*, 6 pp. <https://vbn.aau.dk/en/publications/wave-dragon-prototype-wave-power-production>
- The Queen’s University of Belfast. (2002). *Islay Limpet Wave Power Plant* (Contract JOR3-CT98-0312). Funded in part by the European Commission.
https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Islay_LIMPET_Report.pdf
- Torre-Enciso, Y., Ortubia, I., de Aguilera, L. I. L., & Marqués, J. (2009). Mutriku Wave Power Plant: from the thinking out to the reality. *Proc. of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, 11 pp.
https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Torre-Enciso_et_al_2009.pdf
- Tseng, R.-S., Wu, R.-H., & Huang, C.-C. (2000). Model study of a shoreline wave-power system. *Ocean Engineering*, 27(8), 801–821. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(99\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(99)00028-1)
- Wang, L., Isberg, J., & Tedeschi, E. (2018). Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: the wave-to-wire approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(1), 366–379.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.074>

Weber, J., Mouwen, F., Parish, A., & Robertson, D. (2009). Wavebob – Research & Development Network and Tools in the Context of Systems Engineering. *Proc. of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, 416–420.
[http://www.homepages.ed.ac.uk/shs/Wave%20Energy/EWTEC%202009/EWTEC%202009%20\(D\)/papers/207.pdf](http://www.homepages.ed.ac.uk/shs/Wave%20Energy/EWTEC%202009/EWTEC%202009%20(D)/papers/207.pdf)

Whittaker, T. J. T., & Stewart, T. P. (1993). An Experimental Study of Nearshore and Shoreline Oscillating Water Columns with Harbors. *Proc. of the 1993 European Wave Energy Symposium, Paper D2*.

Websites consultados:

[A.1.1] http://www.projects.knmi.nl/wave_atlas [acedido em 16/07/2019]

[A.1.2] <https://www.visitportugal.com/pt-pt/node/195437>

[A.1.3] <https://www.wri.org/data/world-greenhouse-gas-emissions-2016> [acedido em 05/04/2023]

[A.1.4] <https://www.ocean-energy-systems.org/oes-projects/levelised-cost-of-energy-assessment-for-wave-tidal-and-otec-at-an-international-level/> [acedido em 05/04/2023]

[A.1.5] <https://www.seapower.ie/cost-of-energy/> [acedido em 05/04/2023]

[A.1.6] https://portugal.edp.com/sites/default/files/2021-05/Dados_Ibericos_2019.pdf [acedido em 05/04/2023]

[A.2.1] <https://era.ed.ac.uk/handle/1842/37397> [acedido em 28/03/2023];

[A.2.2] <https://cordis.europa.eu/project/id/JOU20283> [acedido em 28/03/2023];

[A.2.3] <https://oceanenergy.ie/oe12/> [acedido em 28/03/2023];

[A.2.4] <https://kymaner.com/cores-owc-fp7/> [acedido em 27/03/2023];

[A.2.5] <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/oceanlinx-mk1> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.6] <https://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.7] <http://enp.pt/servicos/outros-projectos/pelamis/> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.8] <https://crestwing.dk/> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.9] <https://awsocan.com/2022/04/aws-wavesing-gets-shakedown-at-emec/> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.10] <https://aw-energy.com/waveroller/> [acedido em 05/04/2023]

- [A.2.11] <https://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/aquamarine-power/> [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.12] <https://wavedragon.net/> [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.13] https://ramboll.com/projects/re/aquamarine_oyster2 [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.14] <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/marmok-5-wave-energy-converter> [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.15] <https://kymaner.com/opera-h2020/> [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.16] <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/mutriku-wave-power-plant> [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.17] <https://www.idom.com/proyecto/prototipo-wec-marmok-a-5-2/> [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.18] <https://seabased.com/seabased-wave-power-parks> [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.19] <https://seabased.com/news-insights/seabased-signs-100-mw-wave-power-plant-contract-with-ghana> [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.20] <https://www.ecowavepower.com/gibraltar/> [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.21] <https://www.waves4power.com/> [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.22] <https://www.40southenergy.it/> [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.23] <https://oceanpowertechnologies.com/platform/opt-pb3-powerbuoy/> [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.24] <https://www.offshore-energy.biz/wello-deploys-penguin-wave-energy-device-off-spain/> [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.25] <https://www.ecowavepower.com/our-technology/intellectual-property/> [acedido em 05/04/2023]
- [A.2.26] <https://wello.eu/the-penguin-2/> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.27] <https://aw-energy.com/news/portugal-takes-a-step-closer-to-commercial-wave-energy/> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.28] <https://corpowersocean.com/projects/> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.29] <https://corpowersocean.com/corpower-c4-wec-at-quayside-launchpad/> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.30] <https://awsocan.com/multi-cell-wave-power/> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.31] <https://kymaner.com/bombora-mwave/> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.32] <https://bomborawave.com/mwave/> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.33] <https://www.m3wave.com/home> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.34] <https://www.sbmoffshore.com/> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.35] <https://taflab.berkeley.edu/uc-berkeley-ocean-wave-energy-converter/> [acedido em 05/04/2023]

[A.2.36]

https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-tr1_en.pdf [acedido em 05/04/2023]

[A.8.1] <http://www.climaat.angra.uac.pt/> [acedido em 05/04/2023]

[A.8.2] <https://www.ipma.pt/pt/maritima/hs/index.jsp?area=acores-west> [acedido em 05/04/2023]

[A.8.3] https://arm.pt/wp-content/uploads/2022/05/CDPS40_Brochura_vjan23.pdf [acedido em 04/04/2023]

[A.8.4]

<http://www.aguasdmadeira.pt/Portals/o/Documentos/Instala%C3%A7%C3%B5es/Dessalinizadora.pdf> [acedido em 09/09/2022]

ANEXO A

Histogramas bivariados

Tabela A.1: Histograma bivariado de altura significativa de onda em função da direcção de incidência na região Lat: 27°N - 45°N, Long: 18°W - 36°W.
 Fonte: Ref. [A.1.1].

Direcção		% de observações a cada H_s [m]															Total [%]
Graus	Pontos Cardeais	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	11 - 12	12 - 13	13 - 14	14 - 33	
0 - 45	N - NE	4,2	55,4	29,5	8,1	2,1	0,6	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	100
45 - 90	NE - E	6,2	60,5	24,5	6,9	1,6	0,3	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	100
90 - 135	E - SE	8,2	52,4	25,1	9,6	3,3	1,0	0,2	0,1	0	0	0	0	0	0	0	100
135 - 180	SE - S	4,6	38,0	29,6	16,9	7,2	2,4	0,9	0,2	0	0	0	0	0	0	0	100
180 - 225	S - SO	2,7	26,6	26,9	21,9	12,7	5,5	2,5	0,9	0,3	0,1	0	0	0	0	0	100
225 - 270	SO - O	2,5	27,1	25,5	19,7	12,4	6,8	3,5	1,6	0,6	0,2	0	0	0	0	0	100
270 - 315	O - NO	2,9	32,9	29,5	17,2	8,9	4,4	2,3	1,0	0,5	0,2	0	0	0	0	0	100
315 - 360	NO - N	3,1	41,9	33,1	13,7	5,2	1,8	0,7	0,3	0,1	0	0	0	0	0	0	100

Tabela A.2: Histograma bivariado de período médio de onda em função da direcção de incidência na região Lat: 27°N - 45°N, Long: 18°W - 36°W.
Fonte: Ref. [A.1.1].

Direcção		% de observações a cada T_m [s]												Total [%]
Graus	Pontos Cardeais	0 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	11 - 12	12 - 13	13 - 33	
0 - 45	N - NE	0	0,1	10,2	28,0	32,3	19,3	7,6	2	1	0	0	0	100
45 - 90	NE - E	0	0,1	17,0	42,4	31,1	8,0	1,4	0	0	0	0	0	100
90 - 135	E - SE	0	0,1	11,3	39,8	37,0	9,8	1,9	0	0	0	0	0	100
135 - 180	SE - S	0	0,3	12,4	34,5	32,9	15,3	3,8	1	0	0	0	0	100
180 - 225	S - SO	0	0,2	10,3	28,8	33,7	19,0	6,4	1	0	0	0	0	100
225 - 270	SO - O	0	0,1	6,5	20,7	30,1	23,9	12,9	5	1	0	0	0	100
270 - 315	O - NO	0	0	2,5	11,0	22,9	25,2	20,2	12	5	1	0	0	100
315 - 360	NO - N	0	0	2,3	11,0	24,3	27,9	20,0	10	4	1	0	0	100

ANEXO B

Análise de reflexão com 3 sondas

Algoritmo de análise de reflexão por meio de três sondas de nível – método de Mansard e Funke (1980).

Este método para a separação das ondas incidente e reflectida, que é descrito em Mansard e Funke (1980), baseia-se da medição do deslocamento da superfície livre em três pontos colineares paralelamente à direcção de propagação das ondas. Em primeiro lugar é determinado o período e comprimento de onda dos sinais medidos pelas três sondas. São para isso encontrados os picos de cada sinal e o período é tomado como o tempo médio entre cada par de picos, ao longo de todo registo. Um pico é definido como sendo o ponto que é mais alto que os seus vizinhos durante pelo menos 0,3 s. Esta hipótese é aceitável, dado que as ondas geradas no tanque hidrodinâmico têm períodos entre 1 e 2 s. Uma vez conhecido o período $T = 2\pi/\omega$ de cada registo, o comprimento de onda λ pode então ser obtido a partir da média dos três períodos resolvendo a *relação de dispersão*:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (\text{B.1})$$

onde $k = 2\pi/\lambda$ é o número de onda. Esta equação foi resolvida iterativamente pelo método de Newton.

É em seguida aplicado o método FFT aos sinais das três sondas por forma a obter o espectro de amplitudes de cada sinal A_1 , A_2 e A_3 , bem assim como o espectro da fase em relação à origem de cada sinal α_1 , α_2 e α_3 . Estes coeficientes de Fourier podem ser representados na forma:

$$B_n = A_n \cos \alpha_n + iA_n \sin \alpha_n \quad , \quad n = 1, 2, 3 \quad (\text{B.2})$$

De modo a simplificar a notação destas equações, foi omitido o facto de estes valores serem função da frequência. Assim sendo, a eq. (B.2) é calculada para todas as frequências do espectro.

Os espectros de amplitudes das ondas incidente reflectida são extraídos a partir do seguinte conjunto de equações, onde intervêm os espaçamentos x_{12} e x_{13} entre a primeira e segunda sonda e entre a primeira e terceira sonda, respectivamente.

$$\beta_{12} = \frac{2 \pi x_{12}}{\lambda} \quad (\text{B.3})$$

$$\gamma_{13} = \frac{2 \pi x_{13}}{\lambda} \quad (\text{B.4})$$

$$Db = 2 (\sin^2 \beta_{12} + \sin^2 \gamma_{13} + \sin^2[\gamma_{13} - \beta_{12}]) \quad (\text{B.5})$$

$$R_1 = \sin^2 \beta_{12} + \sin^2 \gamma_{13} \quad (\text{B.6})$$

$$Q_1 = \sin^2 \beta_{12} \cos^2 \beta_{12} + \sin^2 \gamma_{13} \cos^2 \gamma_{13} \quad (\text{B.7})$$

$$R_2 = \sin \gamma_{13} \sin(\gamma_{13} - \beta_{12}) \quad (\text{B.8})$$

$$Q_2 = \sin \gamma_{13} \cos(\gamma_{13} - \beta_{12}) - 2 \sin \beta_{12} \quad (\text{B.9})$$

$$R_3 = -\sin \beta_{12} \sin(\gamma_{13} - \beta_{12}) \quad (\text{B.10})$$

$$Q_3 = \sin \beta_{12} \cos(\gamma_{13} - \beta_{12}) - 2 \sin \gamma_{13} \quad (\text{B.11})$$

$$A_I = \frac{1}{Db} (B_1[R_1 - iQ_1] + B_2[R_2 - iQ_2] + B_3[R_3 - iQ_3]) \quad (\text{B.12})$$

$$A_R = \frac{1}{Db} (B_1[R_1 + iQ_1] + B_2[R_2 + iQ_2] + B_3[R_3 + iQ_3]) \quad (\text{B.13})$$

As séries temporais das ondas incidente e reflectida são recreadas a partir da soma das sinusóides com amplitudes e frequências determinadas pelos espectros A_I e A_R . Em alternativa pode ser tomada a amplitude fundamental do espectro como representativa da amplitude real. A comparação dos resultados obtidos das duas formas resultou em diferenças inferiores a 1%, tendo portanto sido adoptada a amplitude fundamental nas experiências realizadas.