



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Faculdade de Engenharia

Estudo Preliminar de um Dispositivo para Aproveitamento de Energia das Ondas no Arquipélago dos Açores

Francisco Pavão Braga

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletromecânica

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor António Carlos Mendes

Covilhã, outubro de 2017

Enquadramento

O presente trabalho vem 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”, co-financiado pela União Europeia/FEDER no âmbito do Programa Operacional Factores de Competitividade COMPETE.

Covilhã, Setembro de 2017.



Agradecimentos

O presente trabalho foi desenvolvido no fluidslab da Universidade da Beira Interior. Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais pelo seu apoio moral e financeiro, sem o qual este trabalho teria sido impossível de realizar. Agradeço também ao Professor António Mendes pela ajuda e orientação na execução deste trabalho, assim como ao Técnico de Laboratório António Morgado pela sua perícia e disponibilidade na montagem experimental ensaiada. Finalmente, agradeço ao ex-aluno de mestrado Luís Paredes pela sua ajuda nos ensaios experimentais.

Resumo

O presente trabalho trata do estudo do dispositivo de recuperação de energia das ondas ANACONDA quando este utiliza um sistema de conversão de potência pneumático e turbina de ar. Antes do estudo do dispositivo propriamente dito, efetuámos um levantamento consistente do clima de ondas nos Açores. As amplitudes e comprimentos de onda no arquipélago são favoráveis à utilização da energia das ondas para fins domésticos, através da ligação à rede elétrica da EDA. Neste âmbito procedeu-se ao ensaio de um modelo do dispositivo ANACONDA á escala 1:50. O modelo do dispositivo tem como corpo principal um tubo de latex com 2,44 m de comprimento e um diâmetro de 18,9 cm. Este tubo é conectado a um sistema de extração de potência (PTO) pneumático. Para simular a impedância da turbina de ar que equipará o protótipo, utilizámos uma descarga de ar para a atmosfera através de um orifício. Foram testados orifícios de diferentes diâmetros. O modelo foi ensaiado no tanque hidrodinâmico do *fluidslab*, para uma gama de frequências entre 0,51 e 0,95 Hz e amplitudes de onda entre 6,4 e 22,4 cm. Estas condições são representativas das ondas de período entre 5 e 13 s que caracterizam o clima de ondas do mar dos Açores. Nesta campanha de ensaios foram efetuadas medições da altura das ondas no tanque, do deslocamento da superfície livre dentro do sistema PTO e da pressão dentro da câmara pneumática. Os dados recolhidos permitiram fazer estimativas do caudal turbinado, da potência extraída e do rendimento do sistema. A análise do seu desempenho permite enfim obter algumas conclusões sobre a viabilidade da sua utilização na ilha do Corvo.

Palavras-chave

Energia das Ondas, Dispositivo ANACONDA, Sistema PTO Pneumático, Ensaios em tanque de ondas, Arquipélago dos Açores

Abstract

The present work concerns the study of the ANACONDA wave energy conversion device when using a pneumatic power take-off and a turbo-generator set. Firstly, a consistent evaluation of the wave climate in the Azorean region was made. The wave amplitudes and wavelengths in the Archipelago are favorable for wave energy utilization for domestic use, via the connection to the EDA electrical grid. As such, a model of the ANACONDA device, at a 1:50 scale, was tested. The model is comprised of a long rubber tube, 2.44 m long with a diameter of 18.9 cm. The tube is assembled to a pneumatic PTO. In order to simulate the impedance of the air turbine to be installed in the prototype, an orifice plate was used as the interface for the discharge to the atmosphere. Several orifices of different diameters have been tested. The model was tested in the hydrodynamic tank of the *fluidslab* for waves with a frequency range of 0.51 - 0.95 Hz and wave amplitudes of 6.4 - 22.4 cm. These conditions are representative of the 5 - 13 s waves observed in the Azorean sea. In these tests, the wave amplitude in the tank, the water level displacement in the shaft and the pressure inside the pneumatic chamber were measured. The data obtained allowed us to estimate the nominal air flow rate through the orifice, the absorbed power and the system's efficiency. Finally, this performance assessment leads to some findings concerning the viability of this device in Corvo island.

Keywords

Wave Energy, ANACONDA Device, Pneumatic PTO, Wave-tank Tests, Azores Archipelago

Índice geral

Lista de símbolos	vii
Lista de figuras	ix
Lista de tabelas	xii
1. Introdução	1
1.1 Custos da energia	2
1.2 As renováveis nos Açores	4
1.3 Objetivos gerais do trabalho	7
2. Potencial da energia das ondas	11
2.1 Potencial a nível global	11
2.2 Potencial no litoral Europeu	15
2.3 Potência disponível no Arquipélago dos Açores	17
3. Tecnologias de extração	20
3.1 Protótipos comerciais em desenvolvimento	20
3.2 O dispositivo ANACONDA	31
3.3 Zonas de teste em Portugal	32
4. Ensaios experimentais realizados com a ANACONDA	35
4.1 Modelo físico do dispositivo	35
4.2 Sistema de extração de potência	37
4.3 Campo de ondas gerado no canal	39
4.4 Frequências naturais e de sintonização	40
5. Análise do desempenho do dispositivo	43
5.1 Potência absorvida	43
5.2 Rendimento do dispositivo	45
5.3 Efeitos da compressibilidade	46
Conclusão	55
Bibliografia	57
Lista de websites consultados	60

Lista de símbolos

t	Tempo
g	Aceleração gravítica
B	Largura do tanque de ondas
h	Profundidade da água no tanque de ondas
L	Comprimento do tubo de borracha
d	Diâmetro do tubo de borracha
w	Espessura do tubo de borracha
D	Distensibilidade do tubo de borracha
E	Módulo de Young
U	Velocidade da onda dentro do tubo de borracha
ℓ	Comprimento do pistão de água
S	Área da secção transversal do cotovelo
2r	Diâmetro interno da câmara pneumática
A	Área da secção transversal interna da chaminé
h_0	Altura piezométrica na chaminé
η	Deslocamento da superfície da água na chaminé
ρ_1	Massa volúmica da água
ρ	Massa volúmica do ar na câmara pneumática
ρ_0	Massa volúmica do ar à saída do orifício
γ	Razão de calores específicos ($\gamma=1,4$ para o ar)
p	Pressão na câmara pneumática
p_0	Pressão atmosférica
f	Frequência de onda
T	Período de onda
H	Altura de onda
λ	Comprimento de onda
c	Celeridade das ondas

k	Número de onda
f_0	Frequência de ressonância do tubo
T_0	Período de ressonância do tubo
λ_0	Comprimento de onda a f_0
f_1	Frequência natural da OWC
T_1	Período natural da OWC
d_0	Diâmetro do orifício
A_0	Área da secção transversal do orifício
v	Velocidade do escoamento de ar na câmara pneumática
C_d	Coeficiente de descarga
β	Razão de áreas
Q	Caudal volúmico através do orifício
\dot{m}	Caudal mássico através do orifício
P_i	Potência das ondas incidentes
P	Potência média extraída pelo PTO
AF	Fator de amplificação
WC	Comprimento de captura
Re	Número de Reynolds
Re_D	Número de Reynolds para escoamento na câmara pneumática
Re_d	Número de Reynolds para escoamento no orifício
V	Velocidade do pistão de água na chaminé
v_0	Velocidade do escoamento de ar à saída do orifício
n	Razão de pressões
Δp	Diferencial de pressão entre o ambiente e a câmara pneumática
ε	Fator de expansibilidade
μ	Viscosidade dinâmica do ar

Lista de figuras

Figura 1.1 - Representação da localização e batimetria do arquipélago dos Açores. Fonte: Ref. 34 (Smith & Sandwell, 1997).	1
Figura 1.2 - Desenvolvimento do preço de sistemas fotovoltaicos para uso doméstico ao longo da última década. Fonte: Ref. 21 (Jager-Waldau, 2016).	6
Figura 1.3 - Ilha do Corvo, nos Açores.	7
Figura 1.4 - Contornos de profundidade da zona junto à costa da Ilha do Corvo, Açores.	8
Figura 1.5 - Ilha do Corvo e clima de ondas ao largo da costa.	9
Figura 2.1 - Distribuição global do potencial médio bruto da energia das ondas, em águas profundas. Fonte: Ref. 7 (Cornett <i>et al.</i> , 2008).	12
Figura 2.2 - Distribuição global do índice de variabilidade sazonal (SV) da energia das ondas. Fonte: Ref. 7 (Cornett <i>et al.</i> , 2008).	12
Figura 2.3 - Redução da densidade de potência utilizável (perda de potência percentual, de offshore para a linha da costa). Fonte: Ref. 17 (Folley <i>et al.</i> , 2009).	14
Figura 2.4 - Potencial energético líquido anual teórico da energia das ondas em zonas costeiras (excluindo contribuições onde $P \leq 5$ kW/m ou onde há presença de gelo). Fonte: Ref. 28 (Mork <i>et al.</i> , 2010).	15
Figura 2.5 - Potencial e direcionalidade média anual (esquerda) da energia das ondas junto à costa Portuguesa e sua sazonalidade (direita). Fonte: Ref. 32 (Pontes <i>et al.</i> , 2005).	16
Figura 3.1 - Dispositivo PELAMIS em funcionamento no Parque de Ondas da Aguçadoura. Fonte: Ref. A.9.	21
Figura 3.2 - Dispositivo WaveRoller a ser rebocado. Fonte: Ref. A.10.	22
Figura 3.3 - Dispositivo SperBoy à escala 1:5. Fonte: Ref. A.11.	22
Figura 3.4 - Dispositivo WaveRotor em Westerschelde, Países Baixos. Fonte: Ref. A.12.	23
Figura 3.5 - Dispositivo Uppsala/Seabased AB Wave Energy Converter, aguardando	24

instalação em Sotenäs. Fonte: Ref. A.13.	
Figura 3.6 - Dispositivo PowerBuoy 3. Fonte: A.14.	24
Figura 3.7 - Dispositivo SurfPower à escala 1:10, ao lado do seu inventor Charles Wood. Ref. A.15.	25
Figura 3.8 - Dispositivo SurgeWEC desenvolvido pela empresa RWE. Fonte: Ref. A.16.	26
Figura 3.9 - Dispositivo Oyster. Fonte: Ref. A.17.	26
Figura 3.10 - Esquema representativo do dispositivo de recuperação de energia das ondas da CorPower. Fonte: Ref. A.18.	27
Figura 3.11 - Dispositivo OEbuoy à escala 1:4. Fonte: Ref. A.19.	27
Figura 3.12 - Dispositivo WaveStar à escala 1:2 instalado em Hanstholm. Fonte: A.20.	28
Figura 3.13 - Dispositivo Wave Dragon, instalado em Nissum Bredning, na Dinamarca. Fonte: Ref. A.21.	29
Figura 3.14 - Protótipo U-OWC em construção na central de energia das ondas do porto de Civitavecchia, Roma, Itália. Fonte: Ref. 35 (Spanos P. D. et al., 2017).	29
Figura 3.15 - Central de energia das ondas de Mutriku em Espanha.	30
Figura 3.16 - Dispositivo WaveEL no Parque de Ondas de Rundle, na Noruega. Fonte: Ref. A.23.	30
Figura 3.17 - Zona de testes de Lysekil durante o verão de 2008. Fonte: Ref. A.24.	31
Figura 3.18 - Zona piloto Portuguesa de São Pedro de Moel: a) Localização geral; b) Batimetria, limites da zona piloto (vermelho) e zona de extração de energia (azul). Fonte: Ref. 30 (Palha A. et al, 2010).	33
Figura 4.1 - Esquema simplificado do dispositivo ANACONDA acoplado a um PTO pneumático.	36
Figura 4.2 - Montagem experimental para aquisição de dados e controlo da instrumentação.	37
Figura 4.3 - Sistema de extração de potência.	38
Figura 4.4 - Série temporal do deslocamento da água na chaminé, da pressão medida na câmara pneumática e do caudal volúmico calculado, para um registo de 7 s a 0,83 Hz ($d_0=15,0$ mm, ondas da série 1).	39
Figura 4.5 - Fator de amplificação AF em função do período das ondas T, para a série de ondas 1 e diferentes diâmetros de orifício do PTO, incluindo chaminé aberta.	41
Figura 5.1 - Séries temporais das componentes fundamentais da pressão medida na câmara pneumática e caudal de ar através de um orifício de 15 mm de diâmetro, em conjunto com a potência instantânea calculada e correspondente média (período da onda incidente $T=1,23$ s).	44
Figura 5.2 - Potência média extraída no PTO em função do período das ondas	44

incidentes, para as três séries de ondas e um orifício de 15 mm de diâmetro.

Figura 5.3 - Comprimento de captura de energia WC em função do período das ondas T, para um diâmetro de orifício do PTO de 15,0 mm e três séries de ondas, considerando escoamento incompressível. 46

Figura 5.4 - Caudal volúmico médio Q através de um orifício com $d_0=15,0$ mm, em função da pressão média p na câmara pneumática, para a série de ondas 1. 52

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Tarifas de referência para a produção de energia elétrica em Portugal, atualizadas para o 3º trimestre de 2016. Fonte: Ref. A.1 (Ministério da economia - DGEG).	2
Tabela 1.2 - Tarifas médias indicativas da remuneração das energias renováveis, por tecnologia. Fonte: Ref. A.1 (Ministério da economia - DGEG).	3
Tabela 2.1 - Número de ondas observadas, em função da direção de incidência, na área compreendida entre 27° - 37° W e 36° - 45° N. Fonte: Ref. A.5 (KMNI/ERA-40 Wave Atlas derived from 45 years of ECMWF reanalysis data).	18
Tabela 2.2 - Percentagem de ondas observadas em cada gama de direções, agrupadas por gamas de altura de onda significativa, na área compreendida entre 27° - 36° W e 36° - 45° N. Fonte: Ref. A.5 (KMNI/ERA-40 Wave Atlas derived from 45 years of ECMWF reanalysis data).	19
Tabela 2.3 - Percentagem de ondas observadas em cada gama de direções, agrupadas por gamas de período médio, na área compreendida entre 27° - 36° W e 36° - 45° N. Fonte: Ref. A.5 (KMNI/ERA-40 Wave Atlas derived from 45 years of ECMWF reanalysis data).	19
Tabela 4.1 - Campo de ondas incidentes geradas.	40
Tabela 5.1 - Valores do caudal volúmico no PTO considerando condições de escoamento compressível e incompressível, para a série de ondas 1.	52
Tabela 5.2 - Valores da potência média absorvida considerando condições de escoamento compressível e incompressível, para a série de ondas 1.	53

Capítulo 1

Introdução

O arquipélago dos Açores é um grupo de nove ilhas situadas no Atlântico Norte, a cerca de 1400 km a Oeste de Portugal Continental, entre 37° e 40° N de latitude e 24° e 32° W de longitude (ver Fig. 1.1). As ilhas estão agrupadas em três grupos: o grupo Ocidental compreende as ilhas das Flores e Corvo; o grupo Central compreende as ilhas do Faial, Pico, São Jorge, Graciosa e Terceira; o grupo Oriental compreende as ilhas de São Miguel e Santa Maria.

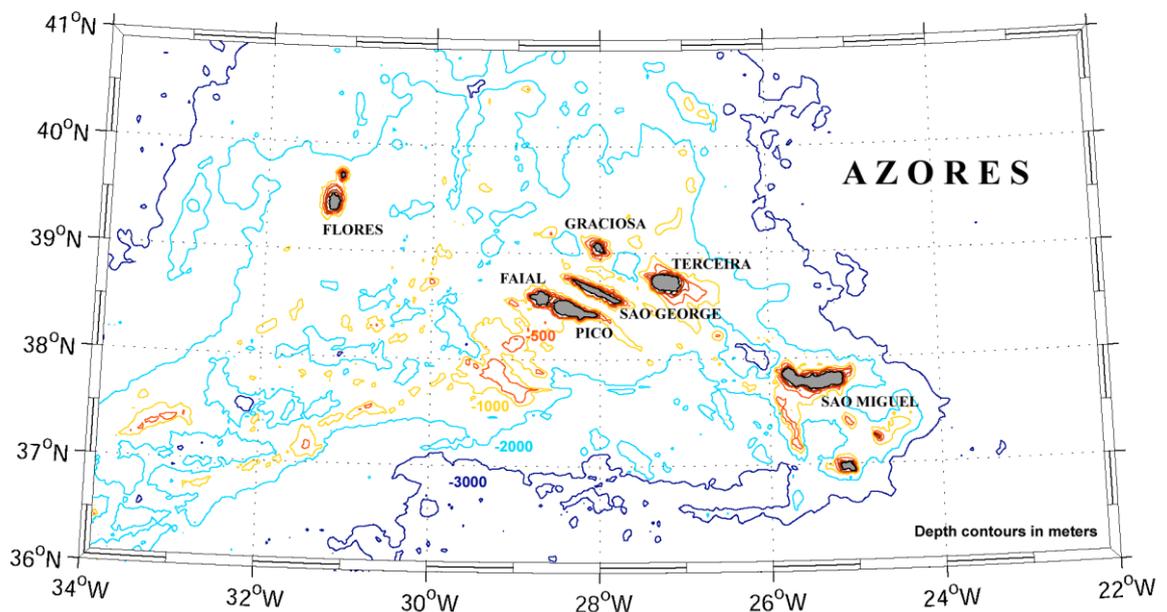


Figura 1.1 - Representação da localização e batimetria do arquipélago dos Açores.
Fonte: Ref. 34 (Smith e Sandwell, 1997).

Estas ilhas oceânicas são de origem vulcânica, estendem-se por uma área de aproximadamente 1000 km² e compreendem o maior conjunto de picos ao longo da crista meso-atlântica. Regra geral, as zonas costeiras do arquipélago têm um elevado gradiente

batimétrico (Fig. 1.1), fazendo com que a transição de águas profundas para águas pouco profundas seja bastante acentuada. Isto traz 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 direção à costa. Por outro lado, em determinadas zonas de concentração pode ainda observar-se uma considerável focagem das ondas, como por exemplo em Porto Cachorro na ilha do Pico. Estas regiões são altamente favoráveis ao aproveitamento da energia das ondas.

Numa região insular, tal como a Região Autónoma dos Açores, é importante considerar todas as fontes possíveis de abastecimento de energia, quer as convencionais, quer as renováveis. Entre as primeiras contam-se as centrais termoelétricas funcionando a *fuelóleo* e a *gasóleo*. Entre as fontes de abastecimento alternativas do Arquipélago contam-se a energia hídrica, a eólica, a geotérmica, a solar fotovoltaica e a das ondas. Algumas destas fontes energéticas já abastecem a rede elétrica local da EDA. A sua maior ou menor penetração está no entanto dependente dos custos de produção e distribuição associados. Começemos por comparar as tarifas associadas às diferentes tecnologias, por forma a avaliar a possibilidade de ampliação da capacidade instalada da energia das ondas.

1.1 Custos da energia

A tabela 1.1 compara o custo indicativo para a produção termoelétrica tradicional e a tabela 1.2 compara o custo indicativo para a remuneração de energia elétrica obtida a partir de fontes renováveis (PRE), de acordo com os dados disponibilizados pela DGEG (Direção Geral da Energia e Geologia).

Tabela 1.1: Tarifas de referência para a produção de energia elétrica em Portugal, atualizadas para o 3º trimestre de 2016.
Fonte: Ref. A.1 (Ministério da Economia - DGEG).

Tecnologias		Tarifas médias indicativas (€/MWh)
Gás natural, GPL ou combustíveis líquidos (excepto fuelóleo)	P ≤ 10 MW	80.74
	10 MW < P ≤ 20 MW	71.49
	20 MW < P ≤ 50 MW	61.29
	50 MW ≤ P ≤ 100 MW	54.71
Fuelóleo	P ≤ 10 MW	79.96
	10 MW < P ≤ 100 MW	70.99

Tabela 1.2: Tarifas médias indicativas da remuneração das energias renováveis, por tecnologia.
 Fonte: Ref. A.1 (Ministério da Economia - DGEG).

Tecnologias		Tarifas médias indicativas (€/MWh)
Eólica		74 - 75
Hídrica até 10 MW		75 - 77
Solar	Fotovoltaico > 5 kW	310 - 317
	Fotovoltaico <= 5 kW	450
	Termoelétrico <= 10 MW	267 - 273
	PV microgeração <= 5 kW	470
	PV microgeração > 5 kW e <= 150 kW	355
	Fotovoltaico de concentração (CPV) <= 1MW, até um limite de potência instalada, a nível nacional, de 5 MW	380
	Centrais solares fotovoltaicas	257
Ondas	Demonstração até 4 MW	260
	Pré-comercial até 20 MW	191
	Comercial (primeiros 100 MW)	131
	150 MW seguintes	101
	seguintes	76
Geotermia	Até 3 MW por projeto e entidade, até um limite nacional de 6 MW (Grande profundidade e elevada entalpia)	270
	Restantes até 3 MW por projeto e entidade, até um limite nacional de 10 MW	170 - 246

Uma tarifa de energia mais elevada, significa normalmente que o processo de produção não é muito eficiente ou que utiliza tecnologias pouco desenvolvidas.

Como se pode ver nas tabelas 1.1 e 1.2, tudo indica que as tecnologias de aproveitamento da energia das ondas para geração elétrica podem competir diretamente, a longo prazo, com as tecnologias eólica e hídrica, que já estão bem estabelecidas.

De acordo com o Ocean Energy Council [A.2], atualmente o melhor gerador de energia elétrica obtida a partir da energia das ondas opera no Reino Unido e 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.3] 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 termoelétrica a carvão de grandes dimensões tem um custo que ronda os 50 €/MWh.

Cumulativamente, a contribuição total da produção de energia elétrica em regime especial (PRE) em Portugal, em 2014, atingiu os 22% da produção total de eletricidade. Isto corresponde a cerca de 19 TWh, com um custo médio anual a rondar os 105 €/MWh. Assim sendo, confirma-se que a energia das ondas, tem boas condições para competir com as outras fontes de energias renováveis.

1.2 As renováveis nos Açores

A energia hídrica é a tecnologia mais antiga e mais bem conhecida em todo o mundo. De acordo com a International Hydropower Association (2017), no ano de 2016, a contribuição global da geração hidroelétrica foi estimada em 4102 TWh. Esta contribuição foi a maior de sempre registada para um recurso energético renovável. A capacidade hidroelétrica instalada a nível mundial ronda os 1246 GW. Destes, Portugal continental conta com cerca de 6182 MW instalados, de acordo com os Dados Ibéricos EDP de 2016. Durante o ano de 2016, a energia hidroelétrica satisfaz cerca de 33.8% do consumo elétrico total em Portugal continental. Em regiões insulares a utilização da energia hídrica não é tão prevalente, dada a inexistência de cursos de água de grande caudal. Nos Açores, a produção elétrica a partir de recursos hídricos atinge apenas cerca de 4% a 5% da produção elétrica total (EDA POEE, 2017). Em março de 2016, por exemplo, a produção elétrica a partir de recursos hídricos foi de 3.1 GWh, de um total de 64.9 GWh de energia elétrica produzida no arquipélago.

A energia eólica é, por definição, a energia cinética da agitação atmosférica. Este tipo de energia é o segundo tipo de energia renovável mais utilizado em Portugal, logo a seguir à energia hídrica. As ilhas são locais adequados para a exploração da energia eólica, pois os ventos são relativamente pouco perturbados por formações naturais ou edificações. Atualmente, as tecnologias de aproveitamento de energia eólica já estão bastante desenvolvidas, existindo diversos parques de aproveitamento eólico de vários MW e muitas tecnologias de aproveitamento em fase comercial. De acordo com o JRC (Hernández *et al.*,

2017) no fim de 2015 a potência elétrica eólica instalada a nível mundial rondava os 430 GW. Se forem considerados os projetos com data prevista para o início de operações até 2020, a estes acrescenta-se mais 22.6 GW. Em Portugal continental, segundo os dados Ibéricos de 2016 disponibilizados pela EDP, estão instalados 5193 MW para aproveitamento elétrico eólico. Esta capacidade satisfaz cerca de 25% do consumo elétrico em Portugal continental durante o ano de 2016. No arquipélago dos Açores, segundo o POEE da EDA (2017), as tecnologias de aproveitamento elétrico eólico foram responsáveis por 6,42 GWh, dos 64,9 GWh produzidos por todas as tecnologias no mês de Março de 2016 (cerca de 10%).

A energia geotérmica refere-se à energia térmica gerada e armazenada no solo. A fonte de toda a energia geotérmica é o aquecimento localizado em formações geológicas, devido a atividade magmática ou transformações radioativas. A rocha aquecida, por sua vez, transfere uma fração do calor para água que se encontra nos poros e fraturas das mesmas. Esta água pode ser aprisionada na rocha como vapor, em sistemas bifásicos ou água quente. A exploração de energia geotérmica não está sujeita a variações temporais, sejam elas diárias ou sazonais. Por esta razão estes sistemas fornecem um fluxo de energia estável, que não requer a instalação de grupos de reserva termoelétricos. Esta característica é única entre as tecnologias de aproveitamento de fontes de energia renováveis e oferece uma oportunidade real para maximizar o uso de recursos indígenas em comunidades localizadas em áreas geologicamente ativas, como é o exemplo dos Açores. Outro fator atrativo das explorações elétricas geotérmicas é que estas são verdadeiramente multidisciplinares e, portanto, podem gerar desenvolvimento tecnológico em diversas áreas. Este tipo de exploração é, no entanto, capital-intensivo. Concretamente em Portugal continental, a energia geotérmica não é aproveitada. No entanto, no Arquipélago dos Açores o recurso geotérmico tem vindo a ser aproveitado a um ritmo crescente. Em 1985 a potência instalada de eletricidade geotérmica era de apenas 3 MW. No entanto, em 2008 este valor cresceu até cerca de 23 MW. Na ilha de S. Miguel estão instaladas duas centrais de produção elétrica geotérmica. A maior iniciou o funcionamento em 1994 e tem uma potência instalada de 13 MW: a Central Geotérmica da Ribeira Grande. Em 2006 entrou em funcionamento a segunda central geotérmica, também no campo geotérmico da Ribeira Grande, com uma potência instalada de 10 MW: a Central Geotérmica do Pico Vermelho. Estas explorações foram conduzidas pela empresa Sogeo, pertencente à empresa mãe EDA. No ano de 2007, a produção combinada destas duas centrais contribuiu com 41% da energia elétrica produzida na ilha de S. Miguel. Na ilha Terceira, em 2014, foi iniciada a construção da Central Geotérmica Piloto do Pico Alto, estando programado o início de operação para o primeiro semestre do ano de 2017. Esta central terá uma potência instalada de cerca de 12 MW e estima-se que será capaz de satisfazer até 35% do consumo elétrico na ilha. Em resumo, no Arquipélago dos Açores a energia geotérmica é a fonte de energia renovável mais utilizada, sendo atualmente responsável por cerca de 20% - 25% da produção de eletricidade no arquipélago (EDA POEE 2017).

A energia solar tem como fonte a radiação solar. Nos últimos anos, a utilização desta fonte de energia tem vindo a aumentar, sob diferentes formas. De acordo com o relatório do JRC encomendado pela Comissão Europeia (Jager-Waldau, 2016), no fim do ano de 2015 a potência fotovoltaica instalada mundialmente rondava os 235 GW sendo que destes, 53.7 GW foram instalados ao longo do ano de 2015. O aumento da utilização e da capacidade de produção destes sistemas gerou uma redução significativa no seu custo. A figura 1.2 mostra essa redução para três países exemplificativos.

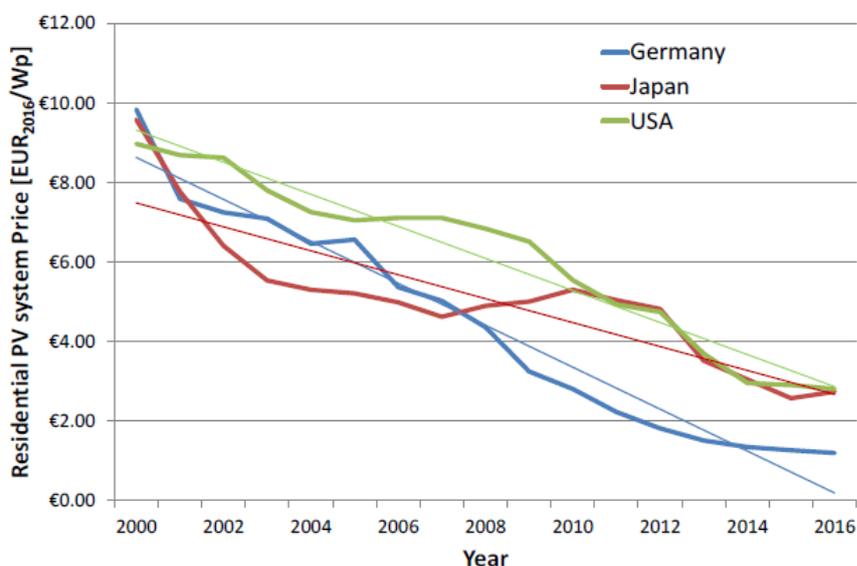


Figura 1.2 - Desenvolvimento do preço de sistemas fotovoltaicos para uso doméstico ao longo da última década.

Fonte: Ref. 21 (Jager-Waldau, 2016).

Apesar da elevada radiação solar registada em Portugal, a instalação de sistemas de aproveitamento solar fotovoltaico tem crescido muito lentamente, tendo atingido apenas 460 MW instalados no final do ano 2015. A grande maioria das instalações em Portugal é classificada como microgeração para uso doméstico. Segundo os dados Ibéricos da EDP (2016), foram produzidos 781 GWh, no ano de 2016, a partir da energia solar em Portugal continental. Isto corresponde apenas a cerca de 1,6 % do consumo elétrico total desse ano. Nos Açores, a utilização da energia solar é residual.

A energia das ondas reúne as componentes de energia potencial e energia cinética da agitação marítima. O aproveitamento da energia das ondas representa um dos maiores desafios nos dias de hoje. Trata-se da maior densidade de energia por metro quadrado à superfície do globo. Atualmente, apesar de já terem sido desenvolvidos muitos dispositivos para conversão da energia das ondas, ainda não foi possível demonstrar a sua viabilidade comercial. A principal desvantagem da energia das ondas é a sua sazonalidade. Assim sendo,

o levantamento adequado do recurso energético das ondas é essencial para um eficiente desenvolvimento de tecnologias com vista ao seu aproveitamento. Em Portugal existe apenas uma central de aproveitamento da energia das ondas em funcionamento, que foi instalada em Porto cachorro na ilha do Pico (Açores). Esta central piloto de energia das ondas é explorada e mantida pela empresa WavEc. É do tipo coluna de água oscilante e conta com uma capacidade instalada de 400 kW. De Janeiro de 1996 a Outubro de 1998, a energia elétrica fornecida pela central à rede elétrica da ilha rondou os 0.9 GWh/ano. Este valor correspondia a 7-8% do consumo anual da ilha naquela data. Mais tarde, após uma série de intervenções bem sucedidas para otimizar o funcionamento da central, foi atingida uma produção elétrica anual de 45 MWh em 2010, correspondente a 1450 horas de funcionamento. Já em 2016 a produção elétrica foi de apenas 22 MWh durante 911 horas de funcionamento [A.4].

1.3. Objetivos gerais deste trabalho

O aproveitamento da energia das ondas nos Açores deverá ser, na nossa perspetiva, direcionado para as necessidades específicas de cada uma das ilhas do arquipélago. Assim sendo, centrámos o nosso interesse na ilha do Corvo (Fig. 1.3). Esta ilha é a mais pequena e mais ocidental do arquipélago.



Figura 1.3 - Ilha do Corvo, nos Açores.

A ilha do Corvo tem uma área de apenas de 17.11 km² e possui uma população de cerca de 430 habitantes, com 282 habitações. O consumo elétrico é modesto, principalmente de uso doméstico, que no mês de Março de 2017 correspondeu a 55 289 kWh.

A Fig. 1.4 ilustra a batimetria da zona litoral junto à costa da ilha do Corvo. De acordo com a autoridade regional, a zona de águas restritas junto à costa da ilha do Corvo, onde a profundidade é inferior a 30 m, estende-se até aproximadamente 0,6 km da costa. A zona de águas profundas surge a cerca de 1,6km da costa, onde as profundidades são da ordem dos 500 m ou mais.

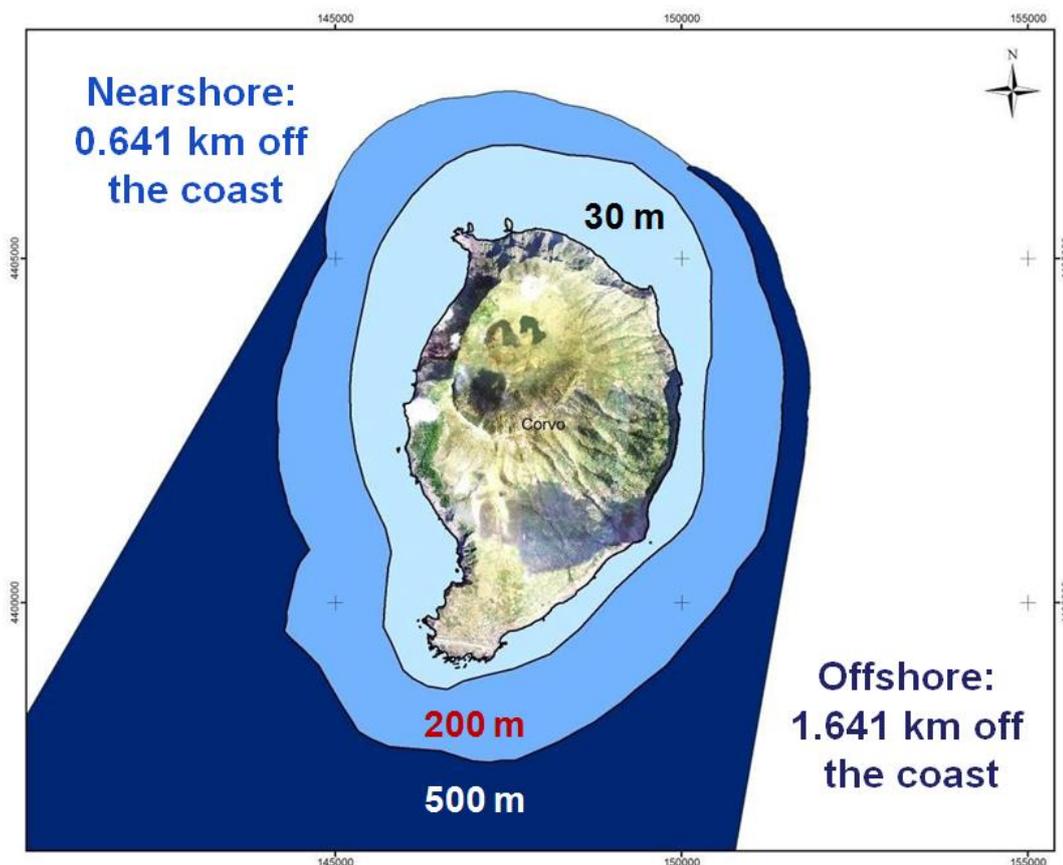


Figura 1.4 - Contornos de profundidade da zona junto à costa da ilha do Corvo, Açores.

Sendo esta ilha a que está mais a ocidente, não está sujeita ao efeito de sombra ocasionado pelas restantes ilhas relativamente à direção de propagação das ondas. Deste modo, o potencial bruto da energia das ondas esperado é de cerca de 40 - 60 kW/m de frente de onda. Segundo dados do *European Center for Medium Range Weather Forecasts* [A.5 e A.6], as ondas incidem predominantemente de entre Oeste e Noroeste. Nesta direção, grande parte das observações apontam para ondas com período médio entre 5 e 8 s e altura significativa entre 1 e 4 m (ver Fig. 1.5).



Mean water depth: 500 m

Significant wave height and mean wave period

Direction	Wave climate	Observations
N - W	H = 1 - 3 m	> 26 %
	T = 6 - 8 s	> 25 %
W - S	H = 1 - 4 m	> 20 %
	T = 5 - 7 s	> 21 %
S - E	H = 1 - 3 m	> 29 %
	T = 5 - 7 s	> 32 %
E - NE	H = 1 - 3 m	> 31 %
	T = 5 - 7 s	> 32 %
NE - N	H = 1 - 3 m	> 35 %
	T = 5 - 8 s	> 20 %

Nº of observations: 1 577 952

Figura 1.5 - Ilha do Corvo e clima de ondas ao largo da costa.

De entre os dispositivos mais adequados para um aproveitamento desta natureza, selecionámos para análise o dispositivo ANACONDA. O *know-how* já desenvolvido no *fluidslab* nesta matéria assentava nos ensaios realizados com um modelo do sistema à escala 1:100 (Mendes *et al.*, 2014a, 2014b e 2014c), apresentando este dispositivo um bom desempenho na captura de energia das ondas. Os objetivos previstos para o presente estudo concentram-se na modelação do sistema à escala 1:50 e no ensaio do modelo físico no tanque hidrodinâmico do Laboratório. Os resultados desta experiência irão permitir a identificação de eventuais efeitos de escala associados ao anterior modelo, bem como efeitos de compressibilidade do ar dentro da câmara pneumática do sistema PTO. As conclusões do presente estudo irão demonstrar a adequação do dispositivo ANACONDA para o aproveitamento de energia das ondas na ilha do Corvo.

Capítulo 2

Potencial da energia das ondas

Ao longo dos últimos cinquenta anos foram efetuadas diversas avaliações do potencial energético das ondas do mar. Em 2.1 apresentamos alguns dados com significado para o problema do aproveitamento da energia das ondas. Em 1973, por exemplo, Isaacs e Seymour estimaram o potencial global bruto da energia das ondas em 1 - 10 TW. Este potencial é omnidirecional, isto é, diz respeito a todas as direções de propagação das ondas no mar. Em contraponto, interessa também considerar a componente líquida do potencial disponível, ou seja, o potencial das ondas resolvido direccionalmente. Finalmente, em termos de aproveitamento da energia das ondas, importa quantificar o potencial utilizável por uma eventual instalação desenvolvida para o efeito. Estes valores foram revistos por Cornett *et al.* (2008) e, mais tarde, por Mørk *et al.* (2010). À escala europeia (2.2) foi entretanto desenvolvido o WERATLAS, que é um mapa da distribuição da energia das ondas no continente europeu (Pontes *et al.*, 1998). Para a região dos Açores, em concreto, existem alguns estudos sobre este assunto, que referiremos em 2.3.

2.1 Potencial a nível global

Em 2008 foi publicado um estudo de Andrew M. Cornett, onde são analisadas previsões do clima de ondas obtidas a partir do modelo Wind-Wave WAVEWATCH-III de Tolman (2002). Estas previsões correspondem a um período de cerca de 10 anos (1997 - 2006). Este estudo é relevante por diferentes motivos. Em primeiro lugar foi pioneiro na validação dos modelos que contabilizam a variabilidade temporal do recurso global, tal como é o da energia das ondas, com base em novos parâmetros tais como índice SV (Seasonal Variability) e o índice MV (Monthly Variability). Em segundo lugar, estes índices são utilizados para inferir um

coeficiente de variação de potência das ondas, a fim de prever a variabilidade da energia disponível em escalas de curto, médio e longo prazo.

A Fig. 2.1 mostra os resultados obtidos em Cornett *et al.* (2008) para a distribuição global do potencial médio bruto da energia das ondas em águas profundas. Segundo os autores, o modelo utilizado não fornece estimativas confiáveis para a previsão da progressão das ondas de águas profundas para águas pouco profundas, junto à costa. A Fig. 2.2 quantifica a variabilidade do recurso energético das ondas relativamente ao seu nível médio a uma escala temporal de três meses.

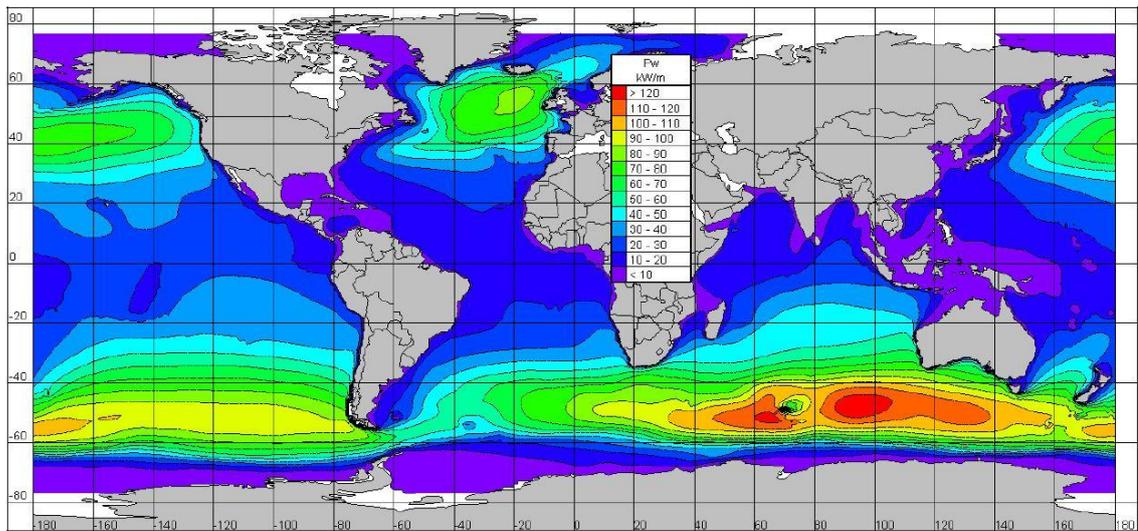


Figura 2.1 - Distribuição global do potencial médio bruto da energia das ondas, em águas profundas.

Fonte: Ref. 7 (Cornett *et al.*, 2008).

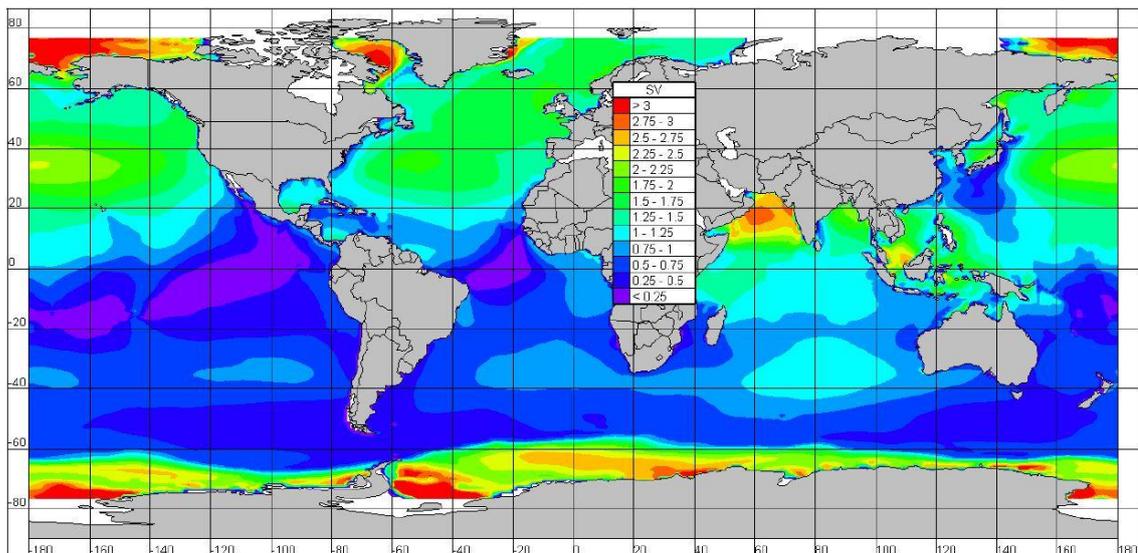


Figura 2.2 - Distribuição global do índice de variabilidade sazonal (SV) da energia das ondas.

Fonte: Ref. 7 (Cornett *et al.*, 2008).

A variabilidade temporal da energia das ondas é de extrema importância e afeta fortemente a viabilidade de qualquer possível projeto de extração desta energia. Em concreto, locais com uma taxa de variação de energia das ondas moderada e estável podem provar ser mais atrativos que locais onde o recurso é mais energético, mas mais instável e portanto menos fiável. Para a maioria dos casos, no hemisfério Norte, a estação mais energética corresponde ao inverno (dezembro a fevereiro), enquanto que o verão corresponde à estação menos energética (junho a agosto). Analisando a Fig. 2.2, nota-se que a variabilidade temporal do recurso energético das ondas é consideravelmente maior no hemisfério norte que no hemisfério sul (como é confirmado por outros estudos posteriores). O SV máximo ocorre nos polos e, de um modo geral, este índice de variabilidade é superior no hemisfério norte. Particularmente para Portugal e Açores, a variabilidade sazonal ronda 1,25 - 2.

Em estudos anteriores argumentava-se que o potencial energético bruto em zonas junto à costa era significativamente mais baixo do que em zonas de mar aberto. Portanto, seria pouco rentável instalar sistemas de aproveitamento de energia das ondas nestas zonas. No entanto, Folley *et al.* (2009) constataram que o potencial energético bruto não é uma medida apropriada para a determinação da viabilidade de um parque de ondas. Com efeito, a interação das ondas com o leito oceânico e a linha de costa alteram substancialmente o clima de ondas, à medida que estas avançam para o nearshore. Este efeito é tal, que uma análise de semelhança meramente geométrica em relação ao clima de ondas offshore não descreve com precisão o clima de ondas junto à costa. Foi então criado um quantificador alternativo, denominado potencial energético médio utilizável das ondas. A estimativa do potencial energético de um local é considerada qualitativamente superior quando obtida com base no potencial energético utilizável, pois este contabiliza não só a distribuição direcional das ondas incidentes (potência líquida), mas também a capacidade da instalação de aproveitamento da energia das ondas.

Folley e Whittaker (2009) concluíram ainda que a quando da progressão de um trem de ondas gerado em mar aberto para um local junto à costa, a perda de potência transmitida é pequena até uma profundidade de aproximadamente 8 m. Esta perda é essencialmente devida ao atrito no fundo do mar. Para profundidades menores que 8 m a dissipação de energia é significativa, devendo-se principalmente à rebentação das ondas. Regra geral, o efeito da rebentação das ondas é dominante quando a profundidade é menor que 2,5 vezes a altura significativa das ondas. Estes investigadores constatam ainda que grande parte da redução da energia bruta omnidirecional entre as profundidades de 50 m e 10 m ocorre devido à refração e não devido ao atrito no fundo ou à rebentação das ondas. Por outro lado, a refração não tem influência no potencial líquido da energia das ondas (resolvido direccionalmente). Assim sendo a redução do potencial líquido entre as profundidades de 50 m e 10 m deve-se apenas ao atrito no fundo e quebra de ondas.

A Fig.2.3 mostra a evolução da perda de potência entre águas profundas e restritas, em função do potencial energético das ondas e períodos de energia. Estes resultados foram obtidos para uma inclinação do leito oceânico de 1:100, que pode ser considerada típica para a plataforma continental Europeia.

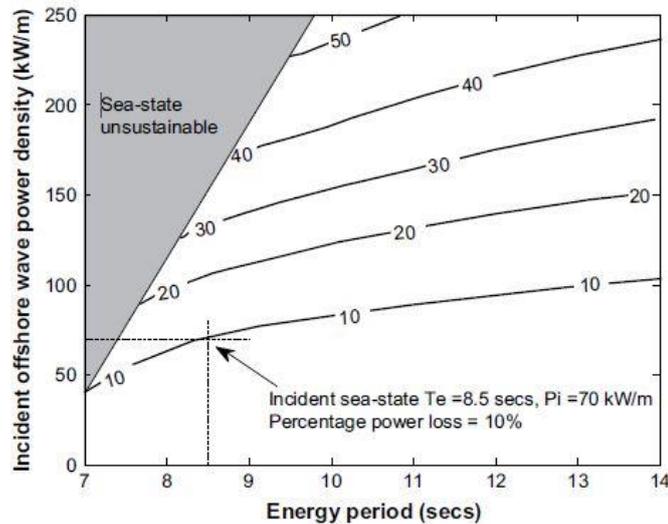


Figura 2.3 - Redução da densidade de potência utilizável (perda de potência percentual, de offshore para a linha da costa).
 Fonte: Ref. 17 (Folley *et al.*, 2009).

Estes investigadores constatarem que o potencial bruto observado nas regiões de West Orkney e South Uist sofre uma redução, desde offshore até junto à costa, igual a 20% e 44%, respetivamente. Em contrapartida, foi observado que o potencial utilizável diminui a uma taxa sensivelmente menor, concretamente 7% e 23% para estes dois locais. Esta ocorrência sugere que muitas zonas costeiras com boa exposição podem apresentar potenciais energéticos semelhantes ou superiores a muitas zonas do offshore, o que confere viabilidade económica à implementação de sistemas de aproveitamento de energia nestes locais. Convém a propósito referir que junto às zonas costeiras as perdas de energia são maiores para declives do leito oceânico menores, dada a maior distância percorrida pelas ondas para a mesma redução de profundidade. Esta constatação torna-se particularmente interessante em ambiente insular, onde os declives do solo oceânico são tipicamente elevados.

Mais recentemente Mørk *et al.* (2010) realizaram um estudo que quantifica o potencial global da energia das ondas em mar aberto e também junto à costa. Deste trabalho resulta que o recurso bruto global da energia das ondas está atualmente avaliado em cerca de 3,7 TW. No entanto, é importante referir que 20% deste recurso não é utilizável pelas tecnologias existentes pois corresponde a áreas onde a densidade de energia é muito baixa ($P \leq 5$ kW/m) ou áreas onde existe gelo. Assim sendo, o recurso líquido disponível para aproveitamento energético está atualmente avaliado em cerca de 2,98 TW. As estimativas de Mork para mar alto são bastante conservadoras, mas são em princípio consonantes com as de Cornett.

Ainda segundo Mørk (2010), mostramos na Fig. 2.4 as previsões teóricas da distribuição global do potencial líquido anual da energia das ondas junto à costa. Comparando as Figs. 2.1 e 2.4, podemos concluir que o potencial líquido da energia das ondas é maior para latitudes superiores a $\pm 30^\circ$.

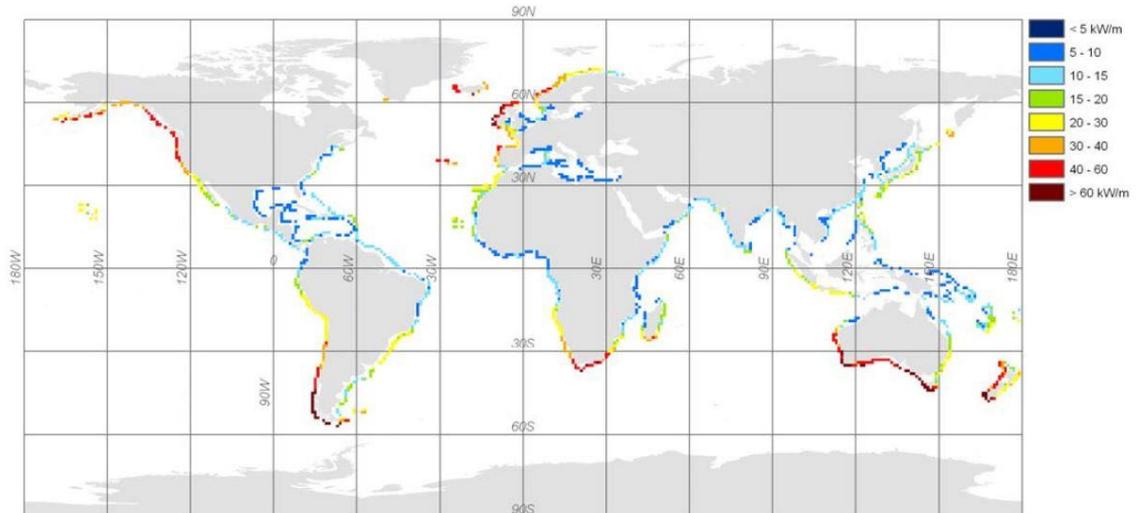


Figura 2.4 - Potencial energético líquido anual teórico da energia das ondas em zonas costeiras (excluindo contribuições onde $P \leq 5$ kW/m ou onde há presença de gelo).
Fonte: Ref. 28 (Mørk *et al.*, 2010).

2.2 Potencial no litoral Europeu

A nível europeu, a principal fonte de informação sobre o potencial da energia das ondas é o WERATLAS. Este atlas compreende um conjunto completo 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, caracteriza-se por ter um potencial de energia das ondas particularmente elevado. De acordo com Clément *et al.* (2002), o potencial da energia das ondas varia desde 25 kW/m, nas zonas mais a sul da costa Europeia Atlântica, 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. Na bacia Mediterrânica, ao largo dos países europeus, 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 do litoral Europeu, o recurso da energia das ondas está avaliado em cerca de 320 GW.

Na Europa, são já vários os países que consideram a energia das ondas como um recurso que pode ser comercialmente explorado. Destes, podemos citar a Dinamarca, a Irlanda, a Espanha, Portugal, e o Reino Unido. Estes países possuem um potencial de energia das ondas considerável e têm estado ativamente envolvidos no aproveitamento dessa energia, contando com apoios governamentais. Na Dinamarca, o potencial energético das ondas anual está avaliado entre 7 e 24 kW/m, com ondas vindas de Oeste, maioritariamente. Na Irlanda, de acordo com Lewis (1999), este recurso está avaliado em 375 MWh/m de litoral, em zonas até 20 m de profundidade. Portugal continental, por sua vez, dispõe de um potencial anual de 30 - 40 kW/m na costa oeste, sendo os valores máximos encontrados a norte do Cabo da Roca. Estes valores estão de acordo com os fornecidos por Mørk, em 2010 (Fig. 2.4).

Em 1992, Mollison *et al.* estimou o potencial energético em Portugal. Posteriormente, em 2005, foi desenvolvido por Pontes *et al.* um atlas para o potencial da energia das ondas junto à costa continental Portuguesa: o ONDATLAS. Na Fig. 2.5 podemos observar o potencial médio anual junto à costa portuguesa, assim como a sua sazonalidade.

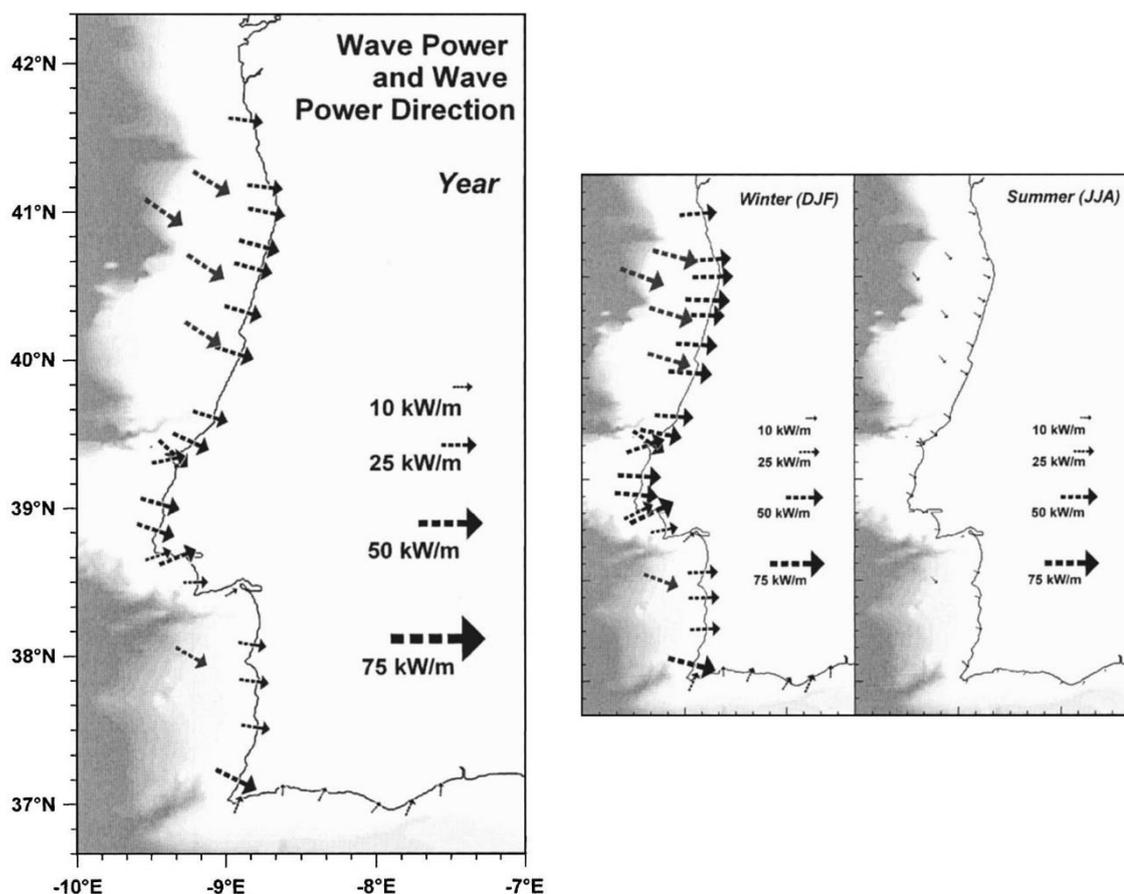


Figura 2.5 - Potencial e direcionalidade média anual (esquerda) da energia das ondas junto à costa Portuguesa e sua sazonalidade (direita).
Fonte: Ref. 32 (Pontes, 2005).

De acordo com Andrade *et al.* (2007), é no entanto esperado que a direção das ondas indicada na Fig. 2.5 sofra uma rotação de 7° no sentido horário até ao fim do século 21. Esta rotação é devida às alterações climáticas que se verificam na atualidade e à erosão da linha costeira. O estudo conclui igualmente que as condições extremas de altura de onda têm vindo a aumentar ao longo das últimas décadas. Todos estes fatores são importantes e devem ser tidos em conta a quando da avaliação da viabilidade dos sistemas de aproveitamento da energia das ondas a desenvolver. Apesar deste estudo ter sido desenvolvido especificamente para a costa Portuguesa, mudanças semelhantes devem ser esperadas noutras zonas costeiras da Europa Atlântica.

2.3 Potência disponível no Arquipélago dos Açores

A independência energética do arquipélago dos Açores é um problema atual, que é explicitamente referido no Programa Operacional Açores 2020, pelo que é importante atender ao potencial energético das ondas nesta região.

Como já foi referido na secção 2.2, o potencial energético das ondas junto à costa dos Açores está compreendido entre 30 e 60 kW/m (Fig. 2.4). É de notar que nas ilhas dos grupos central e ocidental o potencial é maior (40 - 60 kW/m) do que nas ilhas do grupo oriental (30 - 40 kW/m). Isto está de acordo com a direção 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 avaliada por Mørk *et al.* (2010). Nesta publicação a sazonalidade é definida como o rácio entre a mínima potência média mensal e a potência média anual das ondas. De acordo com esta definição, a sazonalidade em zonas junto à costa dos Açores foi estimada como sendo inferior a 20%, o que revela uma variação sazonal muito significativa. Isto pode dificultar a escolha de uma zona favorável ao aproveitamento da energia das ondas.

Para melhor compreender o clima de ondas na região dos Açores recorreremos, em alternativa, ao Wave Atlas KNMI/ERA-40 [A.5], que resulta da reanálise de 45 anos de dados do ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecasts). Este atlas disponibiliza dados de altimetria gratuitos, de onde se podem extrair histogramas bivariados da altura de onda significativa e do período médio das ondas incidentes, em função da direccionalidade das mesmas. Nas tabelas 1.3, 1.4 e 1.5 estes histogramas são apresentados e comentados. Foi escolhida a malha que compreende a área entre 27°W - 36°N e 36°W - 45°N. Apesar de esta área não englobar todo o arquipélago, ela é todavia representativa do clima de ondas na

região, pois compreende os grupos central e ocidental onde o potencial da energia das ondas é maior.

A tabela 2.1 fornece o número de ondas observadas em função de diferentes direções de propagação. Observa-se que a grande maioria das ondas chega ao arquipélago entre SW e N (assinalado a verde). A direccionalidade das ondas, aliada ao efeito de sombra criado pela presença das ilhas, vêm enfatizar a diferença do potencial da energia das ondas verificado entre as ilhas dos grupos central e ocidental (mais a oeste) e as ilhas do grupo oriental (mais a este). 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 por sua vez o clima de ondas mais estável, minimizando condições extremas que podem ser por vezes destrutivas para sistemas WEC.

Tab. 2.1. Número de ondas observadas, em função da direção de incidência, na área compreendida entre 27° - 36° W e 36° - 45° N.
Fonte: Ref. A.5 (KNMI/ERA-40 Wave Atlas derived from 45 years of ECMWF reanalysis data).

Direção	nº de observações	Porcentagem
N - NE	112470	7
NE - E	71223	5
E - SE	47392	3
SE - S	56548	4
S - SW	127039	8
SW - W	372082	24
W - NW	496402	31
NW - N	294796	19
Total	1577952	100

A tabela 2.2 mostra a quantidade de ondas observadas em cada gama de alturas significativas, para cada uma das direções consideradas. A tabela 2.3, por sua vez, mostra a quantidade de ondas observadas em cada gama de períodos médios, também para cada direção considerada. Foram consideradas significativas as gamas de valores que compreendem pelo menos 20% das observações, tendo sido assinalados a verde os casos onde esse valor é excedido. Da análise destas tabelas conclui-se então que o clima de ondas na região dos Açores é maioritariamente caracterizado por ondas de 5 a 8 s de período médio e de 1 a 4 m de altura de onda significativa. São estas as condições a modelar à escala 1:50 no Laboratório, como é descrito no capítulo 4. Apesar disso, em condições reais, o dispositivo

terá de estar preparado para resistir ao espectro total de períodos e alturas significativas de onda representados nas tabelas, o que acarreta outros desafios em termos de engenharia.

Tab. 2.2. Percentagem de ondas observadas em cada gama de direções, agrupadas por gamas de altura de onda significativa, na área compreendida entre 27° - 36° W e 36° - 45° N.

Fonte: Ref. A.5 (KNMI/ERA-40 Wave Atlas derived from 45 years of ECMWF reanalysis data).

%	H (m)									Total	
	Direção	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8		8 - 33
	N - NE	4.32	39.71	34.66	14.64	4.55	1.46	0.46	0.13	0.07	100%
	NE - E	5.41	45.99	30.69	13.42	3.51	0.79	0.15	0.04	0.00	100%
	E - SE	6.42	44.01	29.20	12.65	5.42	1.63	0.49	0.13	0.05	100%
	SE - S	4.71	31.62	30.33	19.43	8.61	3.38	1.52	0.32	0.08	100%
	S - SW	2.94	23.83	27.36	22.35	13.01	5.97	2.95	1.15	0.44	100%
	SW - W	2.50	25.10	25.21	20.05	12.80	7.25	4.02	1.80	1.27	100%
	W - NW	2.84	27.19	26.53	18.96	11.23	6.14	3.67	1.84	1.60	100%
	NW - N	3.02	32.60	32.18	18.39	7.93	3.26	1.55	0.64	0.43	100%

Tab. 2.3. Percentagem de ondas observadas em cada gama de direções, agrupadas por gamas de período médio, na área compreendida entre 27° - 36° W e 36° - 45° N.

Fonte: Ref. A.5 (KNMI/ERA-40 Wave Atlas derived from 45 years of ECMWF reanalysis data).

%	T (s)									Total	
	Direção	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11		11 - 13
	N - NE	0.04	5.29	20.22	30.94	24.86	13.68	4.03	0.92	0.02	100%
	NE - E	0.10	9.63	31.97	36.75	16.61	4.42	0.49	0.03	0.00	100%
	E - SE	0.20	13.24	39.07	32.94	11.47	2.70	0.38	0.00	0.00	100%
	SE - S	0.39	13.56	33.87	31.80	15.08	4.40	0.71	0.14	0.05	100%
	S - SW	0.32	11.10	29.07	32.47	18.08	7.15	1.68	0.13	0.00	100%
	SW - W	0.17	7.30	21.17	28.90	22.85	13.27	4.96	1.20	0.18	100%
	W - NW	0.05	3.66	14.09	25.10	24.87	18.50	9.66	3.32	0.75	100%
	NW - N	0.03	3.12	13.34	25.89	26.24	18.76	9.23	2.69	0.70	100%

Capítulo 3

Tecnologias de extração

Muito embora ao longo dos últimos 50 anos tenham sido desenvolvidas diversas tecnologias para o aproveitamento da energia das ondas, quase nenhum dos dispositivos concebidos para o efeito atingiu a fase de desenvolvimento comercial. Este capítulo trata dos principais protótipos pré-comerciais. Será igualmente revisto o estado de desenvolvimento atual do dispositivo ANACONDA, que vem sendo estudado no *fluidslab* em parceria com a Universidade de Southampton. Todos estes dispositivos necessitam de ser testados em condições de mar reais. Faremos, a propósito, uma revisão das zonas de teste piloto em Portugal.

3.1 Protótipos comerciais em desenvolvimento

Nesta subsecção serão abordados alguns dos dispositivos de extração da energia das ondas que estão em desenvolvimento atualmente. São referidos apenas os dispositivos que já foram testados em condições marítimas reais, que forneceram energia à rede elétrica, ou que apresentam desenvolvimentos recentes demonstrados nas conferências relevantes da área [A.7 e A.8].

O PELAMIS é um protótipo pré-comercial que chegou a ser ensaiado em Portugal á alguns anos (Fig. 3.1). Este sistema, do tipo corpo oscilante, é desenvolvido pela empresa Pelamis Wave Power de Edinburgh, UK; esteve incorporado no parque de ondas da Aguçadoura (ver subsecção 3.3), incluído num projeto com objetivos comerciais. Este dispositivo consiste numa estrutura articulada flutuante composta por diferentes módulos cilíndricos, que se

encontram unidos por juntas flexíveis. A excitação das ondas incidentes induz oscilações dos módulos cilíndricos em torno das juntas de união, o que permite pressurizar óleo em reservatórios que posteriormente acionam motores hidráulicos. Estes motores, por sua vez, acionam geradores elétricos. Durante o funcionamento do sistema ocorreram alguns problemas, nomeadamente nas chumaceiras de ligação entre os elementos oscilantes, o que pôs em evidência a necessidade de futuros desenvolvimentos. O comprimento de captura de energia do PELAMIS, em testes no Oceano Atlântico, ronda tipicamente os 5,5 m [A.9].



Figura 3.1 - Dispositivo PELAMIS em funcionamento no Parque de Ondas da Aguçadoura.
Fonte: Ref. A.9.

O WaveRoller (Fig. 3.2) é um outro dispositivo pré-comercial que conta com três unidades independentes, de 100 kW cada, instaladas em 2012 no mar perto de Peniche. A patente deste dispositivo é propriedade da empresa Finlandesa AW Energy Ltd. Este projeto revelou-se promissor, tendo obtido em 2016 um financiamento de 10 milhões de euros por parte do Banco Europeu de Investimento, no âmbito do programa comunitário Horizon 2020. O objetivo futuro da empresa é desenvolver e instalar um protótipo de 350 kW. O WaveRoller é composto por um painel vertical articulado no fundo, desenhado para funcionar a uma distância de aproximadamente 0,3 - 2 km da costa, em águas com profundidades entre 8 e 20 m. O painel vertical deverá ser suficientemente alto para ocupar quase completamente a coluna de água, sem atravessar a superfície da água do mar em qualquer uma das condições de funcionamento. As ondas incidentes fazem oscilar os painéis, que por sua vez acionam bombas hidráulicas em circuito fechado. O fluido hidráulico alimenta um motor a alta pressão, fazendo girar um gerador elétrico [A.10].

O Sperboy (Fig. 3.3) é um dispositivo flutuante de coluna de água oscilante, desenvolvido pela empresa Inglesa Embley Energy Ltd. Este consiste numa estrutura flutuante que suporta um tubo cilíndrico vertical submerso. No cimo da estrutura flutuante estão alojadas as turbinas, os geradores e os respetivos sistemas de controlo. O dispositivo está ancorado por forma a restringir o seu movimento vertical. Este sistema pode ser instalado em águas profundas. Ao

regular a flutuabilidade do dispositivo, é possível mantê-lo em condições ideais hidrodinâmicas (em ressonância) ao longo do espectro predominante das ondas incidentes. Um modelo deste dispositivo à escala 1:5 foi testado em Plymouth Sound na Inglaterra, pelas universidades de Bristol e West of England. Não consta que o dispositivo ainda esteja em funcionamento [A.11].



Figura 3.2 - Dispositivo WaveRoller a ser rebocado.
Fonte: Ref. A.10.



Figura 3.3 - Dispositivo SperBoy à escala 1:5.
Fonte: Ref. A.11.

O WaveRotor (Fig. 3.4) utiliza um rotor combinado Darrieus-Wells, de funcionamento omni-direcional, montado num veio vertical. O dispositivo está instalado numa plataforma ancorada no fundo do mar através de pilares. Este sistema combina as possibilidades de utilização da energia das ondas, das marés e das correntes marítimas. O dispositivo foi patentiado inicialmente pela empresa Ecofys, dos Países Baixos, que testou um modelo à escala 1:10 no tanque de ondas do NaREC (Blyth, UK), em 2004, e no IFREMER (Issy-les-Moulineaux, França), em 2007. Em 2009 foi testado um modelo à escala 1:2 no mar, em Westerschelde, Países Baixos. Em 2012 a tecnologia e propriedade intelectual deste dispositivo foi adquirida pela empresa IHC Merwede, também dos Países Baixos, que é atualmente responsável pelo desenvolvimento deste dispositivo [A.12].



Figura 3.4 - Dispositivo WaveRotor em Westerschelde, Países Baixos.
Fonte: Ref. A.12.

O Uppsala/Seabased AB Wave Energy Converter (Fig. 3.5) consiste num gerador síncrono linear de ímanes permanentes, localizado no fundo do mar, que é acionado por uma bóia flutuante através de um cabo. Este WEC foi construído em conjunto pela Universidade de Uppsala (Suécia) e a empresa Seabased AB, de Lysekil. Neste sistema não existem paços intermédios na conversão de energia e, portanto, o movimento vertical da bóia é igual ao movimento do gerador linear. Em 2010 a Swedish Energy Agency atribuiu um fundo de investimento à Fortum e à Seabased, para desenvolverem uma central de energia das ondas em Sotenäs, sendo que a ligação à subestação marítima de baixa tensão (LVMS) Nórdica foi concluída em 2015. As primeiras 4 bóias foram instaladas em 2016 e encontram-se atualmente a funcionar [A.13].



Figura 3.5 - Dispositivo Uppsala/Seabased AB Wave Energy Converter, aguardando instalação em Sotenäs.
Fonte: Ref. A.13.

O dispositivo PowerBuoy (Fig. 3.6), desenvolvido pela empresa Ocean Power Technologies (Pennington, New Jersey), é um dos poucos dispositivos de recuperação de energia das ondas que já atingiu uma escala de produção comercial. Este dispositivo é do tipo Point Absorber, cujo elemento móvel é uma bóia flutuante que aciona um gerador elétrico. Este WEC pode ser utilizado para alimentar sistemas de monitorização marítimos, bem como para integrar parques destes dispositivos ligados à rede elétrica. Atualmente este sistema já funciona no Cornwall Wave Hub, no Reino Unido, e no Coos Bay OPT Wave Park (USA), entre outros sítios [A.14].



Figura 3.6 - Dispositivo PowerBuoy 3.
Fonte: Ref. A.14.

O Surfpower (Fig. 3.7) é um dispositivo de recuperação de energia das ondas patentado em 2005 pela empresa Seawood Designs Inc. (British Columbia, Canadá). É constituído por uma bóia flutuante em forma de asa, que oscila com as ondas incidentes. A asa flutuante está ancorada ao fundo do mar através de um atuador hidráulico, que age como uma bomba de pistão. O movimento da asa aciona a bomba, por forma a bombear água a alta pressão

através de uma conduta até uma estação em terra. O PTO é constituído por uma turbina Pelton acoplada a um gerador elétrico. Em 2005 foi testado um modelo à escala 1:22 no lago Huron, na fronteira entre os Estados Unidos e Canadá. Em 2010 foram desenvolvidos testes em tanque de ondas, à escala 1:10, no National Research Council's Institute for Ocean Technology, em St. John's, Newfoundland. Apesar deste dispositivo ainda não ter fornecido energia à rede elétrica, está prevista a sua instalação à escala real na costa oeste da ilha de Vancouver no Canadá, durante os próximos anos [A.15].



Figura 3.7 - Dispositivo SurfPower à escala 1:10, ao lado do seu inventor Charles Wood.
Fonte: Ref. A.15.

O SurgeWEC (Fig. 3.8) desenvolvido pela empresa Resolute Marine Energy (Boston, USA), é um dispositivo semelhante ao WaveRoller, constituído por uma aba articulada no fundo. Esta oscila sob a ação das ondas, sendo que o topo da aba flutua à superfície. Entre 2011 e 2013 este dispositivo esteve sujeito a duas campanhas de testes no mar. A primeira foi levada a cabo em Nags Head, na Carolina do Norte (USA), com um dispositivo de 3 kW. A segunda foi conduzida no Maine, nos Estados Unidos com um dispositivo de 5 kW [A.16].

O dispositivo Oyster (Fig. 3.9) é um conversor de energia das ondas projetado para operar perto da costa, que foi patentado pela empresa Aquamarine Power (Edinburgh, UK). À semelhança do SurgeWEC, o Oyster consiste numa aba flutuante articulada no fundo do mar. A oscilação da aba atua sobre cilindros hidráulicos de dupla ação que bombeiam água doce até uma central hidroelétrica na costa. Em 2010 a empresa Aquamarine Power iniciou o

projeto para a instalação de um parque de energia das ondas em Orkney, na Escócia. Embora já existam algumas unidades instaladas, este projecto está com um considerável atraso, sendo que a primeira unidade iniciou a produção elétrica em 2012. Ainda em 2012 foi iniciado o desenvolvimento do primeiro protótipo comercial do Oyster, a ser instalado ao largo da costa N-NW de Lewis, na Escócia [A.17].



Figura 3.8 - Dispositivo SurgeWEC desenvolvido pela empresa RWE.
Fonte: Ref. A.16.



Figura 3.9 - Dispositivo Oyster.
Fonte: Ref. A.17.

O dispositivo CorPower (Fig. 3.10) foi desenvolvido pela empresa Corpower Ocean (Estocolmo, Suécia). Este sistema consiste numa bóia flutuante que é atuada pelas ondas incidentes. A bóia está ancorada ao fundo do mar através de um cabo que é mantido sob tensão. A tensão no cabo é regulada através um sistema patentado WaveSpring, responsável pelo controlo de fase do sistema. O movimento linear é convertido em rotação usando um PTO mecânico, de tecnologia proprietária, localizado no interior da bóia. Em Junho de 2017 foi apresentado um protótipo para 500 kW, a ser instalado no mar ao largo de Orkney na Escócia [A.18].



Figura 3.10 - Esquema representativo do dispositivo de recuperação de energia das ondas da CorPower.
Fonte: Ref. A.18.

O dispositivo OEBuoy (Fig. 3.11) é desenvolvido pela empresa OceanEnergy, sediada em Cork, na Irlanda. É do tipo coluna de água oscilante e possui um PTO pneumático. O sistema utiliza uma adaptação da tecnologia “Backward Bent Duct Buoy” inventada por Yoshio Masuda, em 1986. O desenvolvimento deste dispositivo já percorreu três fases, com modelos testados à escala 1:50, 1:15 e 1:4. O modelo à escala 1:50 foi testado no HMRC, na Universidade de Cork, na Irlanda. O modelo à escala 1:15 foi testado no tanque de ondas da Ecole Central de Nantes, em França. Finalmente, o modelo à escala 1:4 com 28 toneladas foi testado em condições marítimas reais, perto do porto de Cork. Este dispositivo mostrou ser robusto, resistindo a todas as condições ambientais a que foi sujeito. Atualmente encontra-se em desenvolvimento um dispositivo deste tipo à escala comercial [A.19].



Figura 3.11 - Dispositivo OEBuoy à escala 1:4.
Fonte: Ref. A.19.

O dispositivo WaveStar (Fig. 3.12), desenvolvido pela empresa WaveStar Energy (Brøndby, Dinamarca), é constituído por plataformas flutuantes acopladas a uma estrutura localizada

acima da superfície da água do mar. A estrutura está ancorada ao fundo através de pilares e a ligação das plataformas flutuantes com esta estrutura é feita através de braços articulados. As ondas incidentes fazem oscilar os flutuadores, que acionam um gerador elétrico através de um sistema hidráulico. O conceito deste dispositivo foi desenvolvido no ano 2000 e os direitos comerciais da tecnologia foram comprados pela WaveStar Energy em 2003. Em 2004 foram realizados testes em tanque de ondas, à escala 1:40, na Universidade de Aalborg, com o propósito de optimisar a configuração do sistema. Em 2005 foi desenhado e construído um modelo à escala 1:10, que foi instalado no mar de Nissum Bredning na Dinamarca, logo no ano seguinte. O início do fornecimento de energia elétrica para a rede teve lugar também em 2006. Em 2009 uma plataforma de testes de 600 kW, à escala 1:2, foi instalada em Hanstholm, na Dinamarca. A sua ligação à rede foi concluída em 2010 e o dispositivo está ativo desde então, tendo interrompido temporariamente o seu funcionamento apenas para instalar flutuadores adicionais [A.20].



Figura 3.12 - Dispositivo WaveStar à escala 1:2 instalado em Hanstholm.
Fonte: Ref. A.20.

O Wave Dragon (Fig. 3.13) da empresa Wave Dragon Aps, em Copenhaga, é um dispositivo flutuante do tipo galgamento. Este sistema é constituído por duas paredes que focam as ondas em direção a uma rampa. Atrás da rampa está um reservatório onde a água que galga a rampa é armazenada temporariamente. A altura piezométrica entre o reservatório e o mar circundante é usada para mover as turbinas hidráulicas. O primeiro protótipo deste dispositivo foi construído à escala 1:4,5 e esteve ligado à rede elétrica em Nissum Bredning, na Dinamarca, entre 2003 e 2005. Em 2011 foi iniciada o desenvolvimento de um protótipo de demonstração com 1,5 MW, previsto para ser instalado na zona de testes DanWEC, também na Dinamarca. Atualmente a empresa está a angariar investimentos com o propósito de dar início à construção de um protótipo à escala real, com uma capacidade de 7 MW. A sua instalação está prevista para St. Ahnn's Head, UK. Existe ainda outro projeto ativo deste dispositivo em Portugal, levado a cabo pela empresa TecDragon - Tecnologia da Energia das Ondas SA, que

tenciona instalar um parque de 50 MW num local a determinar na costa marítima Portuguesa [A.21].



Figura 3.13 - Dispositivo Wave Dragon, instalado em Nissum Bredning, na Dinamarca.
Fonte: Ref. A.21.

No quebramar do porto de Civitavecchia, na Itália, está em curso a construção e ensaio do primeiro dispositivo U-OWC à escala real (Fig. 3.14), com uma potência instalada estimada de cerca de 2,25 MW. Este quebramar possui 19 câmaras-de-ar e está ligado á rede elétrica nacional Italiana. A instalação está preparada para testar diversas tecnologias de PTO, nas diferentes câmaras de ar (Spanos P. D. *et al*, 2017).



Figura 3.14 - Protótipo U-OWC em construção na central de energia das ondas do porto de Civitavecchia, Roma, Itália.
Fonte: Ref. 35 (Spanos P. D. *et al.*, 2017).

Em 2011, a Ente Vasco de la Energia (entidade do governo Basco) encomendou a construção da central de energia das ondas de Mutriku (Fig. 3.15), no País Basco espanhol. Esta central é do tipo OWC e tem uma capacidade instalada de 300kW. A estrutura da central compreende 16 câmaras de ar e 16 turbinas. Cada turbina Wells está ligada a um gerador de 18,5 kW. Este

projeto obteve apoio financeiro por parte da Comissão Europeia no âmbito do FP7 (Seventh Framework Program) e representa um investimento global de 6,4 milhões de euros [A.22].



Figura 3.15 - Central de energia das ondas de Mutriku, em Espanha.

O WaveEL (Fig. 3.16), desenvolvido pela empresa Waves4Power (Gotemburgo, Suécia), é um dispositivo do tipo point absorber. É constituído por uma bóia que sustenta um tubo vertical central. O dispositivo está ancorado ao fundo do mar, de tal forma que a bóia flutua livremente ao longo do eixo vertical. Dentro do tubo está um pistão de água que aciona um PTO hidráulico. Em 2010 foi testado um protótipo à escala real em Vinga, na Noruega. Ainda na Noruega, desta vez em Rundle, foi criado um Parque de Demonstração de Energia das Ondas onde um destes dispositivos está instalado, ligado à rede elétrica. Dado que este projeto é muito recente, ainda não há dados disponíveis sobre a energia produzida em condições reais [A.23].



Figura 3.16 - Dispositivo waveEL no Parque de Ondas de Rundle, na Noruega.
Fonte: Ref. A.23.

A zona de testes de Lysekil (Fig. 3.17) foi criada em 2006, na Suécia. Este projeto, liderado pela Universidade de Uppsala, conta com a instalação de 10 dispositivos do tipo “point absorber”, duas subestações e um cabo submarino de transmissão de potência. Adicionalmente, este projeto tem licença para a instalação de 30 bóias dedicadas a estudos de impacto ambiental e de uma torre dedicada à monitorização da interação das ondas com os dispositivos. Os dispositivos de recuperação de energia das ondas instalados nesta zona de testes baseam-se no uso de geradores lineares ancorados no fundo do mar, acionados por bóias oscilantes à superfície [A.24 e A.25].



Figura 3.17 - Zona de testes de Lysekil durante o verão de 2008.
Fonte: Ref. A.24.

Finalmente, referimos aqui o dispositivo ANACONDA, que é o objecto de estudo deste trabalho e será descrito na subsecção e capítulo seguintes. O desenvolvimento deste dispositivo está já em fase avançada, antevendo-se a instalação de um protótipo de demonstração em condições marítimas reais, no decurso da próxima década.

3.2 O dispositivo ANACONDA

O dispositivo de recuperação de energia das ondas ANACONDA foi inventado e patenteado em 2006 (Farley & Rainey, 2006a). Estes investigadores propuseram um tubo flexível, totalmente submerso, para efetuar a recuperação da energia das ondas. As equações básicas do funcionamento do dispositivo podem ser vistas em Farley & Rainey (2006b). Para este dispositivo, Farley *et al.* (2006c) estimaram que o protótipo seria capaz de absorver 1MW quando operando com 50 kW/m de potência das ondas incidentes, em águas de 50 a 100 m de profundidade.

Os primeiros testes em laboratório foram realizados por Chaplin *et al.* (2007a). Neste estudo foi concluído que o dispositivo teria um comprimento de captura de 3 - 4 diâmetros, para uma vasta gama de frequências das ondas incidentes. O desempenho do dispositivo foi

possivelmente sobrestimado devido à pequena escala do modelo. Os princípios do dispositivo ANACONDA são corretamente analisados em Chaplin *et al.* (2007b). Mais tarde, Chaplin *et al.* (2010) realizaram uma segunda série de testes com um modelo à escala 1:25, na Offshore Wave Basin do DHI, em Copenhaga. Estes ensaios consistiram essencialmente em testes de radiação.

Posteriormente, teve lugar uma nova campanha de ensaios da ANACONDA, com um tubo reforçado a tecido à escala 1:25, no canal de ondas da Universidade de Solent, em Southampton. Os resultados desta nova série de testes podem ser consultados em Chaplin *et al.* (2012) e Farley *et al.* (2012). Pela primeira vez, nesta experiência, as medições efetuadas estão de acordo com as previsões teóricas para a extração de potência. Os comprimentos de captura máximos medidos foram inferiores a 2 diâmetros do tubo, neste novo modelo. Em 2014 foi ensaiado no *fluidslab* um modelo da ANACONDA à escala 1:100 - Mendes *et al.* (2014a, 2014b), flutuando livremente em canal de ondas. Os resultados deste estudo ajudaram a compreender o comportamento do sistema em águas profundas e em águas restritas.

O sistema ANACONDA é atualmente desenvolvido pela empresa Checkmate Seaenergy Ltd. O dispositivo está numa fase de desenvolvimento pré-comercial e podem ser encontrados planos para a sua instalação no website oficial da empresa [A.26]. Em 2015 esta empresa obteve financiamento, em conjunto com a Wave Energy Scotland, para prosseguir a investigação do dispositivo realizando novos ensaios em tanque hidrodinâmico. Nesse ano foi também decidido dar início aos testes de um protótipo à escala 1:4. Concretamente no *fluidslab*, o estudo do dispositivo ANACONDA foi prosseguido com a realização de testes com um modelo à escala 1:50, ensaiado no tanque hidrodinâmico do Laboratório (Mendes *et al.*, 2017). Até à data todos os estudos realizados indicam que o dispositivo ANACONDA tem um bom rendimento, resiste adequadamente a condições ambientais extremas e tem potencial para ser economicamente viável.

3.3 Zonas de teste em Portugal

Em 2008 foi criada uma zona piloto para a promoção das tecnologias de aproveitamento da energia das ondas ao largo de São Pedro de Muel (Leiria), em Portugal. Esta zona piloto é denominada de Zona Piloto Portuguesa (ZPP) e cobre uma área de aproximadamente 320 km² em águas de 30 a 90 m de profundidade, a 5 - 8 km da costa (Fig. 3.18). O objetivo principal desta iniciativa é criar um espaço na costa Atlântica Portuguesa dedicado ao desenvolvimento e comercialização de tecnologias energéticas marítimas, com

particular interesse na energia das ondas. A ZPP inclui o corredor dedicado à instalação do cabo subaquático que faz a ligação à subestação da Marinha Grande em terra, mas não inclui o cabo propriamente dito. O clima de ondas existente na ZPP é caracterizado por ondas de 2.2 m de altura média e 7.2 s de período médio, incidindo predominantemente de NW (71.3%) a W (13%) [Ref. A.27].

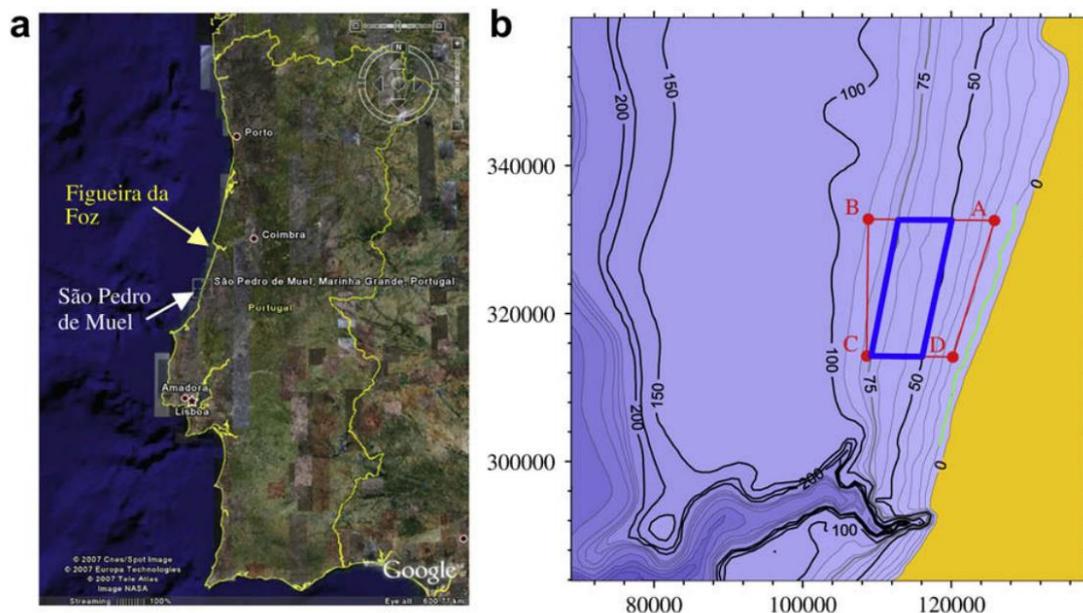


Figura 3.18 - Zona Piloto Portuguesa de São Pedro de Moel: a) Localização geral; b) Batimetria, limites da zona piloto (vermelho) e zona de extração de energia (azul).
Fonte: Ref. 30 (Palha A. *Et al.*, 2010).

A ENONDAS, uma subsidiária da REN (Rede Elétrica Nacional) com o nome comercial OceanPlug, recebeu em 2010 a concessão da exploração da zona piloto para aproveitamento da energia das ondas. A concessão tem uma duração de 45 anos e inclui a autorização para a instalação de infraestruturas e ligação à rede elétrica pública Portuguesa [Ref. A.28].

O desenvolvimento da Zona Piloto Portuguesa está dividido em três estágios. O primeiro estágio desenvolverá a ZPP para receber sistemas geradores de eletricidade baseados na energia das ondas que estejam em estágio pré-comercial ou em estágio de prova de conceito, com o objetivo de injetar potência elétrica na rede elétrica nacional até 80 MW. O segundo estágio de desenvolvimento permitirá a ligação de sistemas à rede elétrica pública com potência instalada combinada de até 250 MW. Finalmente, no terceiro estágio serão implementados sistemas comerciais, sem limitações a nível de potência instalada. Nesta zona piloto já foram instalados, por tempo limitado, alguns dispositivos em fase de prova de conceito. Em 2015, teve início uma campanha de levantamento de informação marinha realizado com um dispositivo WaveGlider. Atualmente a ZPP ainda não fornece energia à rede elétrica, visto que a construção da sua infraestrutura ainda não está finalizada.

Também em 2008 foi desenvolvido o primeiro projeto comercial de energia das ondas: a Aguçadoura Wave Farm, localizada a 5 km da costa da Aguçadoura em Portugal. Este parque de ondas contou com três dispositivos Pelamis (ver Fig. 3.1) produzindo 2,25 MW de potência elétrica. Atualmente os dispositivos Pelamis estão armazenados no porto de Leixões devido a problemas técnicos, tendo produzido energia elétrica apenas durante 4 meses.

Em 1999 foi criada a Central de Ondas do Pico, localizada em Porto Cachorro, na costa norte da ilha do Pico, Açores (WAVEC, 1998). Esta central é explorada pelo WAVEC, tendo produzido energia elétrica com algumas interrupções até 2016 (ver secção 1.2), altura em que foi encerrada por necessitar de reparações. Em 2017, a diretora regional da energia comunicou a intenção do governo regional de reabrir a central numa ótica de criar as condições necessárias para desenvolver uma zona de testes de soluções emergentes na área da energia das ondas e usufruir de todo este potencial para investigação e desenvolvimento [Ref. A.4].

Capítulo 4

Ensaio experimentais realizados com a ANACONDA

De acordo com os objectivos traçados no capítulo 1 (secção 1.3), p. 7, foi construído um modelo físico da ANACONDA à escala 1:50. Este modelo foi seguidamente ensaiado no tanque hidrodinâmico do Laboratório *fluidslab* no decurso de 2016. O presente capítulo faz uma descrição sucinta do modelo, do sistema PTO, do clima de ondas geradas no canal e das medições realizadas. Esta parte termina com a análise de desempenho do dispositivo na extração da energia das ondas.

4.1 Modelo físico do dispositivo

O modelo físico do dispositivo consiste num tubo de borracha com 2,44 m de comprimento, um diâmetro de 18,9 cm e 1,05 mm de espessura (Fig. 5.1). O tubo está alinhado com a direcção de propagação das ondas incidentes e é conectado a jusante com uma chaminé vertical de acrílico transparente, através de um cotovelo em PVC. Frente às ondas incidentes o tubo é fechado por um nariz, onde se encontra uma torneira através da qual se faz o enchimento e o vazamento do sistema, utilizando para tal uma mangueira ligada a uma bomba reversível Rover 20 CE. Uma vez pressurizado, o tubo sustenta uma coluna de água na chaminé e, acima desta, está uma câmara pneumática que comunica com a atmosfera através de um orifício de diâmetro d_0 . A pressão dentro do tubo pode ser regulada através da altura piezométrica h_0 . O nosso modelo físico está montado dentro de um tanque de ondas com largura $B=2,03$ m, comprimento igual a 11 m e profundidade $h=1,9$ m.

O funcionamento do sistema baseia-se na interação entre as ondas geradas no canal e o tubo flexível da ANACONDA. Desta interação são geradas ondas de pressão longitudinais que viajam em direção à chaminé, cuja amplitude é amplificada ao longo do tubo. Este fenómeno deve-se à distensibilidade D , do material utilizado no tubo. Os impulsos transmitidos à entrada do cotovelo induzem oscilações na coluna de água dentro da chaminé, sendo que esta irá funcionar como um pistão líquido que comprime e distende, alternadamente, o ar contido dentro da câmara pneumática. Esta energia de pressão pode ser convertida em potência útil através de um grupo turbina-gerador no sistema real. A impedância do PTO (Power take-off system) é simulada no nosso modelo pela descarga do ar através de um orifício.

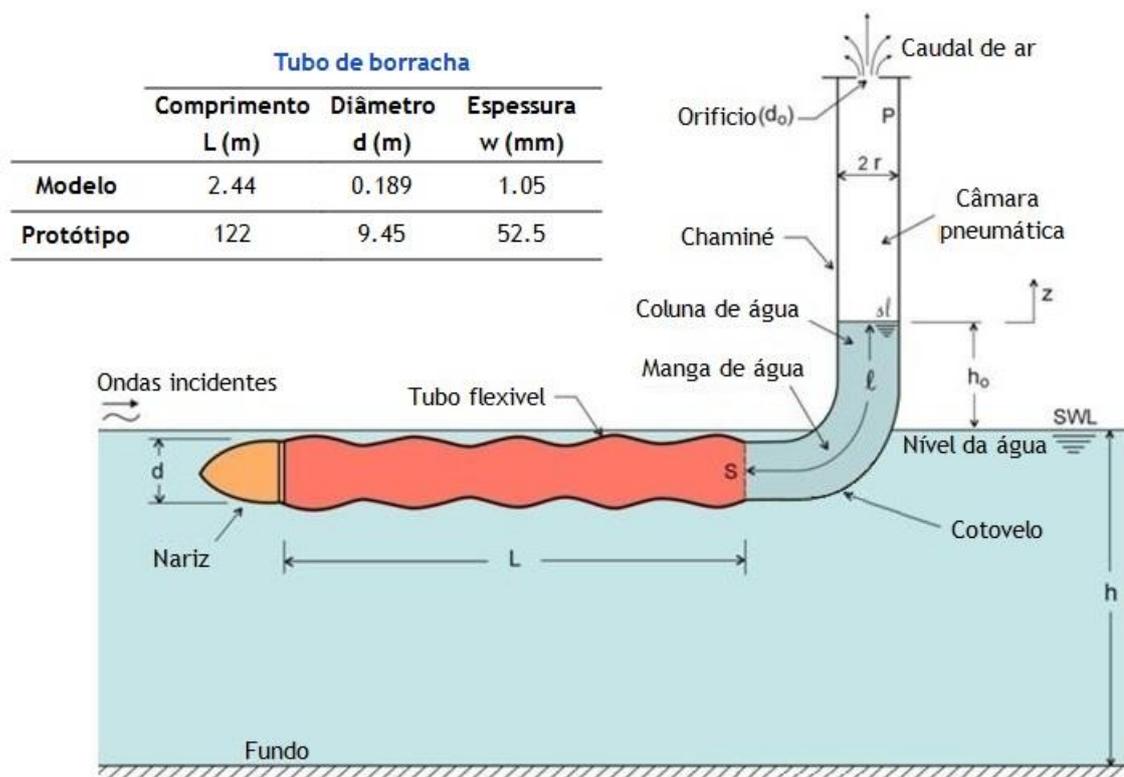


Fig. 4.1. Esquema simplificado do dispositivo ANACONDA acoplado a um PTO pneumático.

A utilização da ANACONDA acoplada a uma OWC apresenta vantagens em relação à utilização de uma OWC convencional. Em primeiro lugar, não se desenvolvem vórtices à entrada da OWC, o que se traduz perdas de energia significativamente menores que nas OWCs convencionais. Em segundo lugar, quando são esperadas condições climáticas extremas, a ANACONDA pode ser esvaziada, fechando efetivamente a entrada da OWC e protegendo assim os componentes mais dispendiosos das condições potencialmente destrutivas.

A nossa montagem experimental (Fig. 4.2) permite a medição das oscilações da água na chaminé, bem como os campos de ondas incidente e transmitido, através de quatro sondas de nível do tipo resistivo. Para controlar estas sondas é utilizado um aparelho de monitorização

de quatro canais da HR-Wallingford. A pressão do ar na câmara pneumática é monitorizada através de um transdutor de pressão diferencial PX409-005CGV, que lê pressões até ± 5 PSI. Antes do sinal de pressão ser encaminhado para o sistema ADC, é amplificado por um aparelho da Fylde FE-379-TA e exportado para um osciloscópio digital RT TDS220 da Tektronix. A aquisição de todos os sinais é feita através de uma placa KUSB-3100S, da Keithley. A incerteza da medição das sondas de nível é aproximadamente de 0,5 mm e a precisão do transdutor de pressão é $\pm 0,08\%$ LSB LHR. Os dados de todos os canais foram recolhidos a uma frequência de amostragem de 200 Hz, durante 30 s. Um computador de 64-bit Pentium Dual-Core CPU E5700 a 3 GHz com 4 GB de RAM é responsável pelo processamento dos dados. O software Testpoint V7 é utilizado para aquisição, controlo da instrumentação e análise dos dados.



Figura 4.2 - Montagem experimental para aquisição de dados e controlo da instrumentação.

4.2 Sistema de extração de potência

O modelo físico utiliza um sistema de extração de potência (PTO) pneumático cujo funcionamento é, por natureza, não linear. A Fig. 4.3 representa esquematicamente o PTO do dispositivo.

A descarga da câmara pneumática através do orifício, de diâmetro d_0 , em escoamento incompressível, pode ser formulada com base na equação da continuidade e na equação de Bernoulli. O caudal mássico de ar através do orifício \dot{m} é obtido a partir da lei da conservação de massa:

$$\dot{m} = \rho A \times V(t) \quad (4.1)$$

onde ρ é a massa volúmica do ar na câmara, cuja secção transversal tem uma área A , e $V(t)$ é a velocidade do pistão de água na chaminé.

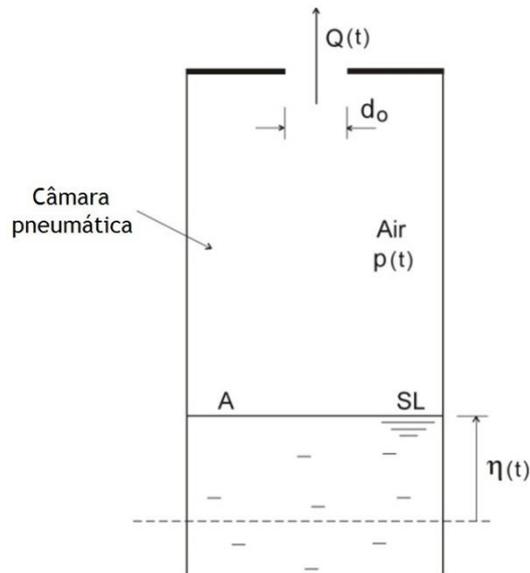


Figura 4.3 - Sistema de extração de potência.

Desprezando a compressibilidade do ar ($\rho = \text{constante}$), a taxa de variação da massa de ar dentro da câmara pneumática é dada por:

$$\frac{dm}{dt} = A\rho \frac{d\eta}{dt} \quad (4.2)$$

sendo $\eta(t)$ o deslocamento instantâneo da superfície livre da coluna de água na chaminé. Explicitando em seguida o caudal de ar dado pela Eq. (4.1), em termos da velocidade da coluna de água na chaminé, obtemos então:

$$Q = A \times \frac{d\eta}{dt} \quad (4.3)$$

Daqui resulta que, para estimar o caudal de ar através do orifício, Eq. (4.3), é apenas necessário medir a taxa de variação do nível de água na chaminé ao longo do tempo. Isto resulta, naturalmente, de assumirmos que o ar é incompressível na câmara.

Se $p(t)$ é a pressão do ar dentro da câmara, a taxa de trabalho realizado pelas forças de pressão sobre a superfície livre da coluna de água oscilante é o produto do caudal volúmico Q

pela pressão de ar na câmara. O potência média extraída pelo PTO durante um período de oscilação da água na chaminé é, nesse caso:

$$P = \overline{p(t) \times Q(t)} \quad (4.4)$$

Para determinar a potência extraída pelo dispositivo é então igualmente necessário medir a pressão do ar dentro da câmara, para além da velocidade da coluna de água oscilante.

A Fig. 4.4 mostra os registos das séries temporais do deslocamento da água medido na chaminé $\eta(t)$, da pressão medida na câmara pneumática $p(t)$ e da estimativa do caudal volúmico $Q(t)$ obtido a partir da Eq. (4.3).

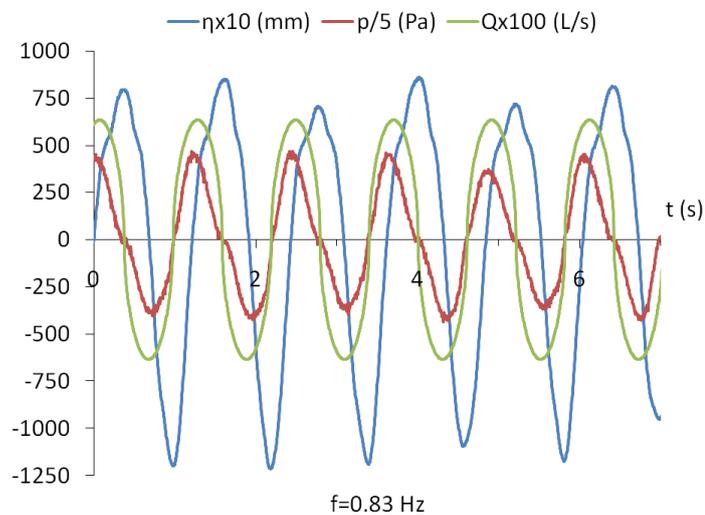


Figura 4.4 - Série temporal do deslocamento da água na chaminé, da pressão medida na câmara pneumática e do caudal volúmico calculado, para um registo de 7 s a 0,83 Hz ($d_0 = 15,0$ mm, ondas da série 1).

4.3 Campo de ondas gerado no canal

O campo de ondas gerado no canal é monitorizado por três sondas de nível, duas localizadas entre o gerador de ondas e o modelo do dispositivo, e uma terceira sonda entre o modelo e a praia. Os sinais das duas primeiras sondas servem para fazer a análise de reflexão e determinar a altura da onda incidente. A última sonda de nível controla a altura das ondas transmitidas para a traseira do modelo. A análise do campo de ondas refletidas e transmitidas é importante para o balanço de energia global.

O gerador de ondas do canal é do tipo comporta articulada no fundo, movida por um sistema excêntrico-manivela acionado por um motor NORD SK132S/4. Foram geradas três séries de ondas no canal; cada uma destas três séries corresponde a uma dada excentricidade imposta

no gerador de ondas. A tabela 4.1 sintetiza todas as condições de teste impostas durante o ensaio do modelo físico, nomeadamente: a frequência da onda incidente, o período, a altura e comprimento de onda, o declive da superfície livre e a potência transmitida pelas ondas.

Tab. 4.1: Campo de ondas incidentes geradas.

Largura do tanque B=2,03 m			Profundidade da água h=1,90 m			
Série de ondas	f (Hz)	T (s)	H (m)	λ (m)	H/ λ médio	P _i (W)
1	0.51 - 0.95	1.06 - 1.96	0.064 - 0.167	1.74 - 5.97	0.043	20.680 - 72.039
2	0.51 - 0.95	1.05 - 1.95	0.080 - 0.217	1.73 - 5.93	0.047	33.006 - 107.356
3	0.51 - 0.88	1.14 - 1.97	0.099 - 0.224	2.02 - 6.02	0.054	50.474 - 133.223

Como se pode observar na tabela, as ondas de alturas menores pertencem à série 1 e as de maior altura pertencem à série 3. Estas ondas são de segunda e terceira ordem. À escala real, as 3 séries geradas no canal correspondem a ondas de 7 a 14 s de período e 3 a 11 m de altura.

Como foi referido na secção 2.3, no mar dos Açores verificam-se maioritariamente ondas de 5 a 8 s de período e 1 a 4 m de altura. No entanto, considerando as condições extremas pontuais, as ondas podem ter de 3 a 13 s de período e 1 a 14 m de altura. Assim sendo, o campo de ondas gerado na nossa experiência é representativo do clima de ondas normalmente observado no mar dos Açores, bem como de algumas das condições extremas observadas.

4.4 Frequências naturais e de sintonização

Para otimizar o funcionamento do sistema é importante conhecer a frequência de sintonização entre as ondas de pressão dentro do tubo da ANACONDA e as ondas incidentes que excitam o modelo, bem como a frequência natural de oscilação da coluna de água dentro da chaminé.

Pode demonstrar-se que a amplitude da onda de pressão induzida no fluido dentro do tubo flexível é máxima quando a velocidade desta onda U é igual à celeridade c (velocidade de fase) da onda incidente (Lighthill, 1978). Deste modo a frequência de sintonização do tubo com o campo de ondas incidentes, f_0 , para águas de profundidade finita h , é dada pela seguinte fórmula:

$$f_0 = \frac{g \tanh(kh)}{2\pi \sqrt{wE/(\rho_1 d)}} \quad (4.5)$$

onde k é o Número de Onda (Dean, R. G. *et al.*, 1991), w é a espessura do tubo, $E=0,91$ MPa é o módulo de Young da borracha e ρ_1 é a massa volúmica da água dentro do tubo. Para águas profundas o valor da frequência de sintonização do tubo é $f_0=0,69$ Hz.

A frequência natural de oscilação da coluna de água (OWC) na chaminé é, por seu lado, função do comprimento do pistão líquido, ℓ . Neste caso, para oscilações livres não-amortecidas, a frequência f_1 do sistema OWC vale:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\ell}} \quad (4.6)$$

No nosso modelo físico $\ell = 0,708$ m, a que corresponde uma frequência $f_1=0,59$ Hz.

À escala real, o período de sintonização do tubo de borracha corresponde a ondas de $T_0=10$ s e comprimento de onda é $\lambda_0=156$ m. Por sua vez, o período natural da coluna de água da chaminé é de $T_1=12$ s, para um comprimento do pistão de água de aproximadamente 35 m. Destes 35 m, 10,6 m correspondem à altura piezométrica h_0 acima do nível da água exterior.

A dinâmica do sistema é governada pelo fator de amplificação AF, que é a razão entre a altura da oscilação da superfície da água no interior da chaminé e a altura da onda incidente. A Fig. 4.5 representa o fator de amplificação para a chaminé aberta e para descargas através de diferentes orifícios ($d_0=10-30$ mm), em função do período da onda incidente, para a série de ondas 1.

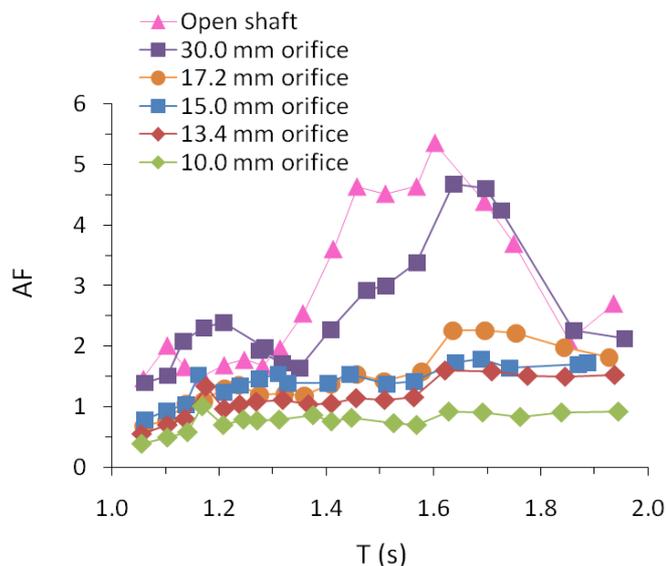


Figura 4.5 - Fator de amplificação AF em função do período das ondas T , para a série de ondas 1 e diferentes diâmetros de orifício do PTO, incluindo chaminé aberta.

As maiores ampliações observadas no sistema PTO, ainda para a série de ondas 1, ocorrem perto do período natural da OWC: $T_1=1,60-1,69$ s. Para a chaminé aberta e nesta gama de períodos, $AF=4,5 - 5,4$. Perto do período de sintonização do tubo ($T_0=1,45$ s) registou-se um segundo pico de AF, sensivelmente igual a 4,6. Pode igualmente observar-se que o valores máximos de AF decrescem significativamente com o aumento da impedância do sistema. Surgem ainda novas ressonâncias para $T=1,1$ s e, possivelmente, para períodos superiores a 2 s. Comparando estes valores com os correspondentes às séries de onda 2 e 3, podemos referir que o valor máximo do fator de amplificação varia substancialmente com a altura das ondas. Muito possivelmente isto será devido a efeitos não-lineares induzidos pela interação do tubo com a onda incidente.

Capítulo 5

Análise do desempenho do dispositivo

Para estimar o rendimento do dispositivo ANACONDA foi, em primeiro lugar, determinada a potência extraída pelo modelo físico das ondas geradas no canal hidrodinâmico. Esta potência é função da impedância da turbina, isto é, do diâmetro do orifício do PTO no modelo. Ela depende também da interação do tubo com as ondas incidentes, estando portanto diretamente relacionada com a altura da onda incidente. Estas variáveis condicionam estreitamente a pressão na câmara pneumática e o caudal de ar turbinado. A estimativa destes parâmetros, cujo produto dá a potência, é efetuada assumindo primeiramente que o fluido é incompressível. Para refinar o cálculo da potência e, em definitivo também do rendimento, procedemos à determinação dos efeitos de compressibilidade.

5.1 Potência absorvida

A potência $P(t)$ extraída pelo sistema foi calculada a partir da Eq. (4.4), assumindo que o escoamento é incompressível. Para este cálculo foram consideradas apenas as componentes fundamentais das séries temporais medidas da oscilação da coluna de água na chaminé, $\eta(t)$, e da pressão na câmara pneumática $p(t)$. A Fig. 5.1 mostra as séries temporais da pressão na câmara, do caudal através do orifício e da potência convertida no PTO. Este registo corresponde às ondas incidentes de período $T=1,2$ s da série 1 e um orifício do PTO de 15,0 mm de diâmetro. Este orifício corresponde à melhor impedância, ou seja, permite extrair a maior potência. Como seria de esperar o caudal turbinado e a pressão medida na câmara pneumática estão em fase e, por consequência, o mesmo se verifica para a potência absorvida. Nestas estimativas é assumido que o sistema extrai energia com a mesma

eficiência para caudais positivos (da câmara para a atmosfera) e negativos (da atmosfera para a câmara).

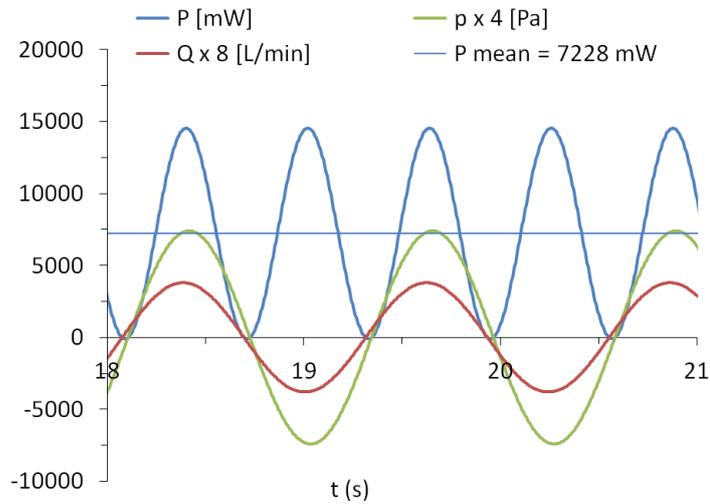


Figura 5.1 - Séries temporais das componentes fundamentais da pressão medida na câmara pneumática e caudal de ar através de um orifício de 15 mm de diâmetro, em conjunto com a potência instantânea calculada e correspondente média (período de onda incidente: $T=1,23$ s).

A Fig. (5.2) mostra a potência média (P) que é absorvida das ondas incidentes de período T , geradas nas três séries de ondas. Estes resultados foram determinados para o melhor orifício testado ($d_0=15$ mm), com um tubo de 2,44 m de comprimento e 189 mm de diâmetro, considerando o escoamento no PTO incompressível.

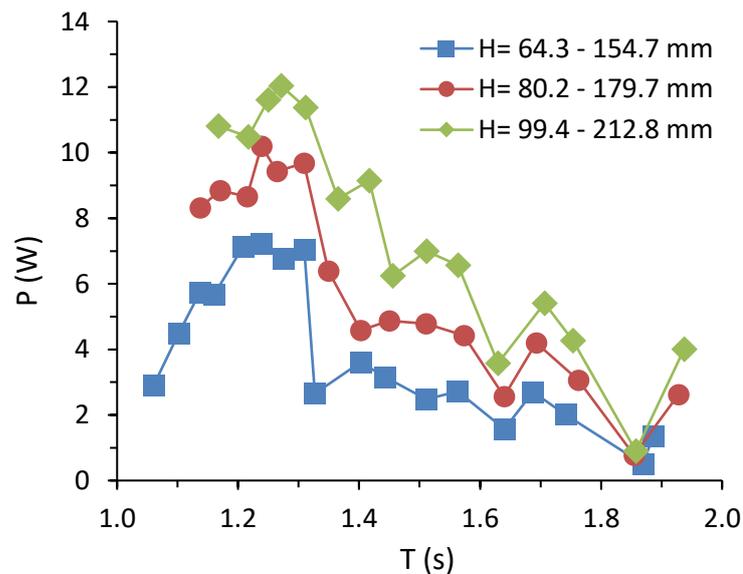


Figura 5.2 - Potência média extraída no PTO em função do período das ondas incidentes, para três séries de ondas e um orifício de 15 mm de diâmetro.

Um primeiro pico de potência extraída ocorre para ondas incidentes de período entre 1,2 e 1,3 s. Em condições reais, no oceano, isto corresponde a períodos de aproximadamente 9 s. Entre os 1,3 e 1,5 s observa-se um aumento da potência extraída, cujos valores são aproximadamente 50% inferiores aos valores do primeiro pico. As condições deste segundo pico acontecem perto do período de sintonização do tubo de borracha T_0 . Um terceiro pico na potência extraída ocorre no período natural da OWC: $T_1=1,7$ s. Como já era esperado, a potência extraída é maior para as séries de ondas 2 e 3, que são as mais energéticas. Para um diâmetro de orifício $d_0=15,0$ mm os valores máximos de potência extraída são $P=7,23, 10,20$ e $12,04$ W , respetivamente para a série de ondas 1, 2 e 3.

5.2 Rendimento do dispositivo

O rendimento do sistema pode ser estimado a partir da potência média absorvida (Eq. 4.4) e da potência das ondas incidentes P_i , em termos de um comprimento de captura WC expresso em diâmetros de tubo:

$$WC = \frac{P}{P_i \times d} \quad (5.1)$$

onde d é o diâmetro do tubo pressurizado da ANACONDA e P_i é dado pela seguinte expressão (Falnes, J., 2002 e 2007).

$$P_i = \frac{\rho g H^2 \lambda}{8T} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (5.2)$$

Esta expressão é válida para ondas de altura H , comprimento λ , período T e Número de Onda k . A profundidade da água é h , sendo ρ_1 a sua massa volúmica.

A Fig. 5.3 apresenta o comprimento de captura WC em função do período das ondas incidentes T , considerando apenas a componente fundamental das séries temporais medidas. Pode-se observar que, para períodos superiores ao da sintonização do tubo ($T_0 = 1,45$ s), a captura de energia não é muito influenciada pela altura das ondas incidentes. Por outro lado, para períodos inferiores a T_0 acontece o oposto. Este gráfico evidencia dois picos significativos de comprimento de captura. O primeiro acontece perto dos 1,2 s e o segundo

acontece perto de 1,3 s de período das ondas. Para as três séries de ondas geradas no tanque, os comprimentos de captura máximos correspondentes são 2,31, 2,08 e 1,64 diâmetros, para alturas de onda $H=10,5$, $13,8$ e $17,2$ cm respectivamente. É importante referir que o período onde a potência extraída é máxima não coincide com o período onde o comprimento de captura é máximo. Para além disso, o sistema é mais eficiente para ondas de altura menor, como são as da série 1.

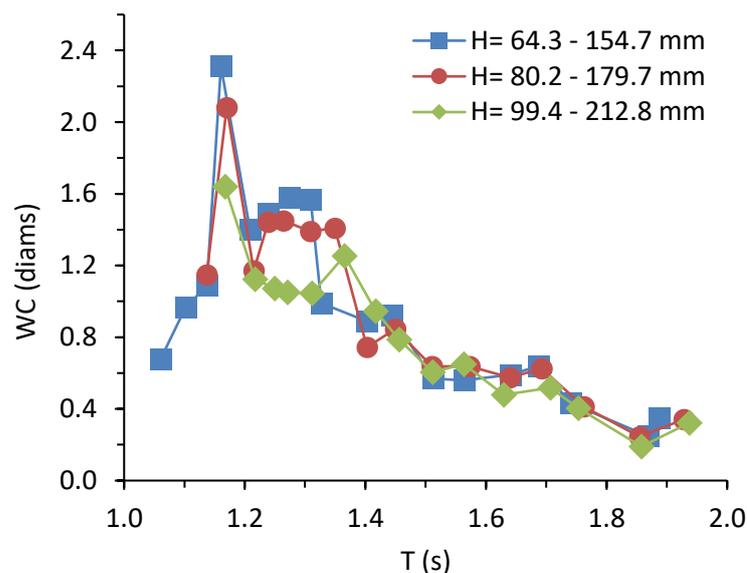


Figura 5.3 - Comprimento de captura de energia WC em função do período das ondas T, para um diâmetro de orifício do PTO de 15,0 mm e três séries de onda, considerando escoamento incompressível.

De acordo com as estimativas em *Mørk et al.* (2010) a potência das ondas no Atlântico Norte é de 30 - 60 kW/m. Assumindo um comprimento de captura conservador $WC = 1,5$ diâmetros e um diâmetro médio do tubo pressurizado $d = 9,45$ m à escala real, é admissível que a potência nominal da ANACONDA seja 0,4 - 0,9 MW, quando corretamente sintonizada.

5.3 Efeitos da compressibilidade

Para determinar os efeitos de compressibilidade no PTO foi utilizado um método de cálculo do caudal de ar que é apresentado em Reader-Harris (2015). Assim sendo, foram assumidas as seguintes hipóteses: não há perdas por atrito nem transferência de calor na câmara pneumática, portanto a expansão do ar é isentrópica e a energia potencial do fluido

por unidade de massa é constante. Considerando que o fluxo de ar no PTO segue na direção da câmara pneumática para a atmosfera através de um orifício de diâmetro d_0 , o balanço de energia ao longo de uma linha de corrente, utilizando a equação de Bernoulli, será:

$$\frac{1}{2}v^2 + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} = \frac{1}{2}v_0^2 + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} \quad (5.3)$$

sendo ρ a massa volúmica do ar na câmara pneumática, v é a velocidade do escoamento na câmara, p_0 é a pressão atmosférica e ρ_0 é a massa volúmica do ar à saída do orifício, onde a velocidade é v_0 ; a constante γ é a razão de calores específicos. O caudal mássico é dado pela equação da continuidade, que neste caso se escreve:

$$\dot{m} = \rho \bar{v} A = \rho_0 \bar{v}_0 A_0 \quad (5.4)$$

onde A é a área da secção transversal da câmara pneumática e A_0 é a área do orifício de descarga para a atmosfera. Resolvendo a Eq. 5.4 em relação à velocidade média do escoamento na câmara pneumática, obtemos:

$$\bar{v} = \frac{\rho_0 A_0}{\rho A} \bar{v}_0 \quad (5.5)$$

Da equação da relação adiabática para um gás perfeito $\frac{p_0}{\rho} = \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = n^{\frac{1}{\gamma}}$, onde n é a razão de pressões. Assumindo um perfil de velocidades uniforme na secção e substituindo a Eq. (5.5) na Eq. (5.3), obtemos:

$$v_0^2 \left(1 - \beta^4 n^{2/\gamma}\right) = \frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{\Delta p}{\rho} \left(\frac{1 - n^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{1 - n}\right) \quad (5.6)$$

Nesta equação β representa o quociente entre as áreas A_0 e A , tal que:

$$\frac{A_0}{A} = \left(\frac{d_0}{2r}\right)^2 = \beta^2 \quad (5.7)$$

o diâmetro do orifício do PTO é d_0 e $2r$ é o diâmetro a câmara pneumática.

Substituindo a Eq. (5.6) na Eq. (5.4) e simplificando, obtemos a expressão que dá o caudal mássico compressível em função do diferencial de pressão $\Delta p = p_0 - p$. Esta expressão é

$$\dot{m} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d_0^2}{4} \sqrt{2 \rho \Delta p} \quad (5.8)$$

onde ε é o fator de expansibilidade. Este vale 1 quando o escoamento é incompressível, sendo dado no caso geral por:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\gamma n^{2/\gamma}}{\gamma - 1}\right) \left(\frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 n^{2/\gamma}}\right) \left(\frac{1 - n^{\gamma-1}}{1 - n}\right)} \quad (5.9)$$

Enquanto que para o Tubo Venturi o fator de expansibilidade pode ser obtido diretamente da teoria, através da Eq. (5.9), para medidores de orifício este deve ser obtido experimentalmente. De acordo com Reader-Harris (2015), a equação empírica para o fator de expansibilidade toma a seguinte forma:

$$\varepsilon = 1 - (0.351 + 0.256 \cdot \beta^4 + 0.93 \cdot \beta^8) \cdot \left\{1 - \left(\frac{p_0}{p}\right)^{1/\gamma}\right\} \quad (5.10)$$

onde, preferencialmente, p_0/p deverá ser maior que 0,75. Esta equação apresenta um desvio padrão em relação aos dados experimentais de 0,0148 e foi aceite para a Norma ISO 5167-2:2003.

Na realidade a expressão para o caudal mássico ainda não está completa, pois há uma perda de pressão devido ao atrito na aresta do orifício. Para contabilizar esta perda, o caudal mássico da Eq. (5.8) é multiplicado por um coeficiente de descarga C_d que leva em conta estes efeitos. Este é definido como sendo o quociente entre o caudal real e o caudal teórico, de modo que a expressão do caudal mássico assume em definitivo a seguinte forma:

$$\dot{m} = C_d \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d_0^2}{4} \sqrt{2 \rho \Delta p} \quad (5.11)$$

É importante referir que para a descarga através de um orifício de aresta viva o jato de fluido continua a convergir após o orifício, sendo a zona de menor secção denominada *vena contracta*. A jusante desta secção o jato expande até atingir novamente um estado de equilíbrio com o fluido circundante.

O valor do coeficiente de descarga que é normalmente assumido na prática é aproximadamente 0,6. Este pode no entanto ser determinado para qualquer medidor de pressão diferencial ou qualquer instalação, através da sua calibração experimental em túnel de vento. Este procedimento é sem dúvida mais oneroso. Para reduzir estes custos foram deduzidas várias equações para o cálculo do C_d , ao longo de vários anos. Atualmente, apenas quatro são normalmente utilizadas:

- A equação de Buckingham [ANSI/API 2530:1985];
- A equação de Stoltz [ISO 5167:1980 e ISSO 5167-1:1991];
- A equação de Reader-Harris/Gallagher [API MPMS 14.3.1:1990 e API MPMS 14.3.1:2012];
- A equação de Reader-Harris/Gallagher [ISO 5167-1:1991/Amd.1:1998 e ISO 5167-2:2003];

No caso do nosso modelo físico do PTO da ANACONDA, escolhemos utilizar a equação de Buckingham. A utilização dos outros algoritmos pressupõe um conjunto de tomadas de pressão específicas que não foram implementadas nesta instalação.

A dedução da equação de Buckingham baseia-se nos dados recolhidos por Beitler no início dos anos 30, na Universidade de Ohio (OSU). Esta equação é apresentada na API 2530:1985, no Sistema Imperial de Unidades. No entanto, no presente trabalho, a equação foi convertida para o Sistema SI, assumindo a seguinte forma:

$$C_d = K_e \sqrt{1 - \beta^4} \frac{1 + \frac{E_b}{Re_d}}{1 + \frac{381E_b}{10^6 d_0}} \quad (5.12)$$

Nesta expressão d_0 é o diâmetro do orifício em milímetros. A constante K_e , por seu lado, é dada por

$$K_e = 0,5993 + \frac{0,1778}{2r} + \left(0,364 + \frac{0,383028}{(2r)^{0,5}}\right) \cdot \beta^4 + 0,4 \cdot \left(1,6 - \frac{25,4}{2r}\right)^5 \cdot \left(0,07 + \frac{12,7}{2r} - \beta\right)^{5/2} - \left(0,009 + \frac{0,8636}{2r}\right) \cdot (0,5 - \beta)^{3/2} + \left(\frac{41935,4}{(2r)^2} + 3\right) \cdot (\beta - 0,7)^{5/2} \quad (5.13)$$

Nesta equação $2r$ é o diâmetro da câmara pneumática em milímetros. Segundo a Norma quando um termo com expoente fracionário for negativo, este deverá ser tomado como 0. A constante E_b da Eq. (5.12) é dada por:

$$E_b = \frac{d_0}{25,4} \left(830 - 5000\beta + 9000\beta^2 - 4200\beta^3 + \frac{2671,1159}{(2r)^{0,5}} \right) \quad (5.14)$$

Para utilizar estas equações o diâmetro da câmara pneumática deverá ser superior a pelo menos 40,64 mm.

O número de Reynolds a definir, para o escoamento dentro da câmara pneumática, assume a seguinte forma:

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi\mu(2r)} \quad (5.15)$$

e para o escoamento no orifício

$$Re_d = \frac{Re_D}{\beta} \quad (5.16)$$

aqui, μ é a viscosidade dinâmica do ar. Note-se que, dado que C_d é função do Número de Reynolds, será necessário iterar a expressão (5.11) para obter uma aproximação aceitável do caudal mássico \dot{m} . Este procedimento comporta os passos que são seguidamente discriminados:

1. Assume-se um valor para C_d inicial (entre 0 e 1), que é usado para calcular a primeira aproximação de \dot{m} ;
2. Com este valor de \dot{m} calcula-se o Número de Reynolds Re_d ;
3. Com este valor de Re_d é determinado um novo valor de C_d ;
4. Com este valor de C_d obtém-se uma segunda aproximação para o caudal mássico \dot{m} ;
5. Os passos 2, 3 e 4 deverão ser repetidos até haver convergência do caudal mássico \dot{m} , com o grau de aproximação desejado.

Este método de iteração é normalmente eficaz; segundo Reader-Harris (2015), cerca de cinco iterações são suficientes para atingir uma boa convergência. No nosso caso particular, 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} .

$C_d=1$ quando o caudal é nulo (sistema parado ou em ponto-morto), não havendo portanto perdas. De outro modo, o coeficiente de descarga vai variando durante o funcionamento do sistema.

Durante os ensaios realizados com o modelo físico da ANACONDA foram obtidas séries temporais do valor instantâneo de C_d usando o algoritmo da equação de Buckingham. O valor médio de C_d para cada uma das séries de ondas geradas no canal, aplicando ao PTO um orifício com $d_0 = 15,0$ mm, é respetivamente: 0,612 para a série 1, 0,611 para série 2 e 0,609 para a série 3. A variação máxima do C_d médio de frequência para frequência, dentro da mesma série de ondas, é inferior a 4%. Estes valores estão em plena concordância com as tabelas de valores empíricos obtidos ao longo de vários anos, em diferentes laboratórios Europeus e Americanos (ver Reader-Harris, 2015, pp. 132 - 182). O Número de Reynolds dos ensaios realizados com esta abertura de orifício é da ordem de $Re_d=3,2 \times 10^4$.

Por forma a obter os valores instantâneos do caudal volúmico Q descarregado pelo orifício do PTO, resta-nos finalmente dividir os valores do caudal mássico $\dot{m}(t)$ que foram obtidos a partir da Eq. (5.11) pelos correspondentes valores da massa volúmica de ar $\rho(t)$, obtidos em função da pressão do ar na câmara pneumática $p(t)$ através da lei dos gases perfeitos.

$$\dot{m} = C_d \frac{\varepsilon}{\rho \sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi d_0^2}{4} \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (5.17)$$

Uma vez determinados os valores do caudal volúmico de ar no PTO, em condições de escoamento compressível (Eq. 5.17) e incompressível (Eq. 4.3), foi então calculada a redução de caudal que é devida a efeitos de compressibilidade, em termos relativos. Convém referir que, neste caso, o caudal incompressível foi determinado utilizando todas as componentes em frequência do registo temporal de $\eta(t)$, em vez de utilizar somente a componente fundamental do registo tal como foi feito no Capítulo 4. O caudal compressível, por seu lado, foi determinado usando também todas as componentes em frequência do registo de $p(t)$.

A Fig. 5.4 representa o caudal volúmico médio no PTO em função da pressão medida na câmara pneumática, para um orifício de 15,0 mm de diâmetro e ondas incidentes da série 1. Estão representadas nesta figura as condições de escoamento compressível (triângulos) e incompressível (círculos).

Nas condições do ensaio a redução máxima do caudal volúmico no PTO, devida a efeitos de compressibilidade, é de cerca de 18% e ocorre para um período de ondas incidentes de 1,31 s. Neste ponto, ao longo dos 30 segundos do ensaio à frequência de 0,76 hz, a pressão média na

câmara pneumática é de 1,079 kPa. Para alturas de onda maiores, como as das séries de ondas 2 e 3, a redução do caudal pode atingir os 27%.

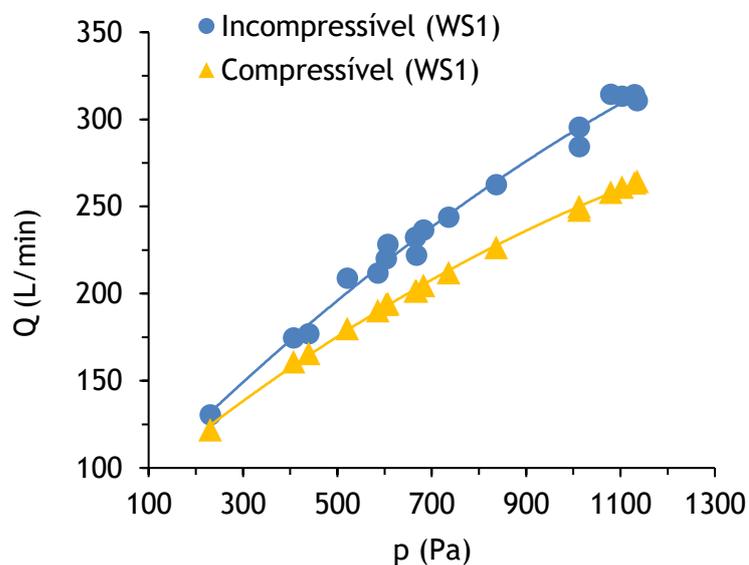


Figura 5.4 - Caudal volumétrico médio Q através de um orifício com $d_0= 15,0$ mm, em função da pressão média p na câmara pneumática, para a série de ondas 1.

Na tabela 5.1 é feito um balanço global do caudal volumétrico de ar turbinado, em condições de escoamento compressível e incompressível.

Tabela 5.1: Valores do caudal volumétrico no PTO considerando condições de escoamento compressível e incompressível, para a série de ondas 1.

T (s)	Q (L/min) Incompressível	Q (L/min) Compressível	Redução (%)
1.89	174.599	160.833	7.88
1.87	130.500	121.930	6.57
1.74	208.851	179.893	13.87
1.69	228.272	194.267	14.90
1.64	176.950	165.577	6.43
1.56	220.079	193.807	11.94
1.51	211.856	190.234	10.21
1.44	232.408	201.544	13.28
1.40	243.937	212.077	13.06

T (s)	Q (L/min) Incompressível	Q (L/min) Compressível	Redução (%)
1.33	221.995	201.475	9.24
1.31	314.362	258.212	17.86
1.27	313.304	261.049	16.68
1.24	314.187	263.390	16.17
1.21	310.794	264.323	14.95
1.16	284.371	249.994	12.09
1.14	295.516	247.916	16.11
1.10	262.542	226.526	13.72
1.06	236.593	204.723	13.47

A redução do caudal volúmico devida aos efeitos de compressibilidade varia entre 6% e 18%, para a série de ondas 1. Como se pode observar na tabela, os maiores efeitos de compressibilidade do ar ocorrem quando o caudal é maior, situação para a qual o diferencial de pressão é maior. Para as séries de ondas 2 e 3, respetivamente, a redução de caudal pode ser 5% e 10% maior que a anterior. Esta circunstância põe em evidência os efeitos não lineares associados a estas últimas ondas, cujas alturas são bastante superiores às da série 1.

A tabela 5.2 dá o balanço da potência média absorvida pelo PTO, também em condições de escoamento compressível e incompressível, para a série de ondas 1.

Tabela 5.2: Valores da potência média absorvida considerando condições de escoamento compressível e incompressível, para a série de ondas 1.

T (s)	P (W) Incompressível	P (W) Compressível	Redução (%)
1.89	1.454	1.354	6.88
1.87	0.633	0.583	7.96
1.74	2.189	1.967	10.15
1.69	2.828	2.452	13.30
1.64	1.606	1.530	4.71
1.56	2.671	2.445	8.47
1.51	2.725	2.354	13.64
1.44	3.206	2.854	10.98

T (s)	P (W) Incompressível	P (W) Compressível	Redução (%)
1.40	3.877	3.331	14.08
1.33	3.305	2.895	12.39
1.31	7.042	5.733	18.58
1.27	7.232	5.909	18.29
1.24	7.570	6.137	18.92
1.21	7.527	6.169	18.04
1.16	6.246	5.221	16.42
1.14	6.557	5.316	18.92
1.10	4.865	4.009	17.60
1.06	3.643	2.988	17.98

As reduções de potência média absorvida pelo PTO, para as ondas da série 1, estão compreendidas entre 5% e 19%. Para as ondas das séries 2 e 3, respetivamente, estas reduções podem ser 5% e 10% superiores. É de esperar uma redução do rendimento do sistema da mesma ordem da redução de potência absorvida, uma vez que a potência das ondas incidentes não varia.

Nas tabelas 5.1 e 5.2 observamos que as reduções de caudal volúmico e de potência absorvida, devido a efeitos de compressibilidade, são mais baixas na proximidade de períodos de ressonância do dispositivo. Isto deve-se muito provavelmente ao fato do rendimento do sistema ser mais elevado nestes períodos (ver Fig. 5.3).

Conclusão

O dispositivo ANACONDA é um sistema de extração de energia das ondas muito simples, que utiliza tecnologias bem conhecidas, com origem na indústria da borracha e de turbinas para geração de energia elétrica. O presente estudo trata da análise de desempenho de um modelo da ANACONDA à escala 1:50, que flutua livremente. O dispositivo em estudo incorpora um sistema de extração de potência (PTO) pneumático, de funcionamento não linear. O nosso modelo foi ensaiado no tanque hidrodinâmico do *fluidslab*, para ondas regulares monocromáticas de amplitude finita. A impedância da turbina de ar é simulada descarregando a câmara pneumática do modelo para a atmosfera através de um orifício. Foram testados vários orifícios de diferente diâmetro, a fim de simular a variação de impedância da turbina, ao longo de cerca de 50 ensaios para cada orifício do PTO. Aproximadamente 64% das ondas geradas estão em condições de águas profundas e as restantes correspondem a águas restritas. O coeficiente de reflexão na praia é inferior a 10%, na maioria dos casos.

Por forma a estimar a potência extraída e a eficiência do dispositivo, foram medidos a pressão de ar na câmara pneumática e o deslocamento da coluna de água na chaminé, assim como a altura e o período das ondas incidentes. Em condições de escoamento incompressível a potência máxima extraída pelo sistema foi de 12,04 W, para ondas incidentes da série 3 com uma altura $H=21,4$ cm e período $T=1,27$ s. O comprimento de captura é neste caso $WC=1.05$. De acordo com as nossas estimativas estas ondas têm um período de $T=9$ s à escala real; o seu comprimento de onda é $\lambda=126,6$ m e a altura de onda é de 10,7 m, para uma profundidade de 95m. Estas condições não correspondem, no entanto, ao funcionamento mais eficiente do sistema. O comprimento de captura é na realidade máximo para a série de ondas 1, atingindo um valor de 2,3 para um período de 1,16 s. Nestas condições a potência extraída é de apenas 5,67 W, com ondas de 10,5 cm de altura à escala do modelo. Em condições de mar reais estas últimas têm 8,2 s de período e 5,3 m de altura. Em geral, o comprimento de captura mantém-se superior ao diâmetro do tubo da ANACONDA para uma gama de períodos entre 1,1 s e 1,4 s aproximadamente. Isto corresponde a ondas de 8 a 10 s à escala real.

Relacionando os resultados do presente trabalho com experiências realizadas anteriormente, utilizando um modelo à escala 1:100 testado em canal de ondas (Mendes *et al.*, 2014), podemos concluir que o comprimento de captura de energia máximo de 2,6 obtido nesse estudo foi estimado por excesso, evidenciando importantes efeitos de escala.

O efeito da compressibilidade do ar representa uma redução máxima de caudal volumico no PTO de cerca de 18% e uma redução na potência extraída de cerca de 19%, para ondas de altura até 10,6 m. As maiores reduções de caudal turbinado e de potência extraída foram observadas para as ondas mais altas, em paralelo com uma redução no comprimento de captura.

De acordo com as nossas previsões e assumindo que a potência das ondas disponível no Arquipélago dos Açores é de 30 - 60 kW/m, a potência nominal do protótipo funcionando com um tubo de 7m de diâmetro deverá atingir 0,3 - 0,6 MW, quando devidamente sintonizado. Especificamente para a ilha do Corvo, um tubo de borracha com 2,5m de diâmetro e 15m de comprimento, operando com ondas de 8 a 10s e até 5m de altura, seria adequado para suprir uma procura mensal de eletricidade para fins domésticos da ordem dos 55 289 kWh.

Em condições reais de funcionamento deve ser esperada a ocorrência de difração das ondas, causada pela presença do tubo da ANACONDA. Como foi observado, quanto maior for a altura das ondas, maiores são os períodos em que surge difração significativa. No entanto, estes efeitos não parecem comprometer o desempenho do tubo. Para além disso, para períodos à volta dos 12 s, que é o período de ressonância da OWC, a ANACONDA pode exibir um movimento de cavalgamento. Surpreendentemente, este movimento parece melhorar a captura de energia do dispositivo.

Até ao momento, os resultados obtidos evidenciam um comportamento distinto do sistema no período de sintonização do tubo $T_0=1,45$ s (10,3 s à escala real), onde não-linearidades significativas caracterizam a interação entre o tubo e as ondas incidentes. Uma outra questão importante é a que se relaciona com os movimentos do tubo quando excitado por ondas de grande amplitude, especialmente para frequências próximas da ressonância. Este fato levanta questões relativamente aos efeitos viscosos, que não estão bem representados à escala do modelo. Em particular, é importante saber de que maneira isto afeta a estimativa de desempenho do sistema. Dado o valor do Número de Reynolds do modelo físico, os resultados obtidos no presente estudo não podem ser diretamente extrapolados para a escala real. Uma forma de contornar estas questões é realizar ensaios experimentais a uma escala próxima da escala natural.

Finalmente, um desenvolvimento futuro do trabalho requer a implementação de uma estratégia de controlo de fase ativo no sistema de extração de potência da ANACONDA.

Bibliografia

1. 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*, issue 50, pp. 263 - 257, Austrália.
2. Chaplin, J. R., Farley, F. J. M. and Rainey, R. C. T. (2007a): *Power Conversion in the Anaconda WEC*. Proc. of the 22nd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 4 pp., Piltvice.
3. Chaplin, J. R., Farley, F. J. M., Prentice, M. E., Rainey, R. C. T., Rimmer, S. J. and Roach, A. T. (2007b): *Development of the Anaconda All-Rubber WEC*. Proc. of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, 13 pp., Porto.
4. Chaplin, J. R., Farley, F. J. M., Hearn, G. E., Heller, V. and Mendes, A. (2010): *Hydrodynamic Performance of The ANACONDA Wavepower Device*. Proc. of the HYDRALAB III Joint User Meeting, Hannover.
5. Chaplin, J. R., Heller, V., Farley, F. J. M., Hearn, G. E. and Rainey, R. C. T. (2012): *Laboratory Testing the Anaconda*. *Philosophical Transactions of the Royal Society, A* 370, p. 403-424.
6. Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Leweis, T., Nielsen, K., Petroncini, S., Pontes, M., Schild, P., Sjöström, B., Sørensen, C., Thorpe, T. (2002): *Wave Energy in Europe: Current Status and Perspectives*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 6, p. 405 - 431.
7. Cornett, A. M. (2008): *A Global Wave Energy Resource Assessment*. ISOPE-2008-579, Ottawa.
8. Dean, R. G., Dalrymple, R. A. (1991): *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapura.
9. EDA (2017): *Procura e Oferta de Energia Elétrica*.
10. EDP (2016): *Dados Ibéricos 2016*. Direção de Planeamento Energético.
11. Falnes, J. (2002): *Ocean Waves and Oscillating Systems*. Press syndicate of the Cambridge University, United Kingdom.
12. Falnes, J. (2007): *A Review of Wave-energy Extraction*. *Marine Structures*, vol. 20, p. 185-201, Norway.
13. Farley, F. J. M. and Rainey, R. C. T. (2006a): *Distensible Tube Wave Energy Converter*. British Patent N°. GB 2434840.

14. 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, Loughborough.
15. Farley, F., J., M., Rainey, R., C., T.(2006c): ANACONDA - The bulge wave sea energy converter. Marine Energy Developments Ltd.
16. Farley, F. J. M., Rainey, R. C. T. and Chaplin, J. R. (2012): Rubber Tubes in the Sea. Phil. Transactions of the Royal Society, A 370, p. 381-402.
17. Folley, M., Whittaker, T. (2009): *Analysis of the nearshore wave energy resource*. Renewable Energy, vol. 34, p. 1709 - 1715.
18. Hernández, C., V., Telsnig, T., Pradas, A., V. (2017): JRC Wind Energy Status Report 2016 Edition - Market, technology and regulatory aspects of wind energy. Publications Office of the European Union, Luxemburgo.
19. International Hydropower Association (2017): Hydropower Status Report.
20. Isaacs, J. D., Seymour, R. J. (1973): The ocean power resource. International Journal of Environmental Studies, vol. 4, pp. 201 - 205.
21. Jager-Waldau, A. (2016): JRC PV Status Report 2016. Publications Office of the European Union, Luxemburgo.
22. Lewis, T (1999): A strategic review of the wave energy resource in Ireland - Wave energy moving towards commercial viability. IMECHE Seminar, London.
23. Lighthill, J. (1978): *Waves in Fluids*. Cambridge University Press, Cambridge.
24. Mendes, A. C., Paredes, L. M. A., Gil, F. A. S., Chaplin, J. R. (2014a): *Small-Scale Model Tests of a Rubber-Tube Wave Energy Converter with Pneumatic Power Take-Off*. Proc. ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, São Francisco.
25. Mendes, A. C., Paredes, L. M. A., Gil, F. A. S., Aguiar, M. L. (2014b): *O Dispositivo de Recuperação de Energia das Ondas Anaconda: Ensaio Experimentais em Modelo Reduzido*. V Conferência Nacional de Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia, Porto.
26. Mendes, A. C., Paredes, L. M. A., Gil, F. A. S. (2014c): *The Anaconda Wave Power System: Experimental Tests in Wave Flume*. International Conference on Advanced Technology & Sciences 2014, Antalya.
27. 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, & Arctic Engineering, 10 pp., Trondheim.
28. 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 Mechanics and Arctic Engineering, Shanghai.
29. Mollison, D., Pontes, M. T. (1992): Assessing the Portuguese wave-power resource. Energy, vol. 17, No. 3, pp. 255 - 268, Great Britain.

30. Palha, A., Mendes, L., Fortes, C. J., Brito-Melo, A., Sarmiento, A. (2010): The impact of wave energy farms in the shoreline wave climate: Portuguese pilot zone case study using Pelamis energy wave devices. *Renewable Energy* 35, pp. 62-77.
31. Pontes, M. T. (1998): Assessing the European Wave Energy Resource. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 120, p. 226 - 231.
32. Pontes, M. T., Aguiar, R., Pires, H. O. (2005): A nearshores wave energy atlas for Portugal. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 127, pp. 249 - 255.
33. Reader-Harris, M. (2015): *Orifice Plates and Venturi Tubes*. Springer International Publishing, Switzerland.
34. Smith, W. H. F., Sandwell, D. T. (1997): Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science* 277, 1956 - 1962.
35. Spanos, P. D., Strati, F. M., Malara, G., Arena, F. (2017): Stochastic Dynamic Analysis of U-OWC Wave Energy Converters. Proc. Of the 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Trondheim.
36. WAVEC (1998): *European Wave Energy Pilot Plant on the Island of Pico, Azores, Portugal. Phase Two: Equipment*. IST Report JOR3-CT95-0012 in the framework of the Non-Nuclear Energy Programme Joule III, Lisbon.

Lista de websites consultados

- A.1 <http://www.dgeg.pt/>
- A.2 <http://www.oceanenergycouncil.com>
- A.3 <http://www.seapower.ie/cost-of-energy/>
- A.4 <http://www.pico-owc.net/>
- A.5 www.projects.knmi.nl/wave_atlas
- A.6 <http://www.ECMWF.int>
- A.7 www.asme.org/events/omae
- A.8 www.EWTEC.org
- A.9 <http://www.pelamiswave.com/>
- A.10 <http://aw-energy.com>
- A.11 <http://www.sperboy.com>
- A.12 <http://www.ecofys.com>
- A.13 <http://www.seabased.com/en/>
- A.14 <http://www.oceanpowertechnologies.com/>
- A.15 <http://www.surfpower.ca/>
- A.16 <http://www.resolutemarine.com>
- A.17 <http://www.emec.org.uk>
- A.18 <http://www.corpowerocean.com/>
- A.19 <http://www.oceanenergy.ie/>
- A.20 <http://wavestarenergy.com/>
- A.21 <http://www.wavedragon.net/>
- A.22 <http://www.power-technology.com>
- A.23 <https://www.waves4power.com>
- A.24 <https://tethys.pnnl.gov>
- A.25 <http://www.teknik.uu.se>
- A.26 <http://www.checkmateukseaenergy.com/>
- A.27 <http://www.wavec.org>
- A.28 <http://www.oceanplug.pt>