



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Faculdade de Engenharia

Estudo do Dispositivo de Recuperação de Energia das Ondas ANACONDA

Luís Manuel Andrês Paredes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Electromecânica

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor António Carlos Mendes

Covilhã, Outubro de 2016

O presente trabalho foi realizado no âmbito 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.

Outubro de 2016



Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido na Universidade da Beira Interior, no quadro de um Projecto de *I&D* que teve o apoio da FCT e do Programa COMPETE.

Gostaria de exprimir a minha profunda gratidão para com o meu orientador, Prof. António Mendes, pela sua disponibilidade, amabilidade e apoio, e também pelos conhecimentos que me transmitiu. A confiança em mim depositada ao longo destes anos e o seu incentivo contribuíram decisivamente para que este trabalho tenha chegado a bom termo.

Agradeço a boa vontade e reconhecimento a competência do Sr. António Morgado, que fabricou o modelo físico no Laboratório de Mecânica dos Fluidos.

Quero também deixar um especial agradecimento aos meus colegas e amigos, que sempre me apoiaram e motivaram ao longo do meu percurso académico na UBI, em particular durante a realização deste trabalho.

Devo toda a minha gratidão à minha namorada, Joana Santos, ouvinte atenta das minhas inquietações e desânimos, mas também de alguns sucessos. Quero igualmente agradecer-lhe o apoio e encorajamento recebidos, pedindo-lhe em simultâneo desculpa pelo tempo que roubei à nossa convivência.

Ao meu irmão, Rui Paredes, agradeço a ajuda e fraternidade, e recordo os bons momentos que passamos juntos.

Por fim, agradeço aos meus Pais - Sílvio e Brígida Paredes - todo o esforço que fizeram para me proporcionar uma boa educação, e pelo seu constante incentivo e apoio para enfrentar as dificuldades que encontrei. Para eles, pelo seu amor incondicional e pela forma tão generosa como souberam ajudar-me ao longo de todos estes anos, aqui deixo uma palavra de reconhecimento muito especial.

Resumo

O ANACONDA é um dispositivo de conversão de energia das ondas relativamente recente. O sistema consiste essencialmente num longo tubo de borracha, cheio de água, que flutua alinhado com as ondas incidentes. Na extremidade da frente o tubo possui um nariz e a sua extremidade traseira está ligada a um sistema de extracção de potência. Quando é excitado pelas ondas do mar, este tubo flexível desenvolve internamente impulsos de pressão cuja amplitude aumenta em direcção ao sistema de conversão de energia. Neste dispositivo as ondas de pressão dentro do tubo impelem uma massa de água para uma chaminé. As oscilações da coluna de água dentro da chaminé, por seu lado, dão origem a variações de pressão no ar que está contido numa câmara pneumática superior. Estas variações de pressão podem então ser utilizadas para fazer funcionar uma turbina de ar com alternador. O presente estudo centra-se na análise de desempenho do sistema, quando este interage com ondas regulares de diferentes alturas e comprimentos de onda. Com esta finalidade foram realizados ensaios experimentais em canal de ondas, com um modelo reduzido do dispositivo à escala 1:100. No nosso modelo físico a câmara pneumática comunica com o meio ambiente exterior através de um orifício. Foram testados orifícios calibrados com diferente diâmetro. Procedeu-se à medição das ondas incidentes, reflectidas e transmitidas, assim como das oscilações do nível de água na chaminé, o que permitiu fazer uma estimativa da energia recuperada pelo dispositivo nas diferentes condições de funcionamento consideradas. São apresentados valores da potência extraída pelo sistema e do rendimento de absorção. Estes valores são finalmente utilizados para previsão do desempenho do dispositivo em condições de mar reais.

PALAVRAS-CHAVE: ANACONDA, energia das ondas, tubo flexível, ensaios em canal de ondas.

Abstract

The ANACONDA is a relatively new wave-energy conversion device. The system is essentially made out of a long rubber tube, filled with water, which floats perpendicular to the direction of wave propagation. The nose of the tube is aligned head to waves and its stern is connected to a power take-off system (PTO). When the ANACONDA is excited by the sea waves, the rubber tube develops internal pressure bulges whose amplitudes increase in the direction of the PTO. These bulges then push a mass of water into a vertical chimney, where the water-column oscillations take place. The water piston induces pressure variations in the air cushion contained inside the pneumatic chamber above the chimney. The pressure head is, therefore, used to drive an air turbine and electrical generator. The present study is focused on the analysis of the system's performance when it interacts with regular waves having different wave highs and periods. Having this in mind a comprehensive series of experimental tests were conducted in the wave flume of *fluidslab*, with a 1:100 scale model of the ANACONDA device. In the physical model the pneumatic chamber is connected to the atmosphere through a calibrated orifice. Six different orifice diameters have been tested. The incident, reflected and transmitted waves were measured, along with the chimney water level, allowing us to make an estimate of the energy extracted by the system. Predictions of the power extracted by the system and its absorption efficiency were obtained for the range of duty conditions imposed on the turbine. The results obtained are finally used to predict the performance of the ANACONDA in real sea conditions.

Keywords: ANACONDA, wave energy, flexible tube, wave flume tests.

Índice geral

Lista de símbolos	vii
Lista de figuras	ix
Lista de tabelas	xiii
1. Introdução à recuperação de energia das ondas	14
1.1 Energia das ondas: panorama global	14
1.2 Histórico dos dispositivos de recuperação a nível mundial	18
1.2.1 Sistemas pioneiros implementados	21
1.2.2 Outros sistemas ensaiados ou planeados	27
2. Estado actual das tecnologias de conversão	29
2.1 Protótipos de demonstração mais recentes	29
2.2 Dispositivos em funcionamento ou já descomissionados	51
3. Zonas e plataformas de teste	57
4. Estudo do dispositivo ANACONDA em Portugal	67
4.1 Estado da Arte	67
4.2 Desenvolvimento experimental do conceito	68
4.2.1 O modelo físico da <i>UBI</i>	69
4.2.2 Montagem do equipamento de medida	70
5. Upgrade da instalação experimental do Laboratório	72
5.1 Canal hidráulico do <i>fluidslab</i>	72
5.2 Sistema de aquisição e processamento de dados	74
6. Dinâmica do sistema de extracção de potência	76
6.1 Sistema de extracção pneumático	76
6.2 Funcionamento e sintonização do dispositivo	80
6.3 Condições impostas durante os ensaios	82
6.4 Potência e rendimento do sistema implementado	83
7. Apresentação e discussão dos resultados dos ensaios realizados	85
8. Conclusão	92
Referências bibliográficas	95
Lista de Websites consultados	97
Anexo: Descrição de alguns sistemas ensaiados ou planeados	100

Lista de símbolos

a	Submersão da popa
A	Área da superfície interna de água
A_0	Área do orifício
c	Celeridade das ondas
C	Coefficiente de contracção
C_d	Coefficiente de descarga
d	Diâmetro do tubo pressurizado
d_0	Diâmetro do orifício
e_p	Energia dissipada no orifício
D	Diâmetro da chaminé
D	Distensibilidade do tubo
E	Rendimento da energia de absorção
E	Módulo de Young
f	Frequência das ondas
f_0	Frequência natural de sintonização da manga de água
g	Aceleração da gravidade
h	Profundidade de água no canal
h_0	Desnível entre a superfície livre na câmara e a superfície livre exterior
h_1	Altura da câmara pneumática
H	Altura de onda
k_L	Número de onda
k	Coefficiente de perda do orifício
K	Característica PTO
l	Comprimento do pistão líquido
L	Comprimento do tubo de borracha
m	Massa de água no tubo
p	Pressão na câmara pneumática
p_0	Pressão absoluta ambiente

p_a	Pressão atmosférica
P	Potência extraída
P_i	Potência média da onda incidente
Q	Caudal volumétrico de ar que sai da chaminé
r	Raio interno da chaminé
R	Coeficiente de reflexão
R_e	Parte real de uma amplitude complexa
s	Rigidez hidroestática do sistema
S	Área da secção transversal do cotovelo
T	Período da onda
T_0	Período natural do tubo
T_R	Coeficiente de transmissão
U	Velocidade do pulso livre no tubo
v	Velocidade média no orifício
V	Volume de ar na câmara pneumática
w	Espessura da parede do tubo
W	Comprimento da frente de captura
η	Rendimento de extracção
λ	Comprimento de onda
ρ	Massa volúmica
ω	Frequência angular das ondas
ω_0	Frequência angular natural do tubo em radianos
ζ	Factor de amplificação

Lista de figuras

Figura 1.1: Recurso energético mundial em energia das ondas, em KW/m.	15
Figura 1.2: Potencial global de energia das ondas estimado pelo EMEC (European Maritime Energy Center).	17
Figura 1.3: Valores máximo e mínimo estimados da potência das ondas ao largo da costa de alguns países.	18
Figura 1.4: Navio plataforma japonês KAIMEL.	22
Figura 1.5: Pato de Salter a ser ensaiado em canal hidráulico.	23
Figura 1.6: Dispositivo OWC da Ilha de Islay.	23
Figura 1.7: O canal em declive TAPCHAN, na Ilha de Bergen.	24
Figura 1.8: Dispositivo OWC da Kvaerner Brug's, na Ilha de Bergen.	24
Figura 1.9: Ilustração do dispositivo <i>Floating Wave Power Vessel</i> .	25
Figura 1.10: Dispositivo costeiro de Sanze.	26
Figura 1.11: Dispositivo OWC no Porto de Sakata	26
Figura 2.1: Desenho representativo do dispositivo Pendulor	30
Figura 2.2: Protótipo do dispositivo OWC instalado em Vizhinjam.	31
Figura 2.3: O dispositivo Archimedes Wave Swing.	31
Figura 2.4: Protótipo do dispositivo Osprey, antes de ser rebocado para o ensaio.	32
Figura 2.5: Dispositivo Limpet.	32
Figura 2.6: Central piloto da Ilha do Pico, em Porto Cachorro.	33
Figura 2.7: Protótipo do dispositivo Wave Dragon em Nissum Bredning.	34
Figura 2.8: Dispositivo Mighty Whale.	34
Figura 2.9: Representação do dispositivo Wavemill.	35
Figura 2.10: Protótipo do Wavebob em manutenção.	35
Figura 2.11: Dispositivo Onshore Oscillating Buoy.	36
Figura 2.12: Protótipo do dispositivo MRC 1000.	36
Figura 2.13: Protótipo do dispositivo Pelamis.	37

Figura 2.14: Protótipo do dispositivo FO3 em testes.	38
Figura 2.15: Protótipo do Port Kembla OWC.	38
Figura 2.16: Protótipo do dispositivo CETO Wave Pump.	39
Figura 2.17: Protótipo do dispositivo SPERBOY.	39
Figura 2.18: Plataforma com dois dispositivos Wave Star.	40
Figura 2.19: Protótipo do Wave Rider.	41
Figura 2.20: Protótipo do dispositivo Aquabuoy.	41
Figura 2.21: Protótipo do Waveberg.	42
Figura 2.22: Protótipo do dispositivo Wave Plane.	42
Figura 2.23: Protótipo do OnshoreWave Absorber.	43
Figura 2.24: Representação do dispositivo bioWave.	44
Figura 2.25: Protótipo Power Buoy testado ao largo de Santoño, em Espanha.	44
Figura 2.26: Protótipo do dispositivo OE Buoy.	45
Figura 2.27: Protótipo do dispositivo Burin Wave Power Pump.	45
Figura 2.28: Representação do dispositivo Searev.	46
Figura 2.29: Protótipo do dispositivo Oceanec.	46
Figura 2.30: Protótipo do dispositivo Oyster 2.	47
Figura 2.31: Turbina HydroAir em fase de desenvolvimento.	48
Figura 2.32: Vista aérea do quebra-mar de Mutriku, no País Basco.	48
Figura 2.33: Protótipo de uma Central Hyperbaric Coppe no quebra-mar de São Gonçalo de Amarante, no Ceará.	49
Figura 2.34: Protótipo do Wave Roller antes de ser submerso, ao largo de Peniche.	49
Figura 2.35: Montagem no local do Swedish Hose-pump.	50
Figura 2.36: Dispositivo Seadog Pump.	50
Figura 3.1: Zonas e plataformas instaladas, ou em fase de desenvolvimento, para testar dispositivos de energia das ondas na Europa.	57
Figura 3.2: Zona Piloto Portuguesa, ao largo de S. Pedro de Moel.	58
Figura 3.3: Centro Europeu de Energia Marítima (EMEC).	59
Figura 3.4: Configuração do Atlantic Marine Energy Test Site.	60

Figura 3.5: Zona de testes de Galway Bay.	60
Figura 3.6: Zona de Testes Wave Hub, subestação costeira e cabo submarino.	61
Figura 3.7: A Biscay Marine Energy Platform e respectiva ligação à rede.	62
Figura 3.8: Localização do MET Centre e respectivo cabo submarino.	63
Figura 3.9: Mapa e vista aérea do Nissum Bredning Wave Energy Test Site.	63
Figura 3.10: A plataforma SEMREV e respectivo cabo submarino.	64
Figura 3.11: Localização do Danish Wave Energy Center e das bóias.	65
Figura 3.12: Parque de Lysekil no Verão de 2008.	66
Figura 4.1: Modelo físico ensaiado no canal hidráulico do <i>fluidslab</i> .	69
Figura 4.2: ANACONDA no Canal Hidráulico Armefield S6, e instrumentação de medida e aquisição de dados.	71
Figura 5.1: Disco de excentricidade variável e mecanismo extensor para pequenas excentricidades.	72
Figura 5.2: Sistema de reposição do nível de água no Canal Hidráulico do Laboratório.	73
Figura 5.3: Esquema do sistema de aquisição e processamento de dados	74
Figura 6.1: Câmara pneumática do sistema PTO.	77
Figura 7.1: Factor de amplificação ζ versus frequência f , para diferentes alturas de onda H (Série 1).	86
Figura 7.2: Potência extraída P versus frequência f , para diferentes alturas de onda H (Série 1).	87
Figura 7.3: Comprimento de captura W versus frequência f , para diferentes alturas de onda H (Série 1).	88
Figura 7.4: Factor de amplificação ζ versus frequência f , para diferentes alturas de onda H (Série 2).	89
Figura 7.5: Potência extraída P versus frequência f , para diferentes alturas de onda H (Série 2).	90
Figura 7.6: Rendimento de captura η versus frequência f , para diferentes alturas de onda H (Série 2).	91
Figura A.1: Ensaio do modelo do dispositivo McCabe Wave Pump	100

Figura A.2: Esquema do dispositivo Wave Master	101
Figura A.3: Foto do Dispositivo Danish Wave Power Float-Pump (DWFPF)	102
Figura A.4: Desenho do sistema Tunneled Wave Power Plant	102
Figura A.5: Ilustração do dispositivo ANACONDA	103
Figura A.6: Ensaio do modelo da Pneumatically Stabilized Platform	104
Figura A.7: Representação do dispositivo Seabased Linear Generator	104
Figura A.8: Desenho de um parque de dispositivos Aegir Dynamo	105
Figura A.9: Representação do dispositivo OMI Wavepump	105
Figura A.10: Ilustração de um parque de dispositivos Wave Rotor	106
Figura A.11: Modelo do Manchester Bobber em canal hidráulico	107
Figura A.12: Representação do dispositivo PS Frog	107
Figura A.13: Desenho do sistema Seawave Slot-Cone Generator	108
Figura A.14: Representação do sistema C-Wave	108
Figura A.15: Ensaio do modelo do dispositivo Trident Energy Converter	109
Figura A.16: Modelo do dispositivo FWEPS em fase de montagem	110
Figura A.17: Ensaio do dispositivo Sloped IPS Buoy em tanque de ondas	110
Figura A.18: Representação do sistema Triton	111
Figura A.19: Protótipo do MHC Generator testado em laboratório	111
Figura A.20: Esquema de funcionamento do dispositivo WET EnGen	112
Figura A.21: Ensaio do modelo do dispositivo OWEL Grampus	113
Figura A.22: Fotografia do dispositivo Ocean Wave Energy Converter	113
Figura A.23: Modelo reduzido do dispositivo Tetron	114
Figura A.24: Esquema do dispositivo Wave Blanket	114
Figura A.25: Desenho do dispositivo Wave Energy Conversion Actuator	115

Lista de tabelas

Tabela 1.1: Lista de sistemas ensaiados ou planeados.	27
Tabela 2.1: Distribuição por países dos dispositivos ensaiados ou construídos.	51
Tabela 2.2: Dispositivos que se encontram em funcionamento.	52
Tabela 2.3: Dispositivos descomissionados (1978 - 2001).	54
Tabela 2.4: Outros dispositivos desactivados ou destruídos (1981 - 2008).	54
Tabela 4.1: Dimensões do modelo do tubo (em mm).	70

1. Introdução à recuperação de energia das ondas

O desenvolvimento dos países industrializados depende actualmente de um abastecimento energético que ainda é, em grande medida, assegurado a partir da queima de combustíveis fósseis tais como o petróleo, o carvão e o gás natural, e também a partir da energia nuclear. Os combustíveis fósseis representavam, no início do Séc. XX, cerca de 88% do consumo mundial de energia primária, a par de 7% da nuclear [1.1]. Ora, o recurso sistemático a estas fontes de abastecimento primárias, agravado pelo desenvolvimento das economias emergentes, comprometem significativamente a continuidade e o equilíbrio dos abastecimentos de energia, uma vez que as reservas destas matérias-primas são por natureza limitadas.

Por outro lado, os malefícios causados pela queima destes combustíveis no meio ambiente limitam, em definitivo, a sua utilização como única fonte de energia. O panorama energético mundial tem com efeito exigido que se definam e apliquem estratégias complementares de produção e conservação de energia, que passam em parte pela utilização de recursos energéticos renováveis. De entre estes, a energia solar, a eólica e a biomassa são as energias que têm maior penetração no mercado mundial de energias alternativas. A energia das ondas, mercê do seu potencial e densidade em termos globais, será possivelmente uma fonte de abastecimento importante num futuro não muito distante.

1.1 Energia das ondas: panorama global

O recurso mundial de energia das ondas em águas oceânicas é considerável. O valor estimado da potência total disponível situa-se entre 2000 a 4000 GW, sendo contudo necessário saber quanto deste potencial pode ser efectivamente recuperado a custos competitivos. Sabe-se que, no contexto dos sistemas de aproveitamento de energia das ondas, a sazonalidade do potencial energético disponível, bem como a frequência da ocorrência de condições extremas e da sua intensidade, são factores de extrema importância que se prendem com a eficácia e sobrevivência dos dispositivos concebidos para o efeito.

O potencial energético das ondas do mar é mais intenso nos pólos, diminuindo com a proximidade ao equador. No entanto, os pontos mais favoráveis para a extracção de energia das ondas não se situam nos pólos, mas sim na proximidade dos países industrializados. Tal como mostra a Fig. 1.1 o potencial nas zonas temperadas é considerável, nomeadamente junto à costa ocidental da Europa, onde a potência disponível ronda os 40 e por vezes 60 KW/m. Nesta circunstância, os países europeus com costa atlântica são locais de excelência para apostar na energia das ondas e têm vindo a desenvolver tecnologia para este efeito.



Figura 1.1: Recurso energético mundial em energia das ondas, em KW/m.¹

As metodologias desenvolvidas e validadas para a avaliação do potencial energético utilizando dados medidos remotamente são descritas em diversas publicações, sendo que cada metodologia apresenta um conjunto de vantagens e desvantagens relativas entre si. Não há claramente um método melhor do que o outro. Em 2008 foi publicado um estudo, por Andrew Cornett [1.2], onde são analisadas previsões do clima de ondas global geradas pelo modelo WAVEWATCH-III ao longo de um período de 10 anos (1997-2006). Neste estudo, o modelo acima referido foi bem validado e calibrado através de métodos de comparação com dados empíricos, excepto para mares insulares semi-fechados, e fornece uma cobertura global

¹ Fonte: http://thefraserdomain.typepad.com/energy/2005/10/about_wave_power_1.html

desde os 77°S a 77°N. Os resultados deste estudo são de grande relevância, pois foram dos primeiros a serem validados com base em medições, contabilizando os modelos a variabilidade temporal de um recurso sazonal como é o da energia das ondas. Neste âmbito são propostos parâmetros para a sua análise, como sejam o índice SV (Seasonal Variability) e MV (Monthly Variability). Estes índices permitem inferir um coeficiente de variação de potência das ondas, coeficiente esse que é utilizado para determinar a variabilidade da energia disponível em escalas de curto, médio ou longo prazo.

Posteriormente, em 2009, foram publicados resultados de um estudo no qual a energia das ondas é avaliada utilizando dados provenientes do Radar Altimeter Jason operado pela Nasa/CNES e do satélite ambiental ENVISAT SAR operado pela ESA [1.3]. Estes dados foram comparados com outros dados, sendo estes provenientes de bóias NDBC. Apesar do que já foi referido esta avaliação têm algumas limitações, que são impostas pela frequência com que os satélites repetem medições (10 dias para a NASA e 35 dias para a ESA). Este facto obriga a que sejam feitas apenas avaliações de longo prazo. O lançamento do satélite TerraSar-X poderá solucionar esta limitação, dado que irá obter dados de alta resolução espacial para zonas perto da costa, a intervalos de 2 a 3 dias.

Tem sido até há pouco tempo atrás admitido que o potencial energético bruto em zonas junto à costa é significativamente mais baixo do que em zonas offshore, sendo portanto inviável instalar sistemas de aproveitamento de energia das ondas nestas zonas. No entanto convém não perder de vista que uma parte substancial da redução de energia bruta omnidireccional, entre profundidades de 50 m e 10 m, ocorre devido à refacção e não devido ao atrito no fundo do mar ou à rebentação das ondas. Mais recentemente, passou a admitir-se que o potencial energético bruto não fornece verdadeiramente uma medida ajustada da produtividade de um parque de ondas. Foi então adoptada uma medida alternativa, denominada “potencial energético utilizável”. Deste ponto de vista, a avaliação do potencial de uma região é mais fiável se for feita com base neste conceito da potência utilizável das ondas no local, em particular em condições de estados de mar altamente energéticos, uma vez que são tomados em consideração a distribuição direccional das ondas incidentes e o tecto de captura de energia dos dispositivos de extracção.

Os diferentes modelos utilizados mais recentemente demonstram que apesar do potencial energético bruto diminuir significativamente entre águas profundas e águas intermédias, mais concretamente em profundidades inferiores a 10 m, o potencial utilizável decresce consideravelmente menos: entre 7% e 22% [1.4]. Esta descoberta revela que existem zonas costeiras cujo potencial utilizável pode ser da mesma ordem de grandeza que o das zonas oceânicas correspondentes, tornando assim a implementação de sistemas de aproveitamento de energia das ondas não só possível, como também mais viável do ponto de vista económico, mais fáceis de instalar e de mais fácil manutenção.

Mais tarde, em 2010, foi publicado outro estudo por Gunnar Mørk [1.5] que também avalia o potencial energético a nível mundial. Deste estudo resulta, como podemos observar na Fig. 1.2, que a potência bruta da energia das ondas está avaliada em cerca de 3,7 TW. Contudo, é importante referir que não é possível aproveitar 20% deste recurso com as tecnologias existentes; isto deve-se ao facto de haver regiões onde a densidade de energia é muito baixa ($P \leq 5 \text{KW/m}$), bem como á possibilidade de existência de placas de gelo. Consta-se, por outro lado, que a refração não tem grande influência na potência média que é transmitida, salvo em zonas de focagem das ondas. Assim sendo, a redução da energia utilizável entre as profundidades de 50 m e 10 m deve-se apenas à fricção no fundo e rebentação das ondas, que se estima ser aproximadamente 10%. Assim sendo, a potência média disponível para aproveitamento pode em definitivo ser estimada em cerca de 2,96 TW. Este estudo vem ainda confirmar que a variabilidade sazonal das ondas é consideravelmente maior no hemisfério Norte do que no hemisfério Sul, criando assim uma dificuldade acrescida na avaliação da viabilidade dos sistemas de aproveitamento de energia das ondas no hemisfério Norte.

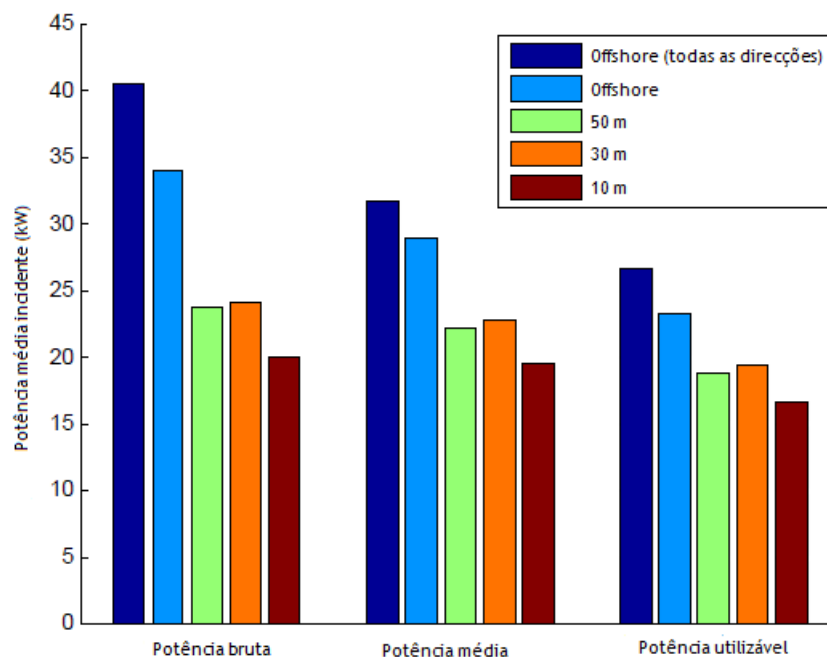


Figura 1.2: Potencial global de energia das ondas estimado pelo EMEC (European Maritime Energy Center) [1.3].

Mais concretamente na costa Oeste de Portugal Continental e de Espanha, existe um decréscimo da potência disponível desde o Norte até ao Sul, de cerca de 30% ao longo de 500 Km de costa. Este facto traduz-se no correspondente decréscimo da potência que pode ser extraída a partir de sistemas instalados ao largo deste litoral europeu pelos dois Países.

Olhando em seguida para a Fig. 1.3 é possível observar os valores máximo e mínimo estimados da potência disponível, nalguns países com potencial para aproveitamento da energia das ondas.

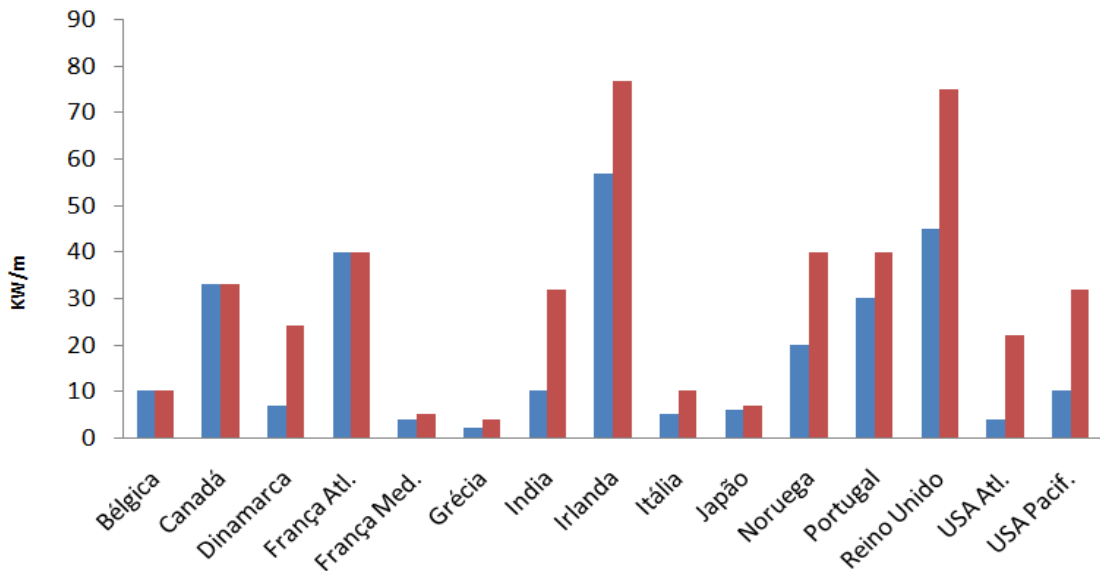


Figura 1.3: Valores máximo e mínimo estimados da potência das ondas ao largo da costa de alguns países.

(estimativa do projecto COMPETE PTDC/EME-MFE/111763/2011-16).

Tomando como referencia valores médios dos potenciais representados nesta figura, podemos observar que os países com melhores perspectivas para o aproveitamento da energia das ondas são a Irlanda e o Reino Unido, seguidos de Portugal, Noruega, França (costa Atlântica) e o Canadá.

1.2 Histórico dos dispositivos de recuperação a nível mundial

Hoje em dia, mais de 20% do consumo de energia final global provém de fontes de energia renováveis. Para a geração de energia eléctrica, em concreto, as renováveis contribuem com uma fatia de aproximadamente 18%, sendo 3% com origem em novas energias, incluindo a das ondas. Em 2009, a potência instalada a nível mundial com origem nas energias renováveis já atingia os 1230 GW. Esta potência corresponde a ¼ da capacidade total de geração de potência, satisfazendo 18% da produção eléctrica global.

As directivas da União Europeia fixam igualmente a meta de 20% do consumo final de energia a partir de fontes renováveis até 2020. A MSF (Marine Science Foundation) antevê que, até 2050, a Europa possa extrair cerca de 50% das suas necessidades de energia eléctrica a partir de fontes de energia renováveis do mar [1.6]. As estimativas do Conselho Mundial de Energia (World Energy Council) apontam nomeadamente para que a potência total disponível proveniente da energia dos oceanos deve rondar os 2 TW, constituindo a energia das ondas a maior parte do recurso disponível: entre 8000 e 80 000 TW-h/ano. Pensa-se que a potência disponível nas ondas do mar, à escala planetária, ronde os 10 a 100 TW ao largo, em águas de profundidade superior aos 100 metros.

A primeira patente de um sistema de aproveitamento de energia das ondas foi registada em França por Girard, em 1799. Mais tarde, em 1910, foi desenvolvido por Praceique-Bochauxum um dispositivo para produzir electricidade baseado no princípio da coluna-de-água oscilante (OWC). Em 1940 Y. Masuda [Ref. 1940] desenvolveu uma bóia de sinalização para a navegação costeira, no Japão, alimentada pela energia das ondas. O sistema funcionava com uma turbina de ar acoplada à câmara pneumática do sistema OWC. Em 1976 o navio KAIMEI nasce desta ideia, sendo a primeira plataforma flutuante para testar este conceito à escala industrial (ver o desenvolvimento mais adiante).

No decurso dos anos 70 M. McCormick, da US Navel Academy, também deu um importante contributo para o avanço do sistema de coluna-de-água oscilante, com vários estudos e patentes de turbinas registadas em 1976. Estes e outros sistemas são revistos em [1.7].

Na Europa a atenção virou-se para a energia das ondas por volta de 1974, data em que S. Salter [1.8] publicou o seu famoso artigo na revista Nature, chamando a atenção para o assunto. Neste artigo, Salter põe em evidência o enorme potencial energético das ondas do mar. Na esteira da crise petrolífera de 1973, o assunto despertou naturalmente um grande interesse, dada a necessidade de encontrar fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis.

Em 1975 o governo britânico lança um ambicioso programa de I&D para aproveitamento da energia das ondas, com a finalidade de produzir energia eléctrica à escala industrial. Entre os dispositivos cujo desenvolvimento foi financiado por este programa, entre 1975 e 1982, contam-se por exemplo a Jangada de Cockerell, o Pato de Salter, o Cilindro de Bristol e o Sistema OWC do NEL (National Engineering Laboratory). Esta iniciativa foi acompanhada de perto pelos noruegueses, nomeadamente por J. Falnes e K. Budal [1.9]. Os Absorvedores Pontuais desenvolvidos consistem basicamente num flutuador de pequena dimensão cujo movimento acciona um sistema PTO. Embora de pequena dimensão relativamente à das ondas incidentes, estes sistemas demonstraram conseguir captar a energia de uma frente de onda muito superior à dimensão característica do dispositivo. O programa inglês viria a ser abandonado logo que os preços do petróleo bruto baixaram.

Em França a actividade nesta área teve início em 1980, no Laboratório de Hidrodinâmica Naval da Escola Nacional Superior de Mecânica de Nantes. São de referir os ensaios realizados em canal de ondas de um modelo do Pato de Salter e de um sistema de focagem das ondas.

Com a nova subida dos preços do petróleo, nos anos 80, o interesse pela energia das ondas volta a estar na ordem do dia, tendo surgido uma segunda geração de dispositivos para o seu aproveitamento [1.10, IUTAM 1985]. Concretamente nos três países nórdicos (Dinamarca, Suécia e Noruega) foram implementados diversos dispositivos que vale a pena referir. Na Ilha de Bergen foram instalados, por volta de 1985, dois dispositivos: um na linha de costa, do tipo OWC com turbina de ar, pertencente à firma KWaernerBrug's, e um segundo dispositivo com canal de focagem e reservatório elevado, funcionando com uma turbina hidráulica, o TAPCHAN. O primeiro destes dispositivos foi destruído pouco tempo depois de ter sido instalado e o segundo, com 350 KW, funcionou durante vários anos ligado à rede eléctrica local.

A década de 90 marca o surgimento de novos protótipos de demonstração, apoiados sobretudo por programas de *I&D* europeus e outros, de carácter internacional. No Mar do Japão, por exemplo, ao largo do Porto de Sakata, foi instalado em 1990 um dispositivo OWC equipado com uma turbina de 60 KW. Este sistema foi desenvolvido pelo *Port Construction Bureau* e pelo *Coastal Development Institute of Technology* do Japão. No mesmo ano, na Índia, foi instalado em Vizhinjam um sistema OWC de 110 KW, também ligado à rede eléctrica. Já no final da década, em 1999, foi instalado na Ilha do Pico (Açores), mais concretamente em Porto Cachorro, um sistema OWC com uma turbina de 400 KW.

Posteriormente, em 2001, a *Agência Internacional da Energia* (IEA) lança o *International Implementing Agreement* na vertente Ocean Energy Systems (OES), com o objectivo de coordenar as acções de investigação, desenvolvimento e demonstração no âmbito da Energia das Ondas a nível mundial. Nesta sequência o sistema Wave Dragon, por exemplo, é um protótipo que vem sendo testado no mar desde 2003, na plataforma de testes dinamarquesa de Nissum Bredning Wave Energy Test Site. O dispositivo, que foi construído à escala de 1:4,5, é um sistema flutuante de focagem das ondas que comporta um conjunto de turbinas hidráulicas convencionais. Já em 2004, foi testado na Zona Piloto Portuguesa da Aguçadoura um protótipo de demonstração do dispositivo AWS (Archimed Wave Swing), um dispositivo de corpo flutuante com 2 MW, não havendo no entanto registo conhecido dos resultados desta experiência.

Na Noruega, no início de 2005, foi também testado um protótipo à escala 1:3 do dispositivo FO3. Este dispositivo baseia-se no conceito de absorvedor pontual e aproveita conhecimentos relativos às plataformas petrolíferas offshore. Um outro sistema, planeado para ser testado em Portugal, o Wavebob, com 1 MW de potência instalada, é igualmente um dispositivo do tipo absorvedor pontual. Em 2007 foi construído e testado na Austrália um protótipo do sistema OceanLinx, do tipo OWC com 500 KW, cuja turbina era do tipo Deniss-Auld, de fluxo

reversível. O sistema funcionava montado numa plataforma flutuante. Em 2010 este dispositivo foi destruído, já numa fase ulterior de desenvolvimento, ao largo de Port Kembla. Ainda em 2009, em Portugal, foi testada a primeira central de três dispositivos Pelamis, cada um com 750 KW. Após uma avaria num dos sistemas hidráulicos, estes dispositivos recolheram ao estaleiro para reparações. Os ensaios deste sistema foram transferidos entretanto para o Mar da Escócia. Também nesse ano a empresa Aquamarine Power instalou na Escócia, perto da costa, um protótipo do dispositivo Oyster com 350 KW. Este interessante sistema utiliza uma asa submersa que é movida pela força das ondas para accionar o sistema de geradores hidráulicos. Mais tarde, em 2012, foi testado em Peniche um novo protótipo chamado WaveRoller, construído pela firma AW-Energy. Cada unidade deste dispositivo incorpora três placas verticais articuladas no fundo do mar, que se movimentam à semelhança de um gerador de ondas funcionando ao contrário. Cada uma destas placas debita 100 KW.

Existem actualmente inúmeras patentes registadas de dispositivos para recuperação e aproveitamento de energia das ondas. Contudo, até ao momento, apesar dos importantes programas de investigação e desenvolvimento tecnológico que têm sido conduzidos, nenhuma das tecnologias desenvolvidas atingiu a fase de exploração comercial.

1.2.1 Sistemas pioneiros implementados

Para dar uma visão realista da temática da recuperação da energia das ondas, vamos em seguida fazer uma descrição sucinta de alguns dos dispositivos recuperadores mais importantes, de entre aqueles que foram realmente implementados.

Navio KAIMEI, Japão (1979)

O Navio KAIMEI era uma central flutuante equipada com dispositivos do tipo OWC, que foi desenvolvida pelo Centro de Ciência e Tecnologias Marítimas do Japão (JAMSTEC). O projecto foi coordenado pelo Prof. Y. Masuda, pioneiro na utilização deste sistema. O protótipo é basicamente um batelão com cerca de 80 m de comprimento (Fig. 1.4), cujo casco havia sido perfurado de modo a alimentar uma série de câmaras onde funcionavam sistemas OWC, parte deles equipados com turbinas de ar. O protótipo teve duas fases de teste em mar: a primeira entre Julho de 1978 e Abril de 1979, e a segunda entre Setembro de 1985 e Março de 1986. Durante os ensaios o Kaimei foi ancorado a noroeste da Cidade de Yura, de frente para o Mar do Japão, onde a profundidade era de 40 m. Durante o primeiro teste o Kaimei foi equipado com vinte e dois sistemas OWC a funcionar, conectados aos pares, dos quais três foram equipadas com turbinas de impulso e respectivos geradores. Durante o segundo teste, o Kaimei teve apenas treze câmaras a funcionar, cinco das quais haviam sido equipadas com turbo-geradores. Três das turbinas eram de impulso, uma era uma turbina Wells e uma era

uma turbina de McCormick. A turbina Wells foi ligada a um gerador síncrono de 60 KW. As turbinas de impulso foram conectadas a geradores de indução de 125 KW. As oito câmaras que não possuíam turbinas foram equipadas com orifícios calibrados no topo, para dissipação de energia.



Figura 1.4: Navio plataforma japonês KAIMEI [1.11].

Pato de Salter, Reino Unido (1980)

O Pato de Salter (Salter Duck) é um dispositivo que foi inicialmente projectado na Universidade de Edinburgh, por Steven Salter, por volta de 1980. O dispositivo é de corpo oscilante, possuindo o flutuador uma secção de geometria assimétrica. As ondas incidentes fazem com que o flutuador balance, sendo este movimento utilizado para bombear fluido hidráulico ou para comprimir ar. No primeiro caso o dispositivo operará com um motor hidráulico, o qual por sua vez acciona um gerador eléctrico. No segundo caso o ar comprimido faz girar uma turbina e gerador acoplado. O projecto foi prematuramente cancelado após a análise de viabilidade ter demonstrado que os custos de operação eram demasiado elevados. No entanto, uma segunda avaliação mostrou que estes eram substancialmente inferiores ao inicialmente estimado, tendo o projecto sido retomado. Este sistema é dos mais inovadores e apresenta elevado rendimento hidrodinâmico em condições de funcionamento ideais, como demonstraram os extensos ensaios laboratoriais realizados (Fig. 1.5). Os ensaios de campo decorreram no Lago Ness, perto da Aldeia de Dores, com um protótipo à escala de 1:10.

Dispositivo da Ilha de Islay, Reino Unido (1985)

Em 1985 foi projectado um dos primeiros dispositivos OWC costeiros, desenvolvido pela Queen's University de Belfast para funcionar na escarpa da Isle of Islay, perto da Aldeia de Portnahaven, na Escócia. A empresa promotora era a *Isle of Islay Shoreline OWC*, que deu início à construção do protótipo no Verão de 1987 (Fig. 1.6).

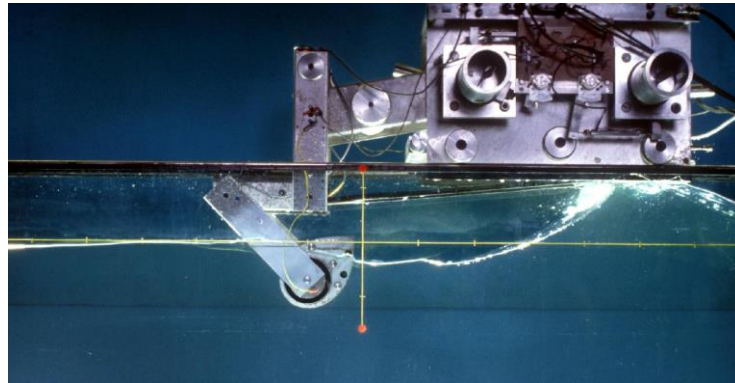


Figura 1.5: Pato de Salter a ser ensaiado em canal hidráulico [1-A].

O dispositivo foi posteriormente conectado à rede eléctrica em 1991. O protótipo, com uma turbina de 75 KW, funcionou durante anos até ser descomissionado, a fim de instalar um dispositivo de maior dimensão.



Figura 1.6: Dispositivo OWC da Ilha de Islay [1.11].

Sistema TAPCHAN, Noruega (1982)

O TAPCHAN é um projecto da Norwave A.S., que consiste num canal afunilado em declive, cuja missão é fazer a focagem das ondas incidentes na costa, conduzindo-as até um reservatório elevado. A energia potencial da água armazenada é depois utilizada para produzir energia eléctrica através de uma turbina hidráulica convencional. O sistema pode fornecer energia eléctrica durante todo o ano, mas a sua utilização está limitada a zonas costeiras com águas profundas e correntes fracas. Um protótipo deste dispositivo com 350 KW

foi instalado na Ilha de Bergen, na Noruega, e funcionou ligado à rede eléctrica local durante largos anos (Fig. 1.7).



Figura 1.7: O canal em declive TAPCHAN, na Ilha de Bergen [2-A].

Dispositivo da Kvaerner Brug's, Noruega, (1985)

A Kvaerner Brug's desenvolveu um dispositivo do tipo OWC multi-resonante com turbina axial, cujo protótipo foi instalado na localidade de Toftestallen, na Noruega, em 1985 (Fig. 1.8). Com uma capacidade instalada de 500 KW, o dispositivo consistia numa torre em aço com cerca de 19,6 m de altura, assente no fundo do mar, junto à costa, através de uma estrutura de betão imersa a 7 m de profundidade.



Figura 1.8: Dispositivo OWC da Kvaerner Brug's, na Ilha de Bergen [3-A].

A comunicação entre a câmara-de-ar do dispositivo e o mar era estabelecida por uma abertura lateral, localizada 1 m abaixo do nível do mar. No topo da torre funcionava uma turbina Wells auto-rectificadora. Quatro anos após ter sido construído, o sistema foi parcialmente destruído por uma tempestade. O colapso da estrutura levou ao abandono do projecto.

Dispositivo FWPV, Suécia (1986)

O dispositivo sueco FWPV (Floating Wave Power Vessel) é um sistema de galgamento para funcionar em alto mar, que foi desenvolvido pela *Sea Power International*. O dispositivo consiste numa bacia com quatro tanques de lastro que lhe conferem mais estabilidade (Fig. 1.9). A embarcação tem um sistema de ancoragem, patenteado, que lhe permite orientar o recuperador para a direcção das ondas mais energéticas. A central piloto foi desenvolvida e implantada nos anos 80, perto de Estocolmo. Está previsto instalar um sistema de 1,5 MW no mar, 500 m ao largo de Shetland, com fundos de 50 a 80 metros.

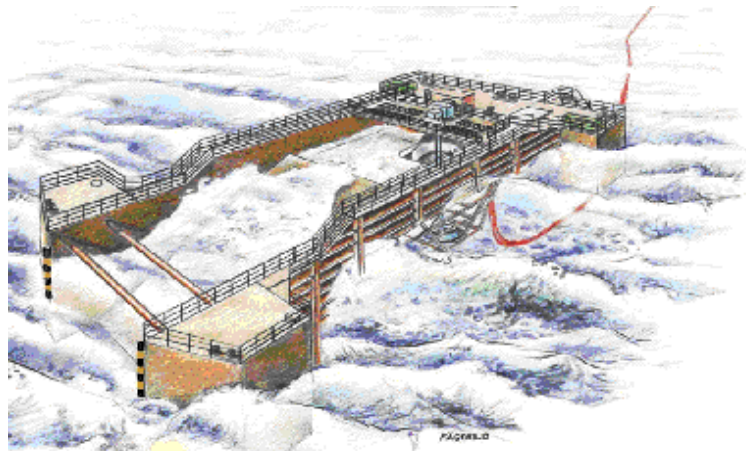


Figura 1.9: Ilustração do dispositivo *Floating Wave Power Vessel* [4-A].

Dispositivo costeiro de Sanze, Japão (1983)

O dispositivo costeiro inserido numa garganta em Sanze (Fig. 1.10), foi projectado e instalado pela *Sanze Shoreline Gully*. Construído em 1983, funcionou durante vários anos até ser desmantelado devido a problemas resultantes de fadiga e corrosão. O dispositivo, do tipo OWC, possuía uma turbina de ar com 40 KW de potência.



Figura 1.10: Dispositivo costeiro de Sanze [1.12].

Dispositivo OWC de Sakata, Japão (1988)

O dispositivo instalado em 1988 ao largo do Porto de Sakata foi desenvolvido sob os auspícios do Ministério dos Transportes do Japão, tendo funcionado num pontão quebra-mar construído para o efeito (Fig. 1.11). O corpo do protótipo, do tipo OWC, tinha 20 m de largura. O dispositivo funcionou até ao ano de 1991. A capacidade instalada era de 60 KW.



Figura 1.11: Dispositivo OWC no Porto de Sakata [1.11].

Todos estes dispositivos fazem parte de uma primeira geração de recuperadores de energia das ondas, sendo todos eles anteriores a 1990. A maior parte dos sistemas, senão a totalidade deles, já foram desmantelados, em parte devido ao facto de não apresentarem a produtividade que era esperada, mas sobretudo por já não estarem em boas condições de funcionamento. Note-se que eram sobretudo protótipos de demonstração experimental.

1.2.2 Outros sistemas ensaiados ou planeados

Os dispositivos de extracção de energia das ondas baseiam-se, muitas vezes, em conceitos que são estudados e desenvolvidos por investigadores de Universidades ou de Institutos de investigação. Após uma fase preliminar de estudo a ideia passa normalmente para as mãos de entidades privadas, através da venda de patentes, por exemplo, o que faz com que os impulsionadores do invento percam o contacto com o desenvolvimento da tecnologia. Muitos destes dispositivos ficam-se apenas pela fase dos ensaios preliminares realizados. Passemos em revista alguns deles.

A Tab. 1.1 reúne alguns destes dispositivos, cuja descrição é feita no Anexo A.

Tabela 1.1: Lista de sistemas ensaiados ou planeados.

Ano	Dispositivo	Empresa promotora
1996	McCabe wave Pump	Hydam Technology Ltd, Irlanda
2002	Wave Master	Ocean WaveMaster Ltd, UK
2002	DWPFP	Danish Wave Power, Dinamarca
2003	Tunneled Wave Power Plant	SeaWave, Dinamarca e Wavegen, Escócia
2006	ANACONDA	WS Atkins Oil and gas & Maritime Energy Development Ltd, UK
2007	PSP	Float Inc, EUA
2007	SLG	Seabased AB e Universidade de Upsala, Suécia
2007	Aegir Dynamo	Ocean Navitas Ltd, UK
2007	OMIWave Pump	Ocean Motion International, EUA
2007	Wave Rotor	Ecofis, Holanda
2007	Manchester Bobber	Universidade de Manchester, UK
2007	PS Frog	Universidade de Lancaster, UK
2007	SSG	WAVEnergy AS, Noruega
2007	C-Wave	C-Wave Ltd, UK
2007	Trident Energy Converter	Trident Energy Ltd, UK
2008	FWEPS	Applied Technologies Company Ltd, Russia
2008	Sloped IPS Buoy	Universidade de Edinburgh, UK
2008	Triton	Neptune Renewable Energy, UK

Ano	Dispositivo	Empresa promotora
2008	MHD Generator	SARA, UK
2009	WET EnGen	Wave Energy Technologies, Canadá
2009	OWEL Grampus	Offshore Wave Energy Ltd, UK
2010	OWEC	Ocean Wave Energy Company, EUA
2010	Tetron	Joules Energy Efficiency Services Ltd, Irlanda
2012	Wave Blanket	Wind Waves and Sun, USA
2010	WECA	Daedalus Informatics Ltd, Grécia

2. Estado actual das tecnologias de conversão

A busca de novas ideias para explorar a energia das ondas é um desafio que tem atraído um número crescente de inventores, investigadores e estudantes, todos eles ligados a diferentes áreas do conhecimento. Contudo, algumas das ideias avançadas nunca saíram do papel. O desenvolvimento de tecnologias para aproveitar a energia das ondas tem atravessado diferentes etapas, ao longo destes últimos quarenta anos, cujo dinamismo parece estar relacionado, como tudo ou quase tudo na vida, com as oscilações do preço do petróleo bruto. Nesta corrida para as energias alternativas muitos dispositivos foram estudados e ensaiados em modelo físico à escala, muitos conceitos foram inclusive abandonados, um certo número de protótipos foram construídos e testados e, destes, alguns estão ainda em funcionamento e outros já foram descomissionados ou foram destruídos pelo mau tempo.

Em Falcão [2.1] é apresentada uma revisão mais ou menos actual das principais tecnologias desenvolvidas neste contexto. Embora alguns dispositivos já tenham alcançado um grau de aperfeiçoamento considerável, ainda não se atingiu a fase de exploração comercial. O aproveitamento da energia das ondas encontra-se actualmente numa fase de demonstração de conceitos para exploração industrial. Alguns dos dispositivos ligados à rede eléctrica, porém, já estão numa fase que se pode considerar pré-comercial. Façamos em seguida a revisão de todos estes tópicos.

2.1 Protótipos de demonstração mais recentes

Nos últimos quinze anos, o maior esforço de investigação e desenvolvimento tecnológico em Energia das Ondas tem sido conduzido na Europa, em grande medida devido ao apoio financeiro dado pela Comissão Europeia aos diferentes projectos, a par das verbas que alguns Governos dos Estados membros disponibilizam para este efeito.

Em geral o desenvolvimento de um dispositivo é um processo lento e dispendioso, desde o conceito até à prototipagem, e finalmente à fase comercial. Neste momento pode dizer-se que já se fizeram progressos consideráveis neste campo, graças a ferramentas avançadas nos domínios da modelação teórica e simulação computacional de dispositivos de extracção e dos sistemas de conversão de energia, apoiadas por ensaios sistemáticos em modelo reduzido,

bem como em testes em condições próximas das reais. Passemos em revista alguns dos dispositivos de última geração.

Pendulor, Japão

O Pendulor é um dispositivo desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia de Muroran, cujo primeiro protótipo foi instalado num quebra-mar da Ilha de Hokkaido. Este dispositivo consiste numa placa articulada no topo, que oscila com um movimento pendular por acção das ondas. A placa acciona por seu lado um sistema hidráulico. As ondas incidentes, por reflexão no paredão do quebra-mar, dão origem a uma onda estacionária que interage com a placa vertical do dispositivo. Este dispositivo apresenta um rendimento de 40-60%. Desde que foi projectado, já foram construídos três protótipos. O primeiro em 1981, com 20 KW, instalado em Mashike, um porto da costa Oeste de Hokkaido. Este foi destruído por uma tempestade pouco tempo depois. O segundo, com 5 KW, foi instalado em Abril de 1983 no Porto de Muroran, na costa Sul de Hokkaido. Este também foi destruído por uma tempestade, ao fim de quase dois anos. O terceiro protótipo (Fig. 2.1), instalado em Novembro de 1985 no mesmo local, sobreviveu a várias tempestades severas e foi desmantelado anos mais tarde. No entanto, existem planos para fazer um novo protótipo deste dispositivo com 300 KW.

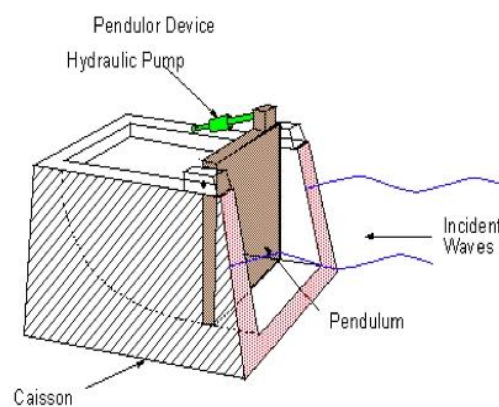


Figura 2.1: Desenho representativo do dispositivo Pendulor [29-A].

Vizhinjam OWC, Índia

O dispositivo OWC de Vizhinjam foi construído pelo Instituto Nacional de Tecnologia Oceânica (NIOT) em 1990, junto de um quebra-mar já existente. O protótipo utiliza uma turbina Wells de eixo vertical, que se encontra acoplada a um gerador de indução de 110 KW. O sistema está ligado à rede eléctrica. A Fig. 2.2 é uma fotografia da instalação. Este é um dos sistemas OWC pioneiros de maior sucesso.



Figura 2.2: Protótipo do dispositivo OWC instalado em Vizhinjam [30-A].

Archimedes Wave Swing, Reino Unido

O dispositivo Archimedes Wave Swing (AWS) é um dispositivo de corpo flutuante submerso que é desenvolvido pela Empresa Teamwork Technology, dos Países Baixos, desde 1994. Actualmente esta tecnologia está a ser aperfeiçoada pela firma AWS Ocean Energy, criada na Escócia. A potência instalada é de 2 MW, sendo o gerador eléctrico linear (Fig. 2.3). Em 2004 foi submersa, ao largo da Povia de Varzim, a primeira central piloto deste sistema à escala de 1:2. Não há dados concretos sobre este ensaio, Aparentemente o protótipo foi danificado logo na fase inicial de assentamento no fundo do mar.



Figura 2.3: O dispositivo Archimedes Wave Swing [2.1].

Osprey, Reino Unido

O Osprey é um dispositivo OWC que foi desenvolvido pela Wavegen para funcionar perto da costa (Fig. 2.4). O protótipo, construído em 1995, utilizava uma turbina de ar com 2 MW de potência instalada. Contudo, o dispositivo foi destruído na fase preliminar do ensaio, antes de ser ancorado ao fundo do mar.



Figura 2.4: Protótipo do dispositivo Osprey, antes de ser rebocado para o ensaio [31-A].

Limpet OWC, Reino Unido

O Limpet é um dispositivo do tipo OWC, que foi desenvolvido no quadro do Programa Europeu Joule para funcionar na linha de costa. A empresa promotora deste projecto foi a Wavegen, com a colaboração da Queen's University de Belfast. A construção e instalação do Limpet foi feita entre 1998 e 2000 na ilha de Islay (Fig. 2.5), na costa Oeste da Escócia. A potência instalada do Limpet é de 0,5 MW, com dois grupos geradores de 250 KW cada. Após ter sido concessionado em 2000, o Limpet passou a ter como principal objectivo o estudo e teste de pequenas turbinas de ar, desenvolvidas para sistemas OWC.



Figura 2.5: Dispositivo Limpet [32-A].

Central do Pico, Portugal

O dispositivo OWC da Ilha do Pico está instalado na linha de costa, em Porto Cachorro, nos Açores. O dispositivo equipa uma central piloto europeia cuja instalação foi cofinanciada pela CE, em 1992. A construção da Central foi concluída no ano de 1999 (Fig. 2.6). O principal objectivo do projecto era demonstrar a viabilidade técnica da energia das ondas para abastecer a rede eléctrica local da pequena comunidade da ilha. A central tem uma potência instalada de 400 KW, sendo o gerador eléctrico accionado por uma turbina de ar Wells. As entidades responsáveis pela exploração da central são a EDP e a EDA. Devido ao seu avançado estado de degradação, esta instalação já deveria ter sido desmantelada.



Figura 2.6: Central piloto da Ilha do Pico, em Porto Cachorro [33-A].

Wave Dragon, Dinamarca

O Wave Dragon é um dispositivo de galgamento que opera em alto mar, desenvolvido pela Wave Dragon Ltd um consórcio internacional que engloba empresas e instituições da Dinamarca, Reino Unido, Republica da Irlanda, Suécia, Áustria e Alemanha. Os testes laboratoriais do sistema tiveram início em 1998, na Universidade de Alboarg. Um protótipo do dispositivo à escala de 1:4,5, com uma potência entre 4 e 11 MW, foi ligado à rede eléctrica na Dinamarca em meados de 2003, em Nissum Bredning (Fig. 2.7).

Mighty Whale, Japão

O Mighty Whale é um dispositivo do tipo OWC flutuante, que pode ser ancorado a diferentes profundidades, tirando partido das condições existentes nos vários locais. Este dispositivo foi desenvolvido pela JAMSTEC para operar perto da costa.



Figura 2.7: Protótipo do dispositivo Wave Dragon em Nissum Bredning [34-A].

O protótipo (Fig. 2.8) foi ancorado a uma profundidade de 40 m, perto da Baía de Gokasho, tendo funcionado entre 1998 e 2002. Tinha uma potência de 110 KW, mas demonstrou possuir baixo rendimento.



Figura 2.8: Dispositivo Mighty Whale [35-A].

Wavemill, Canadá

O Dispositivo Wavemill, concebido para operar na linha costeira, foi projectado pela Wavemill Energy Corporation. O dispositivo apresenta uma placa curva à entrada, que amplifica as ondas, conduzindo-as em seguida para um sistema de bombagem hidráulico (Fig. 2.9). Com uma potência instalada de 233 KW, o sistema pode ser utilizado para dessalinizar 20 litros de água do mar por segundo, ou eventualmente para produção de electricidade. Em 1998 foram

realizados testes com um modelo em tanque de ondas e, em 2001, foi instalada uma pequena unidade de dessalinização na Nova Escócia, Canadá.



Figura 2.9: Representação do dispositivo Wavemill [36-A].

Wavebob, Irlanda

O Wavebob é um dispositivo de absorção pontual flutuante, desenvolvido pelas Empresas Wavebob Ltd. e Clearpower Technology em 1999. Este dispositivo utiliza um sistema hidráulico para converter a energia das ondas em energia eléctrica. O sistema utiliza fluidos hidráulicos bio-degradáveis, a fim de evitar poluir o mar com as inevitáveis fugas. O dispositivo tem ainda um sistema de controlo a bordo, que muda a sua frequência natural de acordo com a frequência das ondas predominantes. Possui também um sistema de protecção contra condições de ondulação extremas. O protótipo do Wavebob tem um elemento flutuante com diâmetro igual a 15 m e ópera com profundidades superiores a 50 m. Pesa 440 Toneladas (Fig. 2.10). A potência instalada é de 1 MW. Em 2013 o promotor faliu e os testes pararam.



Figura 2.10: Protótipo do Wavebob em manutenção [37-A].

Onshore Oscillating Buoy, China

O Dispositivo Onshore Oscillating Buoy foi desenvolvido pelo Instituto de Conversão de Energia de Guangzhou (GIEC), na China. O protótipo (Fig. 2.11), que foi instalado na costa em 2001, consiste numa boia ancorada através de uma estrutura de suporte. O protótipo possui uma potência instalada de 400 KW, debitando em média 50 KW à saída. O sistema de conversão é hidráulico, com reservatório, o que permite obter um regime de funcionamento estável.



Figura 2.11: Dispositivo Onshore Oscillating Buoy [2.2].

Dispositivo MRC1000, Reino Unido

O MRC 1000 é um dispositivo multi-ressonante, flutuante, que foi desenvolvido pela Orecon. O sistema utiliza várias colunas-de-água oscilantes num conjunto de tubos com diferentes comprimentos. O sistema de extracção de potência tem três estágios: primeiro o ar é expandido através de uma turbina de impulso, depois a turbina acciona um circuito hidráulico e, finalmente, o óleo a alta pressão alimenta um motor-gerador. O protótipo deste dispositivo (Fig. 2.12), instalado em 2001, tem um diâmetro de 32 m e uma potência de 1 MW, operando em profundidades de 50 m.



Figura 2.12: Protótipo do dispositivo MRC 1000 [38-A].

Pelamis, Reino Unido

O Pelamis é um dispositivo do tipo corpo flutuante, que foi desenvolvido pela Ocean Power Delivery Ltd., na Escócia. O primeiro ensaio à escala real foi realizado no início de 2004. O corpo do Pelamis é um conjunto de quatro cilindros articulados, com um comprimento total de 140 m (Fig. 2.13). Os quatro módulos do dispositivo têm um diâmetro externo de 3.5 m e estão unidos entre si por juntas flexíveis. A potência instalada do protótipo é de 750 KW, produzidos por meio de sistemas hidráulicos que são accionados pelo movimento relativo dos diferentes módulos.



Figura 2.13: Protótipo do dispositivo Pelamis [39-A].

Dispositivo FO3, Noruega

O Dispositivo FO3 é um sistema desenvolvido pela Fred Olsen Ltd., na Noruega, que é muito semelhante à bóia de Manchester. O sistema é composto por várias bóias em forma de ovo, que são ligadas a uma plataforma comum. As bóias extraem energia das ondas para mover um sistema de bombas hidráulicas. O fluido hidráulico sob pressão é depois utilizado para accionar um motor hidráulico, o qual por sua vez está acoplado a um gerador de electricidade. Um protótipo (Buldra) à escala de 1:3, com 12 × 12 m, foi testado perto da costa Sul da Noruega em 2004 (Fig. 2.14). Tinha uma potência instalada de 2,52 MW, capturando a energia de uma frente de onda com 6 m.

Port Kembla OWC, Austrália

Este dispositivo é um sistema OWC que foi comissionado no ano de 2004 e posteriormente instalado a 200 m do paredão do Porto de Kembla, na Austrália. As empresas promotoras do projecto foram a Energetech e JPKenny Ltd. O protótipo do dispositivo operava perto da costa e tinha uma potência de 300 KW. A turbina de ar de fluxo reversível, do tipo Denniss-Auld, assentava numa estrutura flutuante com 36 m de comprimento e 35 m de largura. Esta possuía uma doca parabólica para focagem das ondas incidentes. Posteriormente foi lançado ao mar em 2010 um segundo protótipo, com 2,5 MW (Fig. 2.15).



Figura 2.14: Protótipo do dispositivo FO3 em testes [1.12].

Passados três meses, o dispositivo ter-se-á solto das amarras em condições de mar extremas. Existem já planos para um terceiro protótipo do dispositivo, chamado de Mk3.



Figura 2.15: Protótipo do Port Kembla OWC [40-A].

CETO Wave Pump, Austrália

O CETO é um dispositivo de absorção pontual desenvolvido pela Seapower Pacific, em 2005 (Fig. 2.16). É um sistema totalmente submerso, com 20,4 m de comprimento e 4,6 m de altura, assente no fundo do mar a uma profundidade de 20 m. As ondas induzem um movimento de oscilação vertical num disco submerso que, por sua vez, acciona duas bombas que produzem água a uma pressão acima dos 6 400 KPa. A água do mar é bombeada através

de um tubo com 125 mm de diâmetro, sendo usada para produzir água potável através de um processo de osmose inversa. O dispositivo tem uma potência instalada de 240 KW e encontra-se em fase de testes ao largo da Ilha de Garde, Austrália.



Figura 2.16: Protótipo do dispositivo CETO Wave Pump [41-A].

SPERBOY, Reino Unido

O Dispositivo Sperboy é um sistema flutuante que foi desenvolvido pela Embley Energy, em 2005, em parceria com a Universidade de Bristol. É constituído por um elemento flutuante que é mantido numa posição estável através de um sistema de cabos (Fig. 2.17). O sistema comporta um tubo onde oscila uma coluna-de-água, que por sua vez acciona os turbo-geradores. Este sistema opera em águas profundas, a uma distância de 13 a 19 Km da costa. A potência média estimada deste dispositivo será de cerca de 1 MW.



Figura 2.17: Protótipo do dispositivo SPERBOY [42-A].

Wave Star, Dinamarca

O Wave Star é um dispositivo OWC que foi desenvolvido em 2006 para operar em águas pouco profundas. A empresa promotora deste projecto é o consórcio Wave Star, em que tomam parte a Universidade de Aalborg, o Porto de Hanstholm e o Green LabsDk, entre outras entidades. O protótipo, à escala de 1:2, foi instalado em Hanstholm em Setembro 2009 e foi ligado à rede eléctrica no início de 2010 (Fig. 2.18). O protótipo de Hanstholm possui dois flutuadores e um peso total de mil toneladas. A potência instalada é de 110 KW, utilizados para pressurização hidráulica. A versão comercial do dispositivo deverá produzir 3 MW.



Figura 2.18: Plataforma com dois dispositivos Wave Star [43-A].

Wave Rider, Estados Unidos

O Wave Rider é um dispositivo desenvolvido pela Seavolt Technologies em 2007 (Fig. 2.19). Consiste num flutuador com uma configuração especial, que encerra um sistema hidráulico movido a partir da interacção com as ondas incidentes. O circuito hidráulico do dispositivo acciona uma pequena turbina para produzir electricidade. A potência instalada em parque destes dispositivos é estimada em 10 a 400 MW.



Figura 2.19: Protótipo do Wave Rider [44-A].

Aquabuoy, Canadá

O Dispositivo Aquabuoy foi desenvolvido em 2007 pela Finavera, da AquaEnergy (Fig. 2.20). Este sistema utiliza uma bóia de absorção pontual, cilíndrica, que comporta uma turbina Pelton e o respectivo gerador. Este sistema funciona através de um pistão, que opera dentro de um tubo cilíndrico solidário com a boia. As ondas incidentes fazem com que o cilindro suba e desça com a bóia, mantendo-se o pistão relativamente estável, o que permite bombear água para um acumulador de alta pressão. A água é depois canalizada para a turbina. O protótipo do dispositivo tem uma potência instalada de 250 KW, podendo esta ser aumentada através de um parque destes dispositivos.



Figura 2.20: Protótipo do dispositivo Aquabuoy [45-A].

Waveberg, Canadá

O Waveberg está a ser desenvolvido pela Waveberg Development Ltd. desde 2007. O sistema consiste num conjunto de braços articulados, ligados cada um a uma bóia que sobe e desce por acção das ondas (Fig. 2.21). Este movimento é utilizado para accionar bombas de êmbolos

que pressurizam água do mar, que é canalizada para terra. A água acumulada a alta pressão é depois utilizada para accionar uma turbina. O protótipo, com 50 m de comprimento, opera a uma profundidade de 50 m e possui uma potência instalada de 100 KW por unidade.



Figura 2.21: Protótipo do Waveberg [46-A].

Wave Plane, Dinamarca

O Dispositivo Waveplane foi desenvolvido na Dinamarca em 2007, pela WavePlane International AS (Fig. 2.22). É um dispositivo flutuante que opera perto da costa, ancorado ao fundo do mar. O dispositivo utiliza uma placa de amortecimento, na base, para limitar o seu movimento vertical aquando da passagem da onda. O alinhamento com as ondas é favorecido pela geometria do flutuador. As ondas são canalizadas por galgamento até aos reservatórios, para em seguida alimentar uma turbina hidráulica. Deste modo o sistema produz energia em regime permanente. O protótipo M-45 pesa 14 T e tem uma potência instalada de 200 KW.



Figura 2.22: Protótipo do dispositivo Wave Plane [47-A].

Onshore Wave Absorber, Israel

O Dispositivo Onshore Wave Absorber foi desenvolvido em Israel pela SDE Ltd., em 2007 (Fig. 2.23). Consiste num flutuador articulado suspenso da linha de costa ou, em alternativa, acoplado a um quebra-mar. O sistema funciona por meio do movimento das articulações em dobradiça dos flutuadores, que accionam um conjunto de bombas hidráulicas de êmbolos. O fluido sob pressão é depois utilizado para mover um motor hidráulico e respectivo gerador. A SDE produziu uma série de oito unidades de teste, possuindo a maior delas uma potência de 40 KW.



Figura 2.23: Protótipo do OnshoreWave Absorber [48-A].

BioWave, Austrália

O Dispositivo Biowave foi desenvolvido pela BioPower Systems, na Austrália, em 2007 (Fig. 2.24). O conceito tenta imitar o movimento de uma planta do oceano à passagem da onda. Este movimento oscilante é convertido em electricidade através de um actuador. O sistema utiliza módulos O-DRIVE de conversão de energia de 250 KW, que foram desenvolvidos para extracção de energia das ondas e das marés. Estes são acoplados à articulação da base do dispositivo. A potência instalada do protótipo varia entre 0,5 e 1,5 MW, conforme a dimensão do dispositivo.

PowerBuoy, EUA

O Dispositivo PowerBuoy foi desenvolvido pela Empresa australiana Ocean Power Technologies, em 2008. É um dispositivo de absorção pontual cuja estrutura é ancorada ao fundo do oceano, permitindo que se mova livremente sob a acção das ondas. A extracção de potência é feita através de um gerador eléctrico linear. O movimento do elemento flutuante permite accionar o gerador.

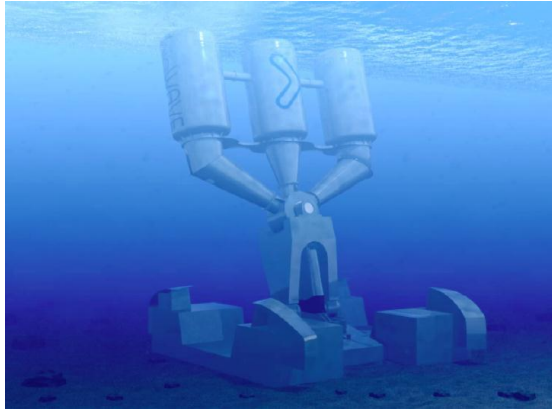


Figura 2.24: Representação do dispositivo bioWave [49-A].

O protótipo tem um diâmetro de 3,7 m e uma altura total de 15,8 m (Fig. 2.25). A capacidade instalada é de 40 KW, sendo o objectivo comercial de 500 KW.



Figura 2.25: Protótipo PowerBuoy testado ao largo de Santoño, em Espanha [1.12].

OE Buoy, Irlanda

O Dispositivo OE Buoy é um dispositivo flutuante que é desenvolvido pela Ocean Energy Ltd., desde 2008 (Fig. 2.26). O dispositivo consiste numa coluna vertical com uma tomada de água horizontal. O protótipo, à escala de 1:3, foi testado perto de Galway, na Irlanda. Contudo, não existem dados sobre o seu desempenho. Está prevista a implantação de um protótipo à escala real, desenvolvendo uma potência de 1 MW.



Figura 2.26: Protótipo do dispositivo OE Buoy [50-A].

Burin Wave Power Pump, Canadá

O Dispositivo Burin Wave Power Pump é um sistema de absorção pontual que é desenvolvido pelo College of North Atlantic, no Canadá, desde 2008 [2.3]. Este sistema também funciona através da interação de uma bóia com as ondas incidentes. A principal aplicação em vista é a bombagem de água para a aquicultura. A dessalinização de água do mar e a geração de electricidade também são consideradas pela empresa. Actualmente, um protótipo do dispositivo a pequena escala está a ser testado no cais (Fig. 2.27).



Figura 2.27: Protótipo do dispositivo Burin Wave Power Pump [2.3].

Searev, França

O Dispositivo SEAREV foi desenvolvido pelo Laboratório de Mecânica dos Fluidos da École Centrale de Nantes em 2008 (Fig. 2.28). Este dispositivo, de absorção pontual, é basicamente um flutuador com um sistema pendular incorporado no seu interior. A extracção de potência é feita à custa de um sistema hidráulico. O protótipo foi testado a uma escala de 1:12 no

canal de ondas da École Centrale de Nantes em 2009. Mais tarde foi testado no SEMREV um protótipo maior, com uma potência instalada de 500 KW.

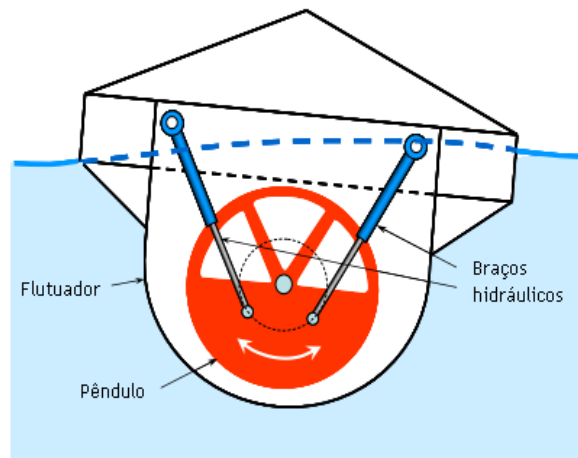


Figura 2.28: Representação do dispositivo Searev [1.12].

Oceantec, Espanha

O Dispositivo Oceantec é um dispositivo flutuante que é desenvolvido pela OCEANTEC Energias Marinas SL, em Espanha. O dispositivo utiliza a interação do flutuador com as ondas para excitar um giroscópio ligado ao PTO. Foi desenvolvido um protótipo, à escala de 1:4, que foi testado no mar em finais de 2008 (Fig. 2.29). O dispositivo tinha uma potência instalada de 500 KW.



Figura 2.29: Protótipo do dispositivo Oceantec [51-A].

Oyster 2, Reino Unido

O Dispositivo Oyster é um sistema do tipo pêndulo invertido, de 2009, que extrai energia das ondas através do movimento de uma placa vertical basculante. O PTO é um sistema hidráulico. A empresa promotora deste projecto é a Aquamarine Power, de Edimburgo, com a colaboração da Queen's University de Belfast. A potência instalada do primeiro protótipo era de 300 KW. Após os primeiros testes do Oyster, a empresa deu início ao desenvolvimento do Oyster 2 (Fig. 2.30). Em 2010 foi testado no EMEC um protótipo deste novo dispositivo, à escala de 1:1, com potência instalada de 2,4 MW.

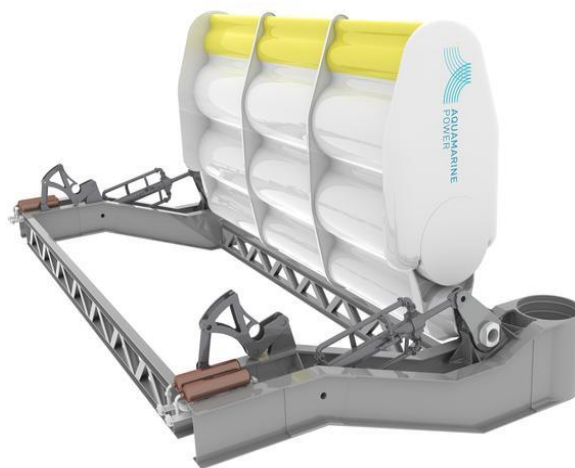


Figura 2.30: Protótipo do dispositivo Oyster 2 [52-A].

Hydroair, Reino Unido

A turbina HydroAir foi desenvolvida pela Marine Energy Generation Ltd. (MEG), em 2010. Tem duas fieiras de pás, localizadas em ambos os extremos, com um diâmetro superior ao do rotor. Estas pás trabalham numa tubeira anular de raio variável (Fig. 2.31). O ar entra na tubeira a uma velocidade relativamente baixa, formando um vórtice na esteira das pás, que é depois acelerado até ao rotor da turbina. O rendimento da turbina Hydroair é substancialmente mais elevado do que o da turbina Wells.

Mutriku BreakWater, Espanha

O Mutriku BreakWater é um dispositivo OWC espanhol, que foi desenvolvido em 2011 com a ajuda financeira do VII Programa-quadro da Comissão Europeia. Este sistema está sediado na EVE-Biscay Marine Energy Platform (bimep), incorporado num quebra-mar em Mutriku, no País Basco (Fig. 2.32).



Figura 2.31: Turbina HydroAir em fase de desenvolvimento [53-A].

A central começou a operar em meados de 2011. O sistema comporta 16 câmaras pneumáticas e igual número de turbinas Wells e o respectivo gerador, com 18,5 KW cada. A capacidade instalada é de 296 KW, no total.

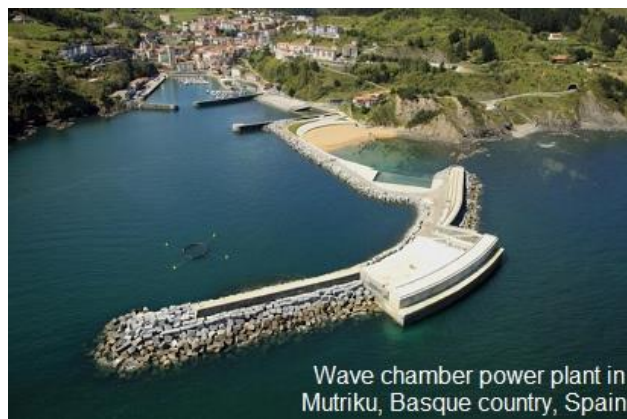


Figura 2.32: Vista aérea do quebra-mar de Mutriku, no País Basco [54-A].

Hyperbaric Coppe, Brasil

A Hyperbaric Coppe UFRJ é um projecto brasileiro, que é desenvolvido pela Universidade Federal do Rio de Janeiro desde 2012. Cada unidade do sistema opera com uma bóia de 10 m de diâmetro e um braço de 22 m de comprimento (Fig. 2.33). O movimento relativo entre a bóia e o braço activa uma bomba hidráulica que alimenta um circuito fechado de água fresca.

A água é mantida num acumulador hidro-pneumático, com uma câmara hiperbárica. A Central pode incorporar várias unidades deste sistema. O protótipo foi testado á escala de 1:1 no quebra-mar de São Gonçalo de Amarante, no Ceará. Estima-se que a potência instalada do dispositivo ronde os 600 KW.



Figura 2.33: Protótipo de uma Central Hyperbaric Coppe no quebra-mar de São Gonçalo de Amarante, no Ceará [55-A].

Wave Roller, Finlândia

O Wave Roller é um dispositivo que foi desenvolvido pela AW-Energy Oy, em 2012. O sistema opera próximo da costa, a profundidades entre 8 e 20 m, ficando totalmente submerso e ancorado ao fundo do mar. A energia das ondas é absorvida por meio de um conjunto de *flaps*, cujo movimento acciona um sistema hidráulico em circuito fechado (Fig. 2.34). O fluido hidráulico sob pressão faz girar um motor eléctrico acoplado a um alternador. Cada unidade Wave Roller tem uma potência entre 500 KW e 1 MW, com um factor de potência entre 25% e 50%, dependendo das condições de mar no local.



Figura 2.34: Protótipo do Wave Roller antes de ser submerso, ao largo de Peniche [1.12].

Hose-pump, Suécia

O Dispositivo Hose-pump é um absorvedor pontual que foi desenvolvido na Suécia em meados do ano 1990. O sistema tem uma bóia que funciona com uma mangueira distensível, que está ligada a um grande disco submerso, ancorado ao fundo do mar (Fig. 2.35). Quando as ondas elevam o flutuador, a mangueira estica e o seu volume diminui. Consequentemente, a água é expelida para fora e transportada até uma turbina hidráulica de alta pressão. Quando a mangueira distende, a água do mar é aspirada através de válvulas e o sistema retoma o ciclo de trabalho. Foi testado um modelo a escala de 1:5 no Mar do Norte, dos quais não foram publicados dados.



Figura 2.35: Montagem no local do Swedish Hose-pump [2.4].

Seadog Pump, EUA

O Dispositivo Seadog Pump é um sistema de absorção pontual desenvolvido pela Independent Natural Resource Inc. (INRI) em 2012, que consiste numa bóia flutuante cujo movimento é usado para accionar uma bomba de êmbolo. A estrutura é fixada a 20 m de profundidade. O sistema bombeia água do mar a alta pressão para a costa, onde esta é armazenada para ser utilizada para accionar um sistema hidroeléctrico. O sistema pode também ser usado para dessalinização.



Figura 2.36: Dispositivo Seadog Pump [56-A].

2.2 Dispositivos em funcionamento ou já descomissionados

A Tab. 2.1 dá a distribuição por países do número e potência total dos protótipos construídos ou ensaiados. Da análise desta tabela é possível concluir que muitos destes dispositivos ainda estão numa fase preliminar de investigação e desenvolvimento experimental, que decorre sobretudo em países europeus. As empresas promotoras dos dispositivos procuram essencialmente as costas da zona temperada do Atlântico Norte, naturalmente devido ao potencial energético das suas ondas, mas também devido ao grau de desenvolvimento tecnológico dos países da Europa ocidental.

Tabela 2.1: Distribuição por países dos dispositivos ensaiados ou construídos [levantamento efectuado no âmbito do Projecto COMPETE PTDC/EME-MFE/111763/2011-16].

País	Número de protótipos	Potência total (MW)
Reino Unido	14	5.11
Portugal	5	4.97
Austrália	10	1.20
Espanha	4	0.34
Dinamarca	6	0.28
Estados Unidos	8	0.13
Suécia	1	0.10
Irlanda	2	0.04
Nova Zelândia	3	0.02
Outros países	9	0.24
Total	62	12.43 MW

Destes países o Reino Unido está à frente, tanto no que diz respeito ao investimento em I & D no sector da energia, como na implementação de projectos e zonas de testes em condições de mar reais. O governo britânico e as empresas do sector apostam forte em actividades de desenvolvimento tecnológico ligadas à energia das ondas, nomeadamente na construção de

infra-estruturas que possibilitam o estudo e ensaio de protótipos, sendo estes factores determinantes para atrair investimento privado nesta área.

A Tab. 2.2 faz um apanhado dos protótipos de conversão de energia das ondas que ainda estão a funcionar. O número de dispositivos é considerável, muito embora a potência instalada ainda seja pouco significativa.

Tabela 2.2: Dispositivos que se encontram em funcionamento.

Ano	Protótipo	Potência	Local de teste
1990	Vizhinjam NIOT, India	110 KW	Índia, Porto de Vizhinjam
1992	Pico WAVEC, Portugal	400 KW	Portugal, Ilha do Pico, Açores
1998	Limpet OWC Wavegen e Queen's University, UK	500 KW	Reino Unido, Ilha de Islai
1998	Wave Dragon Consórcio Wave Dragon Ltd.	4 - 11 MW	Dinamarca, Nissum Bredning
2004	Pelamis Ocean Power Delivery Ltd., Escócia	750 KW	Reino Unido, EMEC
2004	Archimedes Wave Swing Teamwork Technology, Países Baixos	2 MW	Portugal, Póvoa de Varzim
2004	Fo3 Fred Olsen Ltd., UK	2,53 MW	Noruega, costa sul
2005	CETO Wave Pump Seapower Pacific, Austrália	240 KW	Austrália, Ilha de Garden
2006	Wave Star Consórcio Wave Star, A/S	110 KW	Dinamarca, Nissum Bredning

Ano	Protótipo	Potência	Local de teste
2006	Seabased Linear Generator, Suécia	10 KW	Suécia, Lysekil
2007	Wave Rider Seavolt Technologies, USA	10 - 400 MW	Austrália, Elliston
2008	PowerBuoy Ocean Power Technology, Austrália	40 KW	USA, New Jersey Santonõ, Espanha
2008	OE Buoy Ocean Energy Ltd., Irlanda	-----	Irlanda, Galway
2010	Oyster 2 Aquamarine Power Oyster e Queen's university, UK	2,4 MW	Reino Unido, EMEC USA, Costa Oeste Irlanda, Costa Oeste
2011	Mutriku BreakWater EVE, Espanha	296 KW	Espanha, Mutriku, País Basco
2012	Wave Roller AW-Energy OY, Finlândia	300 KW	Portugal, Peniche França Inglaterra Escócia
2012	Hyperbaric Coppe Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil	600 KW	Brasil, São Gonçalo de Amarante

A Tab. 2.3, reúne os dispositivos que foram descomissionados ao longo dos anos 1978 - 2001. O Japão foi um dos países pioneiros da corrida à energia das ondas, com muitos conceitos desenvolvidos com sucesso até ao protótipo de demonstração. Todos eles foram descomissionados, por terem atingido o limite de vida útil, ou foram destruídos por tempestades. Actualmente existem planos para a construção de uma área onde será instalado um parque de produção de energia das ondas, para funcionar com vários dispositivos.

Tabela 2.3: Dispositivos descomissionados (1978 - 2001).

Ano	Protótipo	Potência	Local de teste
1978	Kaimei JAMSTEC, Japão	125 KW	Japão, Yura
1982	Tapchan Norwave AS, Noruega	350 KW	Noruega, Ilha de Bergen
1985	Kvaerner Kvaerner Brug's, Noruega	500 KW	Noruega, Ilha de Bergern
1998	Mighty Whale JAMSTEC, Japão	110 KW	Japão, Baía de Gokasho
1999	Wavebob Wavebob Limited, Irlanda Clear Power Technology Ltd	1 MW	Irlanda, Galway Bay
2001	Onshore Oscillating Buoy GIEC, China	50 KW	China, Hong Kong

Como já foi referido, nem todos os promotores conseguem arranjar financiamento para passar à fase seguinte do desenvolvimento dos dispositivos. Assim, muitos deles “morrem na praia”. Na Tab. 2.4 agrupámos aqueles dispositivos cujo desenvolvimento foi descontinuado, possivelmente por não terem as características especificadas aquando do seu projecto, e também alguns dispositivos que foram destruídos após a fase de demonstração, quer devido a condições climáticas adversas, quer devido a erro humano durante o processo de instalação e montagem.

Tabela 2.4: Outros dispositivos desactivados ou destruídos (1981-2008).

Ano	Protótipo	Potência	Local de teste
1981	Pendulor Instituto de Tecnologia de Muroran, Japão	20 KW	Japão, Mashike
1983	Sanze OWC Sanze Shoreline Gully, Japão	40 KW	Japão, costa Oeste

Ano	Protótipo	Potência	Local de teste
1986	Floating Wave Power Vessel Sea Power International, Suécia	---	Suécia, Estocolmo
1985	Islay OWC Isle od Islay Shorelyne OWC, UK	75 KW	UK, Ilha de Islay
1988	Sakata OWC Ministério dos Transportes do Japão	60 KW	Japão, Porto de Sakata
1995	Osprey Wavegen, Escócia	2 MW	Escócia, Dounreay
1998	Wavemill Wavemill Energy Corp., Canadá	233 KW	Canadá, Nova Escócia
2001	MRC1000 Orecon, Uk Port Kembla	1 MW	UK, Costa Sul
2004	Energetech e JP Kenny Ltd., Austrália	2,5 MW	Austrália, Kembla
2007	Aquabuoy Finavera, Canadá	250 KW	Dinamarca, Nissum Bredning
2007	Waveberg Waveberg Development Ltd. EUA	100 KW	EUA, Cabo Canaveral
2007	Wave Plane Wave Plane International AS, Dinamarca	200 KW	Dinamarca, Porto de Gentofte
2007	Onshore Wave Absorber SDE Limited, Israel	40 KW	Israel, Porto de Jaffa
2007	Biowave Bio Power Systems, Australia	500 KW 1000 KW 1500 KW	Australia, Port Fairy
2008	Sperboy Embley Energy, UK	---	UK, Bristol

Ano	Protótipo	Potência	Local de teste
2008	Searev École Centrale de Nantes, França	250 KW	França, École Centrale de Nantes França, SEMREV
2008	Oceantec OCEANTEC Energias Marinas SL, Espanha	500 KW	Espanha, Costa Atlantica

3. Zonas e plataformas de teste

Verifica-se actualmente em todo o mundo, e muito em especial na Europa, um grande incremento do estudo e desenvolvimento de dispositivos de extracção de energia das ondas. Este facto levou a que fossem criadas zonas e plataformas de teste de protótipos de dispositivos de recuperação de energia das ondas por toda a costa atlântica europeia e Mar do Norte. O principal objectivo é o de apoiar o desenvolvimento de novas tecnologias neste sector, à escala industrial. Estes centros permitem aos promotores destas tecnologias demonstrar e testar o desempenho dos seus dispositivos em condições de mar reais. Os centros e organismos envolvidos têm no entanto que obter várias autorizações, realizar consultas às partes interessadas e formalizar contratos, antes de realizar os ensaios dos diferentes dispositivos.

A Fig. 3.1 dá a localização geográfica das zonas e plataformas instaladas, ou em fase de construção, para testar dispositivos de energia das ondas na Europa. Estas infra-estruturas farão seguidamente objecto da nossa atenção.

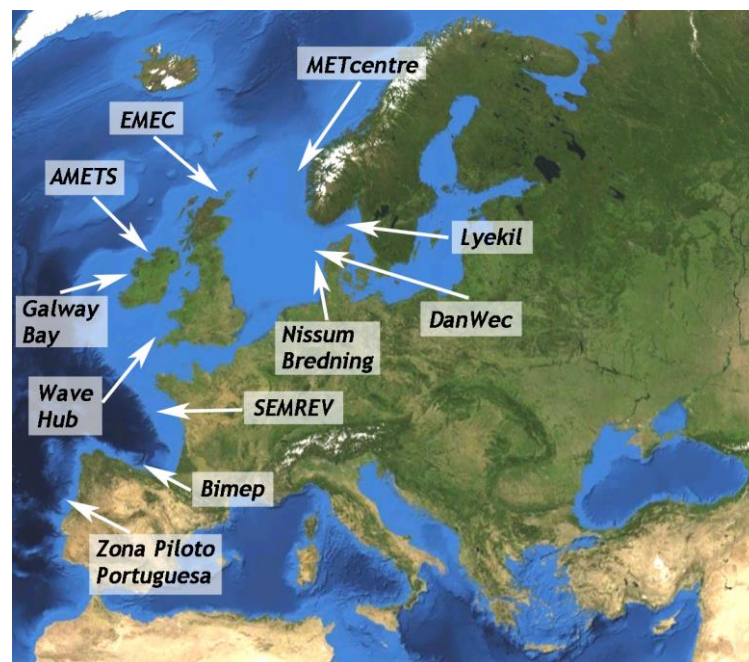


Figura 3.1: Zonas e plataformas instaladas, ou em fase de desenvolvimento, para testar dispositivos de energia das ondas na Europa.

Zona Piloto Portuguesa

Portugal situa-se numa zona do globo com características ideais para realizar estudos sobre o aproveitamento da energia das ondas. A zona piloto portuguesa (ZP) da Aguçadoura foi estabelecida em 2007 e encontra-se situada ao largo de S. Pedro de Moel, a uma distância de 5 a 8 km da costa, entre a Nazaré e a Figueira da Foz (Fig. 3.2). Esta zona possui uma área de aproximadamente 396 km², em águas de profundidade compreendida ente 30 e 90 m. A criação da ZP é de grande importância, pois lança Portugal no mercado internacional da utilização de energia das ondas, um sector que poderá vir a ter alguma relevância no País, se tivermos em linha de conta a extensão da nossa costa e a vasta zona económica exclusiva (ZEE) portuguesa.

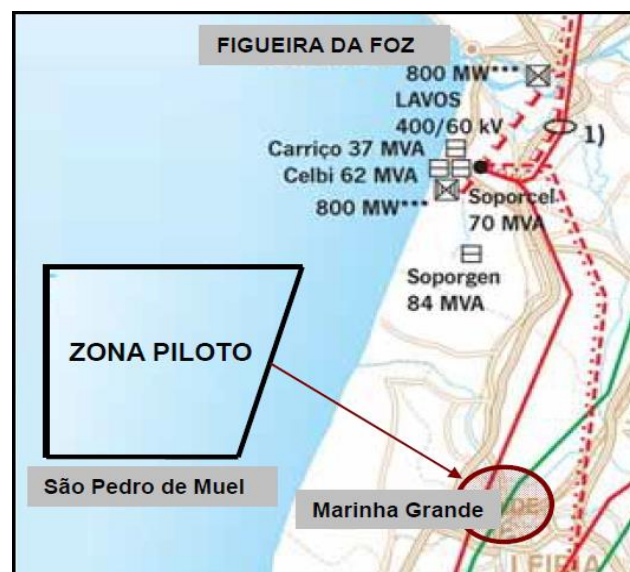


Figura 3.2: Zona Piloto Portuguesa, ao largo de S. Pedro de Moel [3.1].

Com a criação da zona piloto portuguesa houve necessidade de desenvolver um cluster nacional para ligação à rede. A potência da zona de testes portuguesa encontra-se partilhada: 80 MW são infra-estruturas garantidas pela EDP distribuição e 250 MW são infra-estruturas garantidas pela Rede Eléctrica Nacional. Os ramos de ligação são da responsabilidade dos promotores do dispositivo a testar. A ZP pode vir a desempenhar um papel muito importante no desenvolvimento pré-comercial de dispositivos de conversão de energia das ondas, atraindo para Portugal diversas empresas promotoras destas tecnologias.

European Maritime Energy Centre (EMEC)

O Centro Europeu de Energia Marítima (EMEC) foi fundado em 2002, em Orkney, na Escócia (Fig. 3.3). O Centro oferece uma potência instalada de 2.2 MW. Foi o primeiro Centro do seu género, com um orçamento de 16,7 milhões de Euro. O EMEC tem acolhido uma grande

variedade de dispositivos, em diferentes fases de desenvolvimento. A sua primeira actividade decorreu em 2004. A Empresa Aquamarine Power lançou o seu Dispositivo *Oyster* em finais de 2009, no EMEC. O dispositivo de segunda geração construído pela PWP chegou a Orkney em meados de 2010, sendo o EMEC actualmente a principal zona de testes do protótipo Pelamis. O EMEC está dividido em duas zonas: uma primeira zona situada em Billa Croo, que é usada para o estudo de dispositivos de aproveitamento de energia das ondas, e uma outra em Fall of Warness, onde são testados dispositivos que aproveitam a energia das marés. O Centro é um local de excelência para o desenvolvimento de dispositivos de conversão de energia das ondas, uma vez que conta com óptimas condições de mar e possui ligação directa à rede através de um cabo submarino.

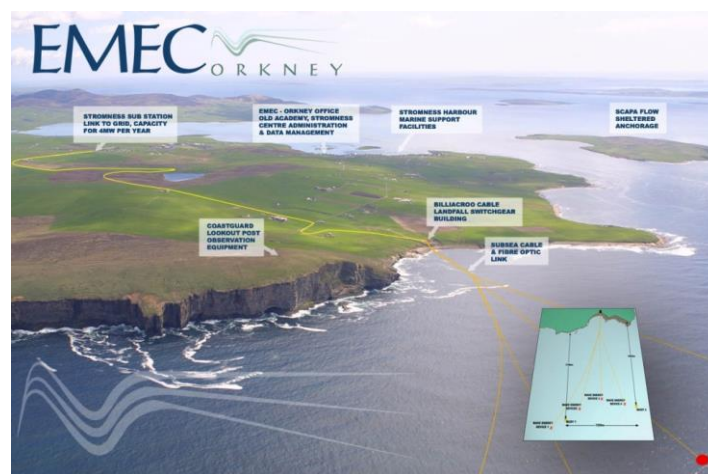


Figura 3.3: Centro Europeu de Energia Marítima (EMEC) [57-A].

Existem no EMEC catorze nichos de teste, ligados à rede eléctrica, o que tem permitido testar até ao momento um número considerável de dispositivos. Os ensaios realizados obedecem às Normas ISO-17025, o que permite obter estimativas de desempenho certificadas com base na ISO/IEC-17020. O Centro fornece pois uma verificação independente de *Tecnologia Ambiental* (EMEC-ETV), que pode ajudar os dispositivos testados a chegar ao mercado mundial. O EMEC também oferece um amplo conjunto de serviços de consultoria nesta área.

Atlantic Marine Energy Test Site (Amets)

O Atlantic Marine Energy Test Site (Amets) é uma zona de testes irlandesa, que se encontra em fase de desenvolvimento desde 2008. O organismo que tutela este projecto é a *Sustainable Energy Authority of Ireland* (SEAI). Esta iniciativa visa facilitar o ensaio de dispositivos de extracção de energia das ondas a escalas próximas da real, numa zona aberta para o mar. O Amets está localizado ao largo de Annagh Head, a Oeste de Belmullet (Fig. 3.4). A zona conta com ligação à rede eléctrica através de um cabo submarino,

proporcionando dois locais de teste separados, com diferentes profundidades, permitindo que sejam ensaiados diferentes tipos de dispositivos. A zona A, com 6,9 km², tem uma profundidade de cerca de 100 m e está localizada a 16 km de Belderra Strand. A zona B, com 1,5 km², tem 50 m profundidade e está situada a cerca de 6 km da costa.



Figura 3.4: Configuração do Atlantic Marine Energy Test Site [58-A].

Na costa funciona uma pequena subestação, a ser construída desde 2006, na proximidade do ponto de desembarque dos cabos submarinos, perto de Belderra Strand. As zonas de teste poderão ser acedidas através do Frenchport Pier.

Galway Bay National Test Site

O Galway Bay National Test Site, que data de 2004, é uma zona de testes para protótipos de dispositivos flutuantes, construídos à escala de 1:4. Esta zona está localizada na costa Oeste da Irlanda, em Galway Bay, ao largo de Spiddal (Fig. 3.5). As ondas neste local têm vindo a ser monitorizadas desde 2005, o que confirma que Galway Bay é uma zona com ondas bastante energéticas, mas menores que aquelas que banha a costa Oeste da Irlanda. Sendo assim, o local é ideal para ensaiar dispositivos à escala 1:4.

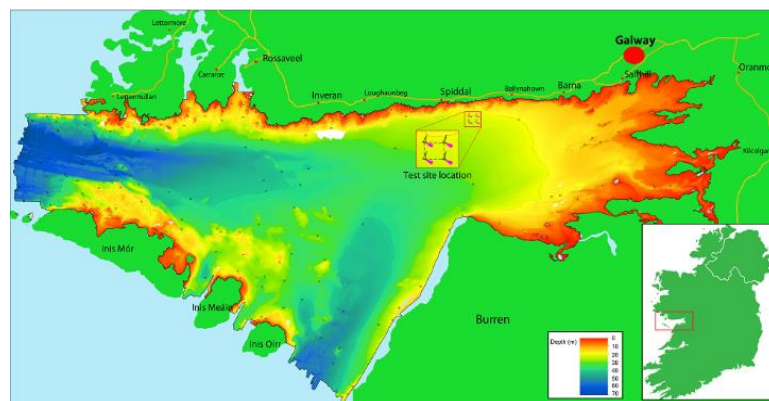


Figura 3.5: Zona de testes de Galway Bay [59-A].

A criação deste projecto foi da responsabilidade do Marine Institute e do SEI. Actualmente, é o Marine Institute o responsável pela coordenação da zona de testes. A partir de 2006 já foram testados, nesta zona, os protótipos do OEbuoy (*Ocean Energy Ltd.*) e o do Wavebob (*Wavebob Ltd.*), ambos projectos irlandeses. A área de teste tem cerca de 37 hectares e uma profundidade média de 23 m, estando equipada com duas plataformas de ensaio. A zona ainda não está ligada à rede eléctrica. Dada a potência estimada para os dispositivos a ensaiar, não seria oportuno lançar um cabo submarino neste local.

O Wave Hub

O Wave Hub é a maior e mais avançada zona de testes do mundo e fica situada em Cornwall, a Sudoeste da Inglaterra. É uma iniciativa apoiada pela *South West Regional Development Agency* (SWRDA), com um orçamento de 61,3 milhões de Euro. O projecto obteve aprovação por parte do Governo do Reino Unido em 2007 e foi implantado no Verão de 2010. A zona de testes situa-se a 16 km da costa, em pleno Oceano Atlântico (Fig. 3.6). O local que está destinado aos ensaios possui uma área de 8 km², com profundidades compreendidas entre 48 e 58 m, permitindo assim testar diferentes tipos de dispositivos.

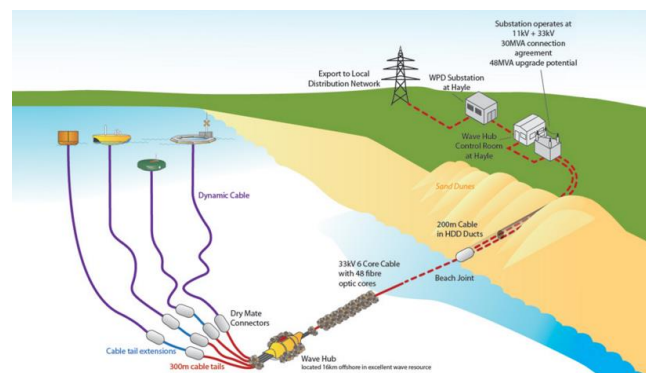


Figura 3.6: Zona de Testes Wave Hub, subestação costeira e cabo submarino [60-A].

A zona está equipada com tecnologia de ponta, no que diz respeito ao estudo de protótipos para aproveitamento de energia das ondas. Tem quatro plataformas que possibilitam o ensaio de dispositivos em alto mar até 30 MW, potência que pode ser expandida até aos 48 MW. A zona possui ligação à rede eléctrica nacional, através de um cabo submarino com 25 km de comprimento. O local encontra-se equipado com uma bóia oceanográfica Datawell Direcional Waverider desde 2015. Os dados recolhidos são analisados em tempo real, sendo depois disponibilizados no site do Wave Hub e, em simultâneo, guardados numa base de dados. O primeiro cliente do Wave Hub foi a *Ocean Power Technologies*, que encomendou o estudo de um Parque de dispositivos PowerBuoy com 5 MW.

Biscay Marine Energy Platform

A Biscay Marine Energy Platform (Bimep) é uma infra-estrutura espanhola de testes em mar alto, localizada ao largo da costa, perto da Vila de Armintza, a cerca de 30 km a norte de Bilbao (Fig. 3.7). Esta zona tem uma área de 8 km² e foi criada em 2008 com a finalidade de testar dispositivos desenvolvidos para operar no *offshore*. A plataforma dista cerca de 1,7 km da costa. Em 2009 o Bimep foi equipado com uma bóia oceanográfica para monitorização do estado de mar. A verba investida neste projecto ronda os 15 milhões de Euro.

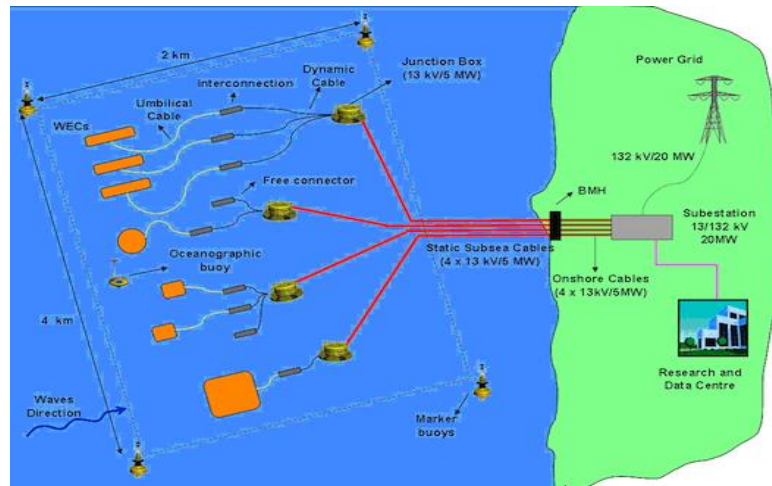


Figura 3.7: A Biscay Marine Energy Platform e respectiva ligação à rede [61-A].

A instalação experimental permite testar protótipos à escala real e parques de dispositivos. A zona de testes possui um potencial energético disponível nas ondas incidentes de 21 kW/m, sendo que o fluxo total de energia é de 21 MW. Os dispositivos podem ser conectados à rede em quatro pontos de ligação, com 13,2 kV cada, e uma caixa de junção submarina para 5 MW. O Bimep está equipado com quatro cabos submarinos que transportam a energia desde os protótipos até à rede.

MET Centre

O Centro de Testes de Energia Marinha (METcentre) foi criado em 2009 (Fig. 3.8). Está situado em Karmoy, na Noruega, e opera essencialmente com dispositivos *offshore*. O Centro tem como principal finalidade estudar sistemas de conversão de energia eólica funcionando em alto mar. Está igualmente aberto ao estudo de dispositivos de energia das ondas. O MET Centre possui infra-estruturas e serviços especializados no ensaio de ambos os sistemas.

Existem duas zonas de teste: a zona A, com uma profundidade de 200 m, situada a 10 km da costa e que conta com dois nichos, e a zona B com uma profundidade entre os 20 e 40 m, localizada a 1 km da costa. Esta última possui seis nichos de ensaio. A área de testes

comporta 12 km de cabos submarinos, de 15MW, que descem a uma profundidade de 200 m, ligados à rede eléctrica de 220 v.

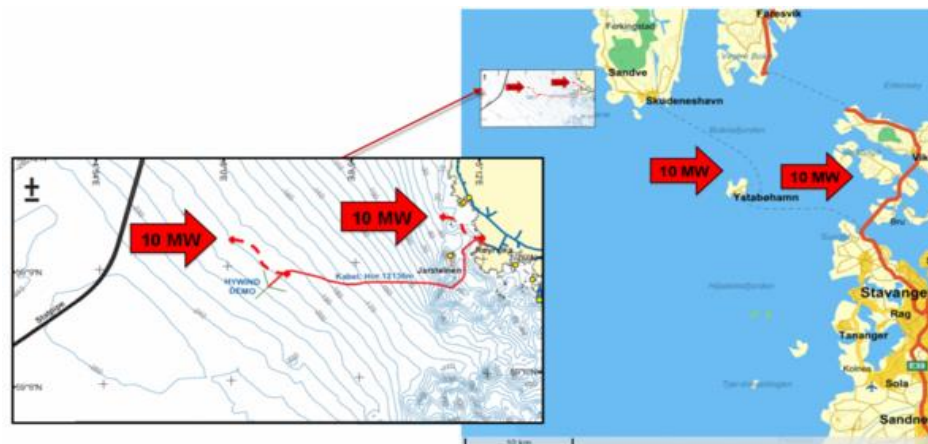


Figura 3.8: Localização do MET Centre e respectivo cabo submarino [62-A].

As infra-estruturas em terra comportam a doca, os escritórios, salas de projecto e armazéns. Existe também uma oficina metalomecânica que dá assistência às reparações e manutenção dos dispositivos e sistemas oceanográficos.

Nissum Bredning Wave Energy Test Site

O Nissum Bredning Wave Energy Test Site foi criado em 2003 no noroeste da Dinamarca e está afecto à *Nordic Folkecenter for Renewable Energy* (Fig. 3.9). Esta zona de testes já ensaiou mais de 30 protótipos, a escalas que variam entre 1:4 e 1:10. Os protótipos ensaiados nesta zona de testes mais conhecidos são o Wave Dragon em 2003, com 20 KW à escala de 1:4, e o Wave Star em 2006, com 5,5 KW à escala de 1:10.

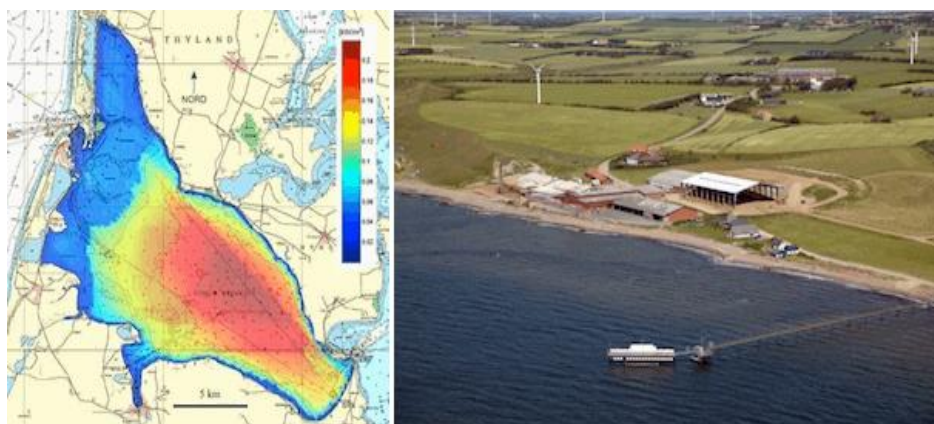


Figura 3.9: Mapa e vista aérea do Nissum Bredning Wave Energy Test Site [63-A].

O acesso à zona de ensaios de protótipos é relativamente fácil, graças a uma ponte com cerca de 150 metros que entra mar adentro. A profundidade na zona de ensaio dos protótipos varia entre 4 e 6 m. A zona está equipada com um conjunto de sondas que permitem prever as condições atmosféricas. Nissum Bredning tem alojamento e oficinas ao serviço dos investigadores que se deslocam ao local.

O SEMREV

O SEMREV é uma zona de teste de dispositivos que foi construída entre 2007 e 2013, com financiamentos do projecto CPER no valor de 6,8 milhões de Euro. Esta zona está situada na costa Atlântica de França, em Pays-de-Loire, a cerca de 100 km de Nantes. Esta plataforma compreende uma zona em alto mar, que inclui instrumentos de monitorização oceanográfica e um cabo submarino, para transporte de energia em alta tensão até à subestação situada na costa (Fig. 3.10). O sistema está conectado à rede eléctrica da EDF.

O SEMREV tem capacidade para acomodar várias tecnologias de produção, transformação e armazenamento de energia, podendo ser testados vários dispositivos em simultâneo, com partilha das infra-estruturas e dos custos de operação inerentes. A zona de testes situa-se a cerca de 15 km de Le Croisic, onde a profundidade atinge cerca de 35 m. A rede de sensores está dispersa por uma área de aproximadamente 1 km², abrangendo zonas de águas profundas e restritas. O SEMREV conta com quatro nichos para acolher os protótipos a testar.

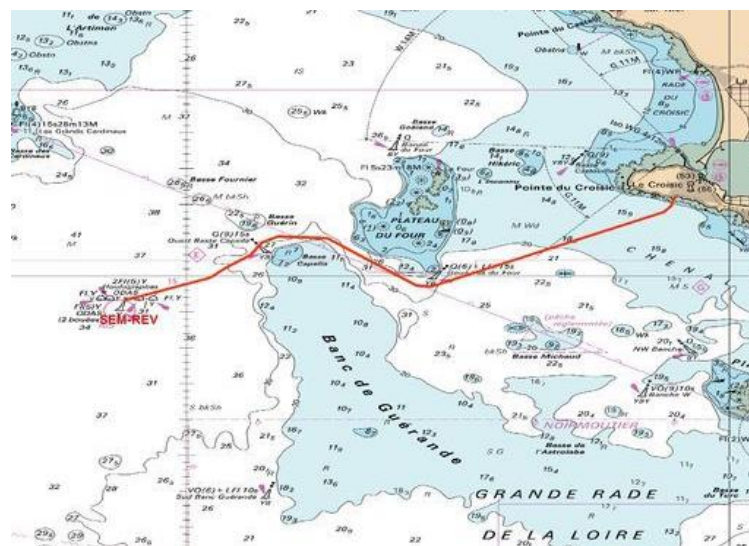


Figura 3.10: A plataforma SEMREV e respectivo cabo submarino [64-A].

As instalações na costa podem acolher investigadores e pessoal de apoio, bem como o respectivo equipamento. O Laboratório LHEAA, filiado no CNRS, é o responsável pela gestão do projecto, cuja finalidade era também constituir uma zona para experiências da *Ecole Centrale de Nantes* (ECN).

Danish Wave Energy Center

O Danish Wave Energy Center (DanWEC) é um projecto em desenvolvimento, para criação de uma zona de testes de recuperadores de energia das ondas. O DanWEC visa dar, cumulativamente, apoio aos promotores de dispositivos WEC em todas as etapas essenciais do processo de desenvolvimento tecnológico. O Centro foi criado em 2009 nas proximidades do Porto de Hanstholm e tem como objectivo impulsionar o sector da energia das ondas na Dinamarca, oferecendo um lugar onde os Investigadores e empresas promotoras podem testar os seus dispositivos á escala real e avaliar o seu desempenho. O Centro tem relações privilegiadas com as autoridades do sector da energia e também com a Universidade de Aalborg.

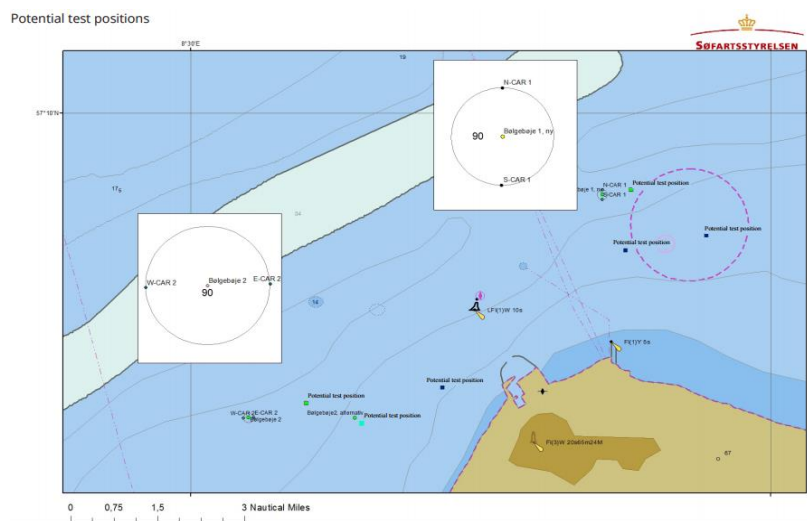


Figura 3.11: Localização do Danish Wave Energy Center e das bóias [65-A].

O DanWEC disponibiliza diversas informações no seu site, algumas relativas às condições climáticas actualizadas obtidas com base nos registos de seis bóias que operam em Hanstholm desde o início de 2015. Destas, duas são Datawell DWR4 Waverider e flutuam no Mar do Norte, ao largo do Porto de Hanstholm. Estas bóias medem o clima de ondas e transmitem os dados, na banda VHF, para a antena e receptores sediados em Hanstholm.

Lysekil Wave Energy Test Site

O Parque de Lysekil é um projecto que arrancou em 2004, sob os auspícios da Universidade de Uppsala. Esta zona de testes está situada ao largo da costa Oeste da Suécia, a cerca de 100 km a norte de Gotemburgo, perto do município de Lysekil (Fig. 3.12). Os testes realizam-se a 2 km da costa, numa área sinalizada, por forma a evitar acidentes com embarcações. A zona está direccionada para o ensaio de dispositivos absorvedores pontuais que utilizam geradores eléctricos lineares. O primeiro gerador linear foi implementado em 2006, a par da instalação

do cabo submarino para conexão à rede. A zona destinada à inserção do parque de dispositivos tem capacidade para dez protótipos e respectivos equipamentos. A zona possui actualmente uma potência instalada que vai dos 30 KW aos 0,5 MW. Está em curso a aprovação de uma nova licença que irá permitir a utilização de mais 0,5 km², o que tornará possível aumentar para vinte o número máximo de protótipos a lançar ao mar.



Figura 3.12: O Parque de Lysekil no Verão de 2008 [66-A].

Durante os primeiros dez anos do projecto foram implementados cerca de 10 geradores, funcionando em simultâneo, a par de duas subestações submarinas. O parque utiliza 30 bóias de menor dimensão e uma RiderTM para monitorizar as condições ambientes. Uma torre de vigilância permite controlar a funcionalidade dos dispositivos. O projecto dá igualmente apoio a estudos de organismos marinhos que vivem no fundo do mar, nomeadamente peixes.

4. Estudo do dispositivo ANACONDA em Portugal

O presente estudo centra-se no dispositivo de energia das ondas ANACONDA, que foi proposto e patenteado em 2006 por Farley & Rainey no Reino Unido [4.1]. O ANACONDA é um sistema inovador que utiliza um longo tubo de borracha, flutuante, para interagir com as ondas incidentes. A proa do tubo está fechada e a sua parte traseira é conectada com o sistema de extracção de potência. O tubo está cheio de água e actua como um dispositivo atenuador das ondas. Trata-se de um sistema muito simples, que pode utilizar tecnologia barata e bem testada: um grupo turbina-gerador, por exemplo. Já foram estudados anteriormente dispositivos semelhantes, por via teórica e também experimental, tendo sido demonstrado possuírem boas capacidades para conversão da potência das ondas do mar.

4.1 Estado da Arte

Os primeiros ensaios laboratoriais do dispositivo ANACONDA foram realizados por John Chaplin em 2007 e estão reportados em [4.2]. Este estudo preliminar, com um pequeno modelo reduzido, revelou ser possível obter frentes de captura de energia equivalentes a 3 ou 4 vezes o diâmetro do tubo do dispositivo, numa gama alargada de frequências de onda incidente. Mais tarde, tiveram lugar na Offshore Wave Basin do Denish Hydraulic Institute, em 2010, uma segunda série de ensaios, desta vez com um modelo à escala 1:20 [4.3]. Estes ensaios consistiram essencialmente em testes de radiação, conduzidos por imposição de pulsos de pressão no tubo de borracha. Em todos estes ensaios o tubo foi subjugado em ambas as extremidades. O princípio de funcionamento e a teoria relevante para a análise deste sistema de energia das ondas estão compilados por Farley em [4.4]. Este trabalho extrai importantes conclusões acerca do desempenho e potencialidades do dispositivo.

A presente investigação orienta-se para a análise de desempenho do dispositivo ANACONDA, quando equipado com um tubo que flutua livremente frente às ondas incidentes e cuja pulsação activa um sistema pneumático de extracção de potência, que está acoplado à sua parte traseira. O estudo apoia-se na realização de ensaios experimentais em canal de ondas, com um modelo reduzido do dispositivo à escala 1:100. No protótipo do dispositivo o sistema de extracção incorpora uma turbina de ar que acciona um alternador. No nosso modelo físico

a câmara pneumática comunica com a atmosfera através de um orifício calibrado, cuja característica simula a impedância da turbina. Foram testados orifícios de diferente diâmetro e, em cada situação, foram efectuadas medições das oscilações da massa de água dentro da coluna do sistema de condicionamento. Foi igualmente conduzida uma análise dos registos do campo de ondas reflectidas e transmitidas no canal hidráulico. Os resultados obtidos permitem estimar a potência extraída pelo sistema e o seu rendimento, variáveis que serão quantificadas e extrapoladas para um sistema operando no mar.

A nossa contribuição para o desenvolvimento do dispositivo ANACONDA está descrita em três publicações de Mendes et al [4.5, 4.6 e 4.7]. A primeira diz respeito ao ensaio preliminar de um tubo com 0,814 m de comprimento e um diâmetro igual a 78,3 mm. O ensaio do primeiro tubo que foi construído demonstrou o bom desempenho do dispositivo no aproveitamento da energia das ondas, em águas profundas e intermédias, numa vasta gama de períodos de onda incidente. Foi entretanto construído e ensaiado um segundo tubo [4.6 e 4.7], cujo estudo é aqui reportado. Esta investigação permite concluir que o protótipo do dispositivo ANACONDA acoplado a um sistema de extracção de energia pneumático consegue atingir um nível elevado de potência, na ordem de 1 MW, que é compatível com a potência nominal dos dispositivos de última geração actualmente lançados ao mar.

4.2 Desenvolvimento experimental do conceito

Estima-se que o protótipo do dispositivo ANACONDA funcione com um longo tubo flexível, em borracha, com 7 m de diâmetro, operando em águas profundas ou intermédias. O dispositivo deverá funcionar de forma eficaz nas condições que são normalmente encontradas no Atlântico Norte: ondas de 8 a 10 segundos, ou seja, com 100 a 150 m de comprimento. Estas condições, à escala do modelo laboratorial, correspondem ao nosso tubo cujo diâmetro ronda os 7,5 cm (sem estar pressurizado). O canal tem cerca de 8 m de comprimento e 0,3 m de largura. O gerador de ondas é do tipo comporta articulada no fundo do canal, movida através de uma manivela acoplada a um disco de excentricidade variável. O sistema é accionado por um motor eléctrico DC com velocidade variável. O gerador é capaz de gerar ondas regulares cuja amplitude varia sensivelmente entre 0,05 cm e 2,3 cm. A frequência das ondas geradas varia entre 0,4 e 2 Hz (períodos entre 0,5 e 2,5 s). O nível de água no canal é mantido em $h = 0,334\text{m}$.

4.2.1 O modelo físico da UBI

Foi projectado e construído um modelo reduzido do dispositivo ANACONDA, à escala 1:100. Este modelo físico, que se representa na Fig. 4.1, foi ensaiado no canal hidráulico do *fluidslab*, na Universidade da Beira Interior.

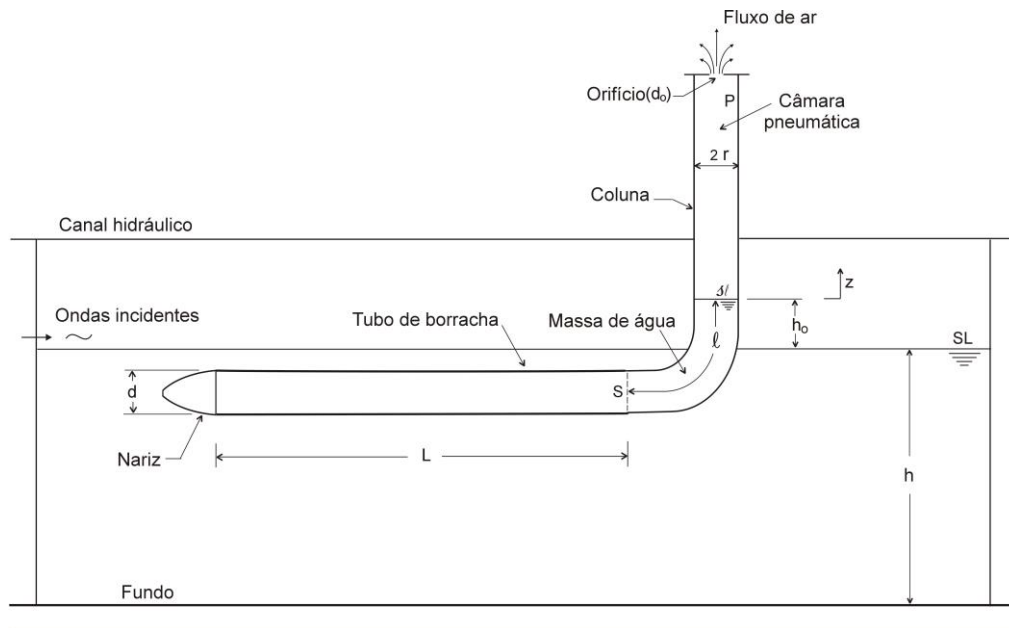


Figura 4.1: Modelo físico ensaiado no canal hidráulico do *fluidslab*.

As principais dimensões do modelo são dadas na Tabela 4.1. A instalação experimental consiste num tubo de borracha com 0,904 m de comprimento. O tubo foi pressurizado antes de cada uma das duas séries de ensaios realizados, sendo os diâmetros correspondentes aproximadamente 95,8 mm e 97,8 mm, respectivamente para a Série 1 e Série 2. A amostra de Latex utilizada tem uma espessura de 0,16 mm. A proa do tubo está fechada, terminando por um nariz, e a parte traseira é conectada ao sistema de conversão e extracção de energia. Este compõe-se de uma chaminé transparente com 72,2 mm de diâmetro, que comunica com a atmosfera através de um orifício situado na parte superior. O tubo de borracha está ligado a esta chaminé por intermédio de um cotovelo em PVC, com secção S . O tubo da ANACONDA é pressurizado até uma altura de coluna de água $h_0 = 0,1$ m, por meio de uma pequena bomba instalada no nariz do dispositivo. Acima do nível de água na chaminé existe uma câmara pneumática com 0,572 m de altura. Esta câmara é fechada com uma tampa que possui um orifício de diâmetro d_0 . Nesta experiência a impedância da turbina é simulada com o auxílio

deste orifício calibrado. As ondas incidentes induzem pulsações no tubo de borracha, que vão posteriormente excitar a coluna de água na chaminé. No caso real as oscilações deste pistão de água condicionam a pressão do ar na câmara pneumática, activando deste modo o movimento da turbina de ar.

Tabela 4.1: Dimensões do modelo do tubo (em mm).

Ensaio da Série 1							
L	d	w	h_o	$2r$	h_1	l	h
904	95,8	0,16	100	72,2	572	152	334

Ensaio da Série 2							
L	d	w	h_o	$2r$	h_1	l	h
904	97,8	0,16	100	72,2	572	152	334

O canal hidráulico onde o dispositivo foi testado tem cerca de 8 m de comprimento e 0,3 m de largura. O gerador de ondas é do tipo comporta articulada no fundo do canal. Na extremidade oposta à do gerador situa-se uma praia de dissipação com 1,28 m de comprimento e 16,7° de inclinação. A profundidade da água no canal é $h=0,334$ m. O coeficiente de reflexão situa-se abaixo dos 10% na maioria dos casos. As oscilações da coluna de água na chaminé são monitorizadas através de uma sonda de nível do tipo tensão-resistência especialmente construída para o efeito. No canal foram igualmente instaladas outras três sondas do mesmo tipo e respectivos monitores, duas delas entre o gerador e o modelo físico e a outra atrás do modelo, em direcção à praia.

4.2.2 Montagem do equipamento de medida

A metodologia adoptada para realizar as medições é relativamente simples e apoia-se no seguinte equipamento de medida. As oscilações da coluna de água no interior da chaminé são monitorizadas por intermédio de uma sonda de nível construída no Laboratório. A medição das ondas no canal é efectuada por meio de três sondas resistivas, controladas por um

monitor da HR Wallingford com quatro canais. Estes sensores são controlados por um módulo de aquisição KUSB-3100 S, da Keithley. A incerteza das medições destes aparelhos é inferior a 1 mm. O campo de ondas a montante do modelo é igualmente registado por um osciloscópio RT digital TDS220, da Tektronix. A instalação experimental do presente estudo, que inclui a ANACONDA flutuando dentro do canal e conectada ao sistema PTO, bem como o sistema de controlo e aquisição de dados, está visível na foto da Fig. 4.2.



Figura. 4.2: ANACONDA no Canal Hidráulico Arnefield S6, e instrumentação de medida e aquisição de dados.

5. Upgrade da instalação experimental do Laboratório

A instalação experimental existente no Laboratório foi alvo de um certo número de operações de manutenção e upgrade, quer do gerador de ondas, quer do sistema de reposição do nível de água no canal hidráulico [5.1]. Estas são em seguida descritas de forma sumária.

5.1 Canal hidráulico do *fluidslab*

O disco de excentricidade variável do gerador de ondas teve que ser modificado, para acomodar a imposição de pequenas amplitudes de oscilação da comporta do gerador, como se pode observar na Fig. 5.1.

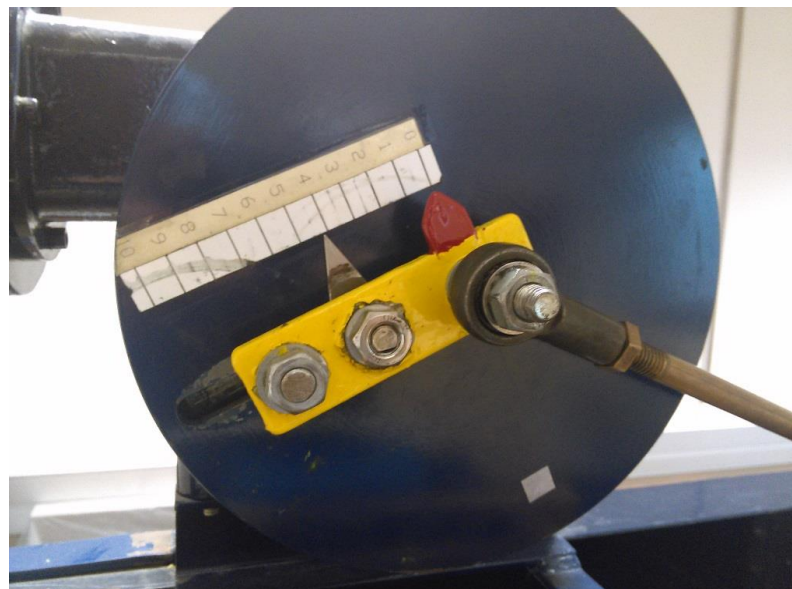


Figura 5.1: Disco de excentricidade variável e mecanismo extensor para pequenas excentricidades.

O disco do gerador de ondas do canal possuía apenas dez excentricidades, das quais só não era possível utilizar as três primeiras, devido a limitações mecânicas do sistema original. A recuperação destas três excentricidades tinha um interesse fundamental para a geração de ondas lineares de muito pequena amplitude, na gama de frequências média e alta. Foi projectado, com a ajuda do Solidworks, um sistema para corrigir esta situação. Devido aos grandes esforços em jogo, este mecanismo possui grande robustez e está dotado de dois apoios que o fixam com solidez ao disco de excentricidade variável. As peças do mecanismo foram inteiramente manufacturadas nas oficinas do DEM, com a ajuda de uma serra de fita e um aparelho de soldar Mig/Mag. O mecanismo encontra-se actualmente a funcionar no gerador de ondas do canal.

Por outro lado, as inevitáveis fugas de água, que são endémicas num canal hidráulico desta geração, exigem uma constante reposição do nível de água durante os ensaios. O melhoramento por nós introduzido consistiu em reutilizar duas pequenas bombas disponíveis no Laboratório, que haviam sido recuperadas por antigos alunos do fluidslab. Estas alimentam um circuito de enchimento com caudal regulável, a partir dos depósitos de água do canal Armefield S6, como mostra a Fig. 5.2. Para apoiar este sistema foi também construída uma mesa de suporte.

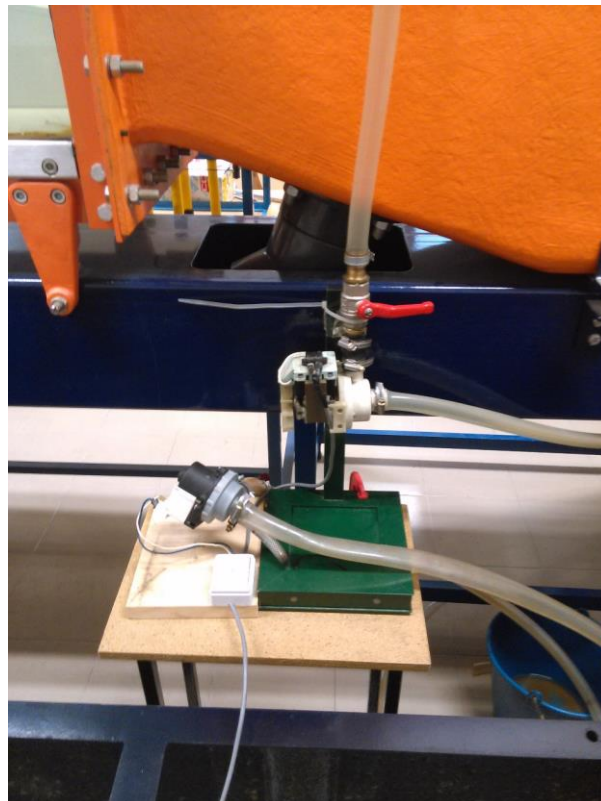


Figura 5.2: Sistema de reposição do nível de água no Canal Hidráulico do Laboratório.

5.2 Sistema de aquisição e processamento de dados

O processamento dos dados da experiência é realizado com um PC ASUS de 64-bit Pentium Dual-Core, CPU E5700 a 3 GHz, com 4 GB RAM. O esquema do sistema de aquisição de dados está representado na Fig. 5.3 e compreende os seguintes componentes. As quatro sondas resistivas para medição de nível são controladas por um monitor da HR-Wallingford com quatro canais. Os sinais analógicos das oscilações do nível da água no canal e dentro da chaminé são convertidos em sinais digitais através de um módulo de aquisição da Keithley K-USB. Estes sinais são em seguida transmitidos por USB para o computador a fim de serem processados e armazenados numa directoria ADC.

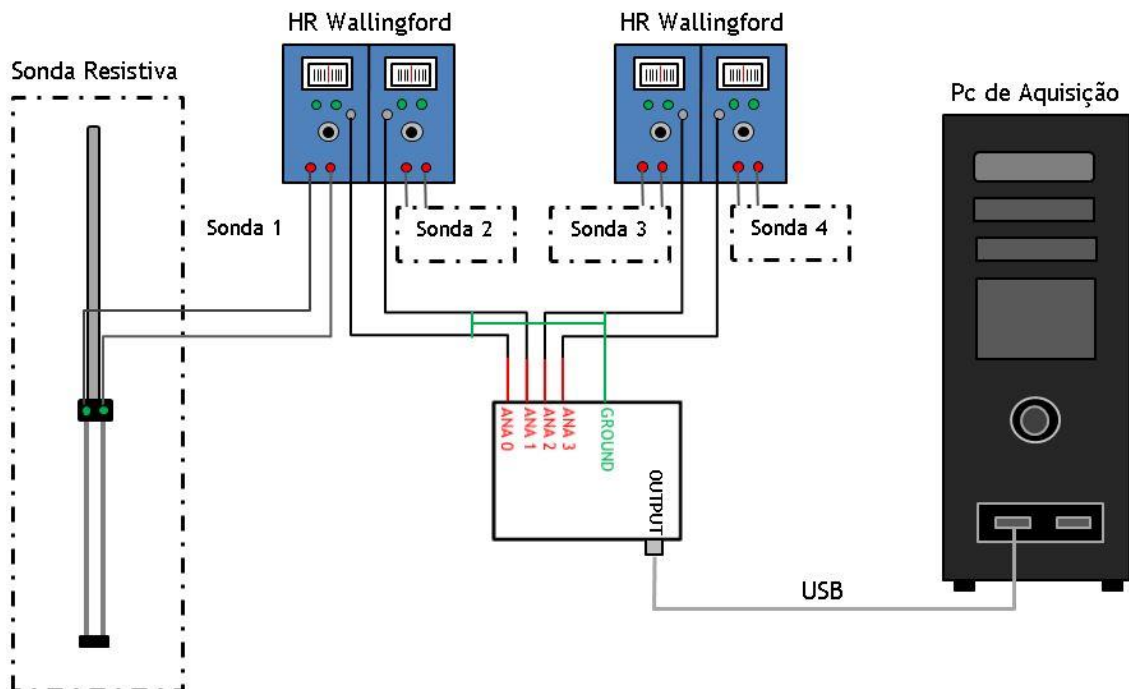


Figura 5.3: Esquema do sistema de aquisição e processamento de dados.

O software de aquisição, controlo da instrumentação e análise dos dados é o TestPoint V7. O Testpoint é uma ferramenta programável utilizada para a gestão de diferentes aplicações de medida. Consegue controlar hardware externo, organizar dados e resultados, elaborar relatórios, fazer gráficos e diagnósticos. A base de dados do programa está disponível na Web, sendo possível fazer o download de diversas interfaces.

Os dados de todos os canais foram registados a 200 Hz, durante 15 segundos. A análise de reflexão das ondas a montante do modelo é realizada de forma redundante pelo sistema HR-WAVES e pelo TestPoint. A apresentação gráfica dos resultados é obtida através de uma impressora HP Laserjet CP1525N.

6. Dinâmica do sistema de extracção de potência

As bases e os conhecimentos teóricos necessários para compreender a hidrodinâmica dos sistemas de aproveitamento da energia das ondas, à luz da Teoria Linear, podem ser aprendidos em Falnes [6.1]. O sistema de extracção de energia que é estudado no presente trabalho consiste numa câmara pneumática, onde oscila uma coluna de água que é excitada pelas ondas incidentes. Este sistema difere substancialmente do sistema OWC clássico, uma vez que o dispositivo possui uma interface entre a coluna de água oscilante e as ondas incidentes, interface esta que é um longo tubo de borracha cheio de água. A vantagem deste novo sistema reside no facto deste tubo contribuir para amplificar as oscilações da coluna-de-água dentro do sistema e, conseqüentemente aumentar substancialmente a pressão que é gerada dentro da câmara pneumática. Esta energia de pressão é precisamente aquela que pode ser convertida em energia mecânica ao veio pela turbina de ar a ser instalada no topo da câmara.

Esta combinação entre o dispositivo ANACONDA e o sistema OWC clássico é uma ideia original, que é desenvolvida em conjunto pela UBI e pela Universidade de Southampton desde 2009 [OMAE].

6.1 Sistema de extracção pneumático

O sistema PTO do dispositivo ANACONDA consiste numa câmara pneumática fabricada em material transparente, a que chama-mos chaminé, ligada à atmosfera através de um orifício calibrado. Esta chaminé, cilíndrica, tem um diâmetro $D = 0,0722\text{m}$ e altura $h_1 = 0,575\text{ m}$, sendo h_1 medido desde a superfície livre da água dentro da chaminé até ao orifício. O topo da chaminé está fechado por uma placa acrílica amovível de 5 mm de espessura, com um orifício de diâmetro d_0 . Após cada série de testes realizados a placa é substituída por outra placa com um orifício de diferente diâmetro. Os diâmetros dos orifícios testados, que impõem uma determinada impedância ao sistema, variam entre 9 mm e 17,2 mm.

Em concordância com aquilo que foi descrito anteriormente a equação da continuidade do sistema, para escoamento incompressível, permite obter a velocidade do ar à saída da câmara:

$$v(t) = \frac{A}{A_0} \frac{dz}{dt} \quad (6.1)$$

e também o caudal volúmico de ar que circula através do orifício é

$$Q = A \frac{dz}{dt} \quad (6.2)$$

Apliquemos em seguida a equação de Bernoulli ao longo de uma linha de corrente entre um ponto dentro da câmara pneumática, onde a pressão é p , e um segundo ponto situado na Vena-contracta, onde a velocidade do escoamento é v . Desprezando a energia potencial do fluido entre estes dois pontos e admitindo que a velocidade do ar dentro da câmara pneumática é muito inferior à velocidade do ar no orifício, uma vez que $\left(\frac{A_0}{A}\right) \ll 1$, a equação assume a seguinte forma:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{p_0}{\rho_0} + \frac{1}{2} \rho v^2 + e_p \quad (6.3)$$

Nesta expressão $p_0 = p_a$, que é a pressão atmosférica (zero, em termos relativos) e e_p é a energia dissipada no orifício:

$$e_p = k \times \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (6.4)$$

Das Eqs 6.3 e 6.4 vem que a velocidade do jacto à saída da câmara vale:

$$v(t) = \pm \frac{1}{\sqrt{1+k}} \sqrt{\frac{2|p(t)|}{\rho}} \quad (6.5)$$

O factor $\frac{1}{\sqrt{1+k}}$ é denominado de coeficiente de velocidade; este coeficiente pondera a resistência local ao escoamento no orifício. Na dedução anterior, foi igualmente admitido que o perfil de velocidades é uniforme na secção da Vena-contracta e que o regime do escoamento é estacionário.

Em consequência, o caudal volúmico de ar que atravessa o orifício da chaminé pode ser expresso através da seguinte fórmula:

$$Q = C_d \left(\frac{\pi d_0^2}{4} \right) \times v(t) \quad (6.6)$$

onde C_d é o chamado coeficiente de descarga: $C_d = \frac{C}{\sqrt{1+k}}$, sendo C um coeficiente de contracção do jacto que sai do orifício, ou seja, a razão entre a área da Vena-contracta e a área do orifício. Substituindo nesta expressão o valor da velocidade v do escoamento (Eq 6.5), o valor do caudal que é descarregado através do orifício de diâmetro d_0 será finalmente:

$$Q = C_d \left(\frac{\pi d_0^2}{4} \right) \sqrt{\frac{2|p(t)|}{\rho}} \quad (6.7)$$

O valor do coeficiente de descarga C_d é um parâmetro empírico que deverá ser estimado de forma criteriosa antes da realização das experiências. Um valor razoável, que é aconselhado na literatura corrente para um orifício numa placa de pequena espessura, é $C_d = 0,6$.

Por último, a relação entre a queda de pressão e o caudal para o presente sistema PTO é bem conhecida e pode ser descrita do seguinte modo:

$$\Delta p = KQ^2 \quad (6.8)$$

sendo $\Delta p = p - p_0$ a pressão diferencial na câmara pneumática e $K = \frac{8\rho}{C_d^2 \pi^2 d_0^4}$. Para um

valor de pressão barométrica $p_a = 941$ mba, que é típico da região onde foram realizados os ensaios experimentais, situada a cerca de 750 m de altitude, encontramos um valor de massa volúmica do ar $\rho = 1,138$ kg/m³ à temperatura $T = 15$ C. Deste modo obtém-se

então $K = 2,56 d_0^{-4}$. Para que se pudesse obter um valor da característica K do orifício mais exacto, teria sido necessário efectuar a calibração do mesmo em Túnel de Vento, o que não foi realizado até ao momento.

6.2 Funcionamento e sintonização do dispositivo

À escala do modelo ensaiado, as condições oceânicas modeladas compreendem ondas com um período de $T=0,8$ a 1 s ($f=1,0$ a $1,25$ Hz). Estas condições correspondem no canal a comprimentos de onda λ entre $0,99$ e $1,56$ m, em águas profundas. O modelo do tubo de borracha tem um diâmetro de $0,07$ m aproximadamente, reproduzido à escala de $1:100$. Quanto ao comprimento real do tubo, ainda não existem dados concretos sobre os quais possamos fundamentar o nosso raciocínio. A espessura e diâmetro do tubo de borracha, por seu lado, cumprem os requisitos necessários para a sintonização do sistema às ondas dominantes.

A velocidade da onda de pressão no interior do tubo, na ausência de histerese, é dada por

$U = \frac{1}{\sqrt{\rho D}}$, onde ρ é a massa volúmica da água e D é a distensibilidade do tubo. Para um

tubo de diâmetro d e espessura de parede w , $D = d/(wE)$; E é o módulo de Young, que é aproximadamente igual a $0,91$ MPa para latex a 100% de taxa de deformação. A velocidade da onda de pressão no interior da ANACONDA é então dada pela expressão:

$$U = \sqrt{\frac{wE}{\rho d}} \quad (6.9)$$

Pode ser demonstrado que a sintonização do sistema ocorre quando a velocidade da onda no tubo distensível é sensivelmente igual à celeridade das ondas no canal: $U = c$. Para isto acontecer a espessura do tubo tem de ser $w = \rho E^{-1} c^2 d$, onde $c = g \omega^{-1} \tanh(k_L h)$ é a velocidade de fase das ondas gravíticas para uma profundidade h . Em águas profundas ($h > 0,5 \lambda$), podemos conseguir uma boa sintonização para $f=1$ Hz ($T=10$ s à escala real) fabricando um tubo com uma espessura da ordem de $0,1$ mm. Na realidade o nosso modelo foi feito a partir de uma folha de látex disponível no mercado, cuja espessura é $w=0,16$ mm. Neste tubo, uma vez pressurizado com água até atingir um diâmetro de $0,0783$ m, a velocidade da onda de pressão esperada é $U = 1,36$ m/s. Então, a frequência de

sintonização do nosso modelo no canal está possivelmente compreendida entre as seguintes frequências de onda incidente: $f=0,9$ a $1,1$ Hz.

O cotovelo e a chaminé garantem portanto a pressurização do tubo de borracha e, para além disso, actuam como uma interface eficiente com o PTO pneumático. Ao bombear mais água para a chaminé, ou ao esvaziá-la, pode-se facilmente sintonizar o sistema para uma extensa gama de frequências. Em águas profundas, onde $c = g\omega^{-1}$, a sintonização do tubo flexível irá ocorrer para um período:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{wE}{\rho g^2 d}} \quad (6.10)$$

O nosso tubo entra em sintonia com a onda incidente para um período de onda de $0,87$ s ($1,15$ Hz de frequência).

Consideremos em seguida o nosso sistema PTO composto pelo cotovelo rígido em PVC, a chaminé e respectivo obturador. Dentro da chaminé existe uma coluna-de-água que executa oscilações harmónicas na frequência de excitação das ondas de superfície incidentes. Admitamos que a frequência angular natural não-amortecida do sistema é ω_0 . É sabido que a massa de água m do sistema, sem o tubo de borracha em posição e com a chaminé aberta à atmosfera, oscila verticalmente com um período natural igual a $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{s}}$, sendo $m = \rho \times S l$ a massa de uma coluna-de-água com comprimento l e $s = \rho \times g S$; este último parâmetro traduz a rigidez hidrostática do sistema. Neste caso a frequência natural da coluna-de-água oscilante é simplesmente:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (6.11)$$

No sistema real esta frequência pode efectivamente ser controlada através da altura manométrica h_0

O sistema entra em ressonância quando a frequência das ondas incidentes ω for igual a ω_0 , nomeadamente quando $l = \frac{\lambda}{2\pi}$. No caso do nosso dispositivo protótipo, que funciona com ondas de 8 a 10 s no Atlântico Norte, o comprimento do pistão líquido tem de estar

compreendido entre 16 e 25 m. Vale a pena mencionar que uma grande parte deste comprimento diz respeito ao cotovelo rígido submerso. À escala do modelo físico (1:100) isto traduz-se num comprimento de aproximadamente $l=16$ a 25 cm. Na presente experiência, a coluna-de-água é mais precisamente 15,2 cm, o que implica que $f_0=1,28$ Hz, como esperado.

Se em seguida conectarmos a ANACONDA ao sistema, o tubo de borracha irá excitar as oscilações da coluna-de-água na chaminé através de impulsos de pressão que são exercidos na secção S à entrada do cotovelo. Contudo, a sintonização da ANACONDA às ondas incidentes ocorre quando a celeridade das ondas iguala a velocidade dos impulsos de pressão que viajam no interior do tubo de borracha.

Em conclusão, o período de onda para sintonizar o tubo, que é de $T_0=0,87$ s (1,15 Hz de frequência), não se encontra muito perto das condições de ressonância da coluna-de-água dentro da chaminé, que ocorrem para 0,78 s ($f_0=1,28$ Hz). Uma estratégia intuitiva para modificar este valor consiste em controlar o diâmetro do tubo d por meio da sua pressurização hidrostática, o que é conseguido através da altura piezométrica h_0 (ver Fig. 4.1).

6.3 Condições impostas durante os ensaios

O modelo foi em primeiro lugar testado com a chaminé completamente desobstruída, de modo a obter a frequência natural do sistema. A frequência própria da coluna de água oscilante ronda os 1,4 Hz. Em seguida o modelo foi ensaiado em ondas regulares com o topo da chaminé obturado com orifícios de diferentes diâmetros. A velocidade de propagação da onda de pressão no tubo é de aproximadamente 1,25 m/s, valor que está na gama de celeridades das ondas geradas em águas restritas no canal. Logo, a frequência de sintonização do tubo de borracha pressurizado é de 1,2 Hz.

Os ensaios realizados cobrem uma gama de alturas de onda $H=0,12$ a 4,16 cm e frequências $f=0,57$ a 1,8 Hz. Os períodos das ondas no canal variam entre $T=0,56$ e 1,76 s, a que correspondem comprimentos de onda $\lambda=0,50$ a 2,93 m numa profundidade de 33,4 cm. À escala real estas condições correspondem a ondas até 4,16 m e 6 a 18 s de período ($\lambda=50$ a 293 m). No total foram geradas 252 ondas por cada orifício do sistema de extracção testado, 30 a 40% delas lineares.

6.4 Potência e rendimento do sistema implementado

Se $p(t)$ for a pressão diferencial na câmara pneumática do sistema, então a taxa de trabalho instantâneo realizado será dada pelo produto das forças de pressão na interface ar-água da chaminé, $p(t) \times A$, e a velocidade de oscilação da coluna-de-água $\frac{dz}{dt}$. Consequentemente, a potência instantânea extraída pelo sistema é simplesmente dada pelo produto entre as flutuações de pressão $p(t)$ na câmara e o caudal volúmico de ar Q através do orifício.

A potência média extraída pelo PTO do sistema, em cada ciclo de trabalho de período T , será então dada por:

$$P = \overline{p(t) \cdot Q(t)} \quad (6.12)$$

Considerando em seguida oscilações harmónicas em $e^{i\omega t}$, de amplitudes complexas \hat{p} , \hat{Q} e \hat{z} , obtêm-se após integração:

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\hat{p} \cdot \hat{Q}^*) \quad (6.13)$$

Atendendo ao que foi dito anteriormente (Eq 6.8), a pressão de ar na câmara é dada por: $\hat{p} = K \hat{Q}^2$, onde K é a característica do orifício. A potência média (temporal) capturada pela ANACONDA pode então ser determinada a partir das medições das oscilações da água $z(t)$ na chaminé:

$$P = \frac{K}{2} |\hat{Q}|^2 \operatorname{Re}(\hat{Q}) \quad (6.14)$$

com $\hat{Q} = A(i\omega) \hat{z}$.

Uma vez calculada a potência extraída pelo sistema, podemos efectuar uma estimativa objectiva do rendimento do dispositivo através da seguinte expressão:

$$\eta = \frac{P}{P_i b} \quad (6.15)$$

Sendo P a potência média extraída, b a largura do canal e P_i o fluxo médio de energia das ondas incidentes, em águas de profundidade finita h , tomada por unidade de crista de onda. Esta potência incidente está normalmente disponível nos Atlas de Energia das Ondas [T. Pontes] para diferentes regiões do Globo, como já referimos anteriormente. A expressão mais geral é a seguinte:

$$P_i = \frac{\rho g H^2 \lambda}{8T} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2k_L h}{\sinh(2k_L h)} \right) \quad (6.16)$$

Nesta expressão H é a altura de onda, λ é o comprimento de onda, T é o período e k_L é o Número de Onda. Os parâmetros P e η estão associados ao desempenho geral do sistema e serão complementados a seguir.

Um balanço de energia dos campos de ondas reflectidas e transmitidas no canal poderá fornecer uma estimativa do rendimento de absorção da potência da onda incidente. Em termos de coeficientes de reflexão R e de transmissão T_R obtém-se, para o rendimento de absorção do dispositivo:

$$E = 1 - R^2 - T_R^2 \quad (6.17)$$

Uma parte da energia absorvida é na realidade dissipada sob a forma de perdas no tubo, chaminé e paredes do canal.

Em concordância com a literatura corrente sobre este assunto, é usual fazer uma estimativa objectiva da potência extraída pelo dispositivo com base na definição de um comprimento de captura W , definido em termos de diâmetros do tubo d :

$$W = \frac{P}{P_i d} \quad (6.18)$$

Esta abordagem é mais utilizada nos dispositivos WEC funcionando em 3D, dada a dificuldade em realizar o balanço de energia para esses casos.

7. Apresentação e discussão dos resultados dos ensaios realizados

Este capítulo apresenta os resultados experimentais que foram obtidos a partir dos ensaios realizados com o segundo tubo de borracha construído no Laboratório (Tubo azul: $L = 0,904$ m). Realizaram-se duas séries de ensaios, para os quais o tubo foi cheio de água e dilatado para diâmetros $d = 95,8$ mm e $97,8$ mm, respectivamente. O modelo físico representa um dispositivo real flutuante (sem pilar de apoio) à escala 1:100, funcionando em águas intermédias e profundas. O sistema de extracção de energia é o sistema pneumático com turbina de ar que foi anteriormente descrito. Este modelo da ANACONDA foi ensaiado em ondas regulares no Canal Hidráulico Armfield S6 do fluidslab. A nossa atenção irá centrar-se no factor de amplificação das oscilações da coluna-de-água na chaminé, na potência extraída pelo sistema e no comprimento da frente de captura de energia.

A turbina do sistema real é modelada por meio de um orifício calibrado. Os resultados apresentados a seguir dizem respeito a um dos melhores orifícios do sistema de extracção de energia, com diâmetro igual a 9 mm. Para os restantes diâmetros d_0 ensaiados o comportamento é semelhante. Os resultados foram agrupados por classes de alturas de onda H entre 1,0 e 41,6 mm.

As Figs. 7.1, 7.2 e 7.3 dizem respeito aos ensaios da Série 1, para os quais o diâmetro do tubo é $d = 95,8$ mm. O factor de amplificação ζ , que é a razão entre a amplitude das oscilações da água dentro da chaminé e a amplitude da onda incidente, está representado na Fig. 7.1 em função da frequência f das ondas incidentes. Para ondas de período igual a 0,9 s e alturas H entre 1,2 e 5,1 mm, o factor de amplificação ζ é máximo, sendo a amplitude de oscilação da água dentro da chaminé igual a cerca de 5,5 vezes superior à amplitude da onda incidente. Como se verá mais adiante (Fig. 7.2) esta situação não corresponde à potência máxima extraída pelo sistema, contrariamente ao que poderíamos pensar. Pelo contrário, a potência extraída é praticamente nula, funcionando o sistema em regime de ressonância não amortecida. Ainda neste período de sintonização do tubo a situação em que o sistema tem menor oscilação, a que correspondem alturas de onda $H = 10,5$ a $41,6$ mm, corresponde precisamente à maior extracção de potência pelo sistema (Fig. 7.2). Estas condições traduzem-se no protótipo em períodos $T = 9$ s e ondas de altura $H = 1,5$ a $4,16$ m. O factor

de amplificação do sistema é sensivelmente 2,8, ou seja, as oscilações no sistema não ultrapassam 3 vezes a oscilação da superfície livre exterior.

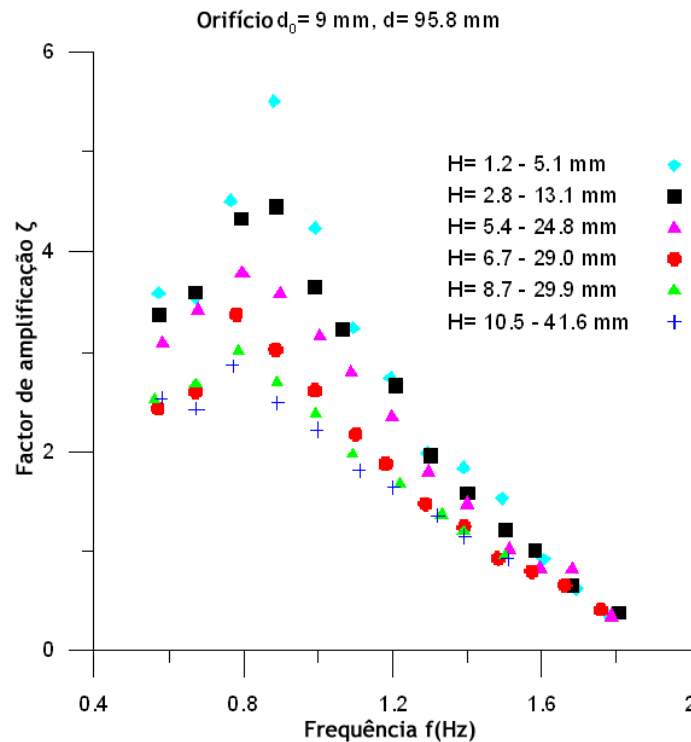


Figura 7.1: Factor de amplificação ζ versus frequência f , para diferentes alturas de onda H (Série 1).

A potência média extraída das ondas ao longo de um período, P , está representada na Fig. 7.2, em função da frequência f das ondas incidentes. A potência máxima extraída pelo dispositivo é de 0,78 W, para ondas de 0,9 s de período e 3,18 cm de altura. Surge em geral um primeiro pico, pronunciado, para uma frequência entre 1,1 e 1,2 Hz, que ocorre sempre nesta frequência independentemente da altura das ondas (período à volta de 0,85 s). Esta é a frequência de sintonização do tubo da ANACONDA. Em condições reais isto acontece em águas intermédias com 33,4 m de profundidade, para ondas de 119 m de comprimento e 3,2 m de altura. A potência recolhida pelo dispositivo diminui drasticamente para ondas mais baixas, como seria de esperar. Um segundo pico de potência extraída ocorre para 1,4 Hz, isto é, para períodos de onda de 0,7 s, que atinge mais ou menos 50-70% do primeiro pico. Estas condições correspondem aproximadamente a ondas de 7 segundos no mar, ou seja, comprimentos de onda à volta dos 80 m. Esta zona coincide com a ressonância da coluna-de-água oscilante do dispositivo.

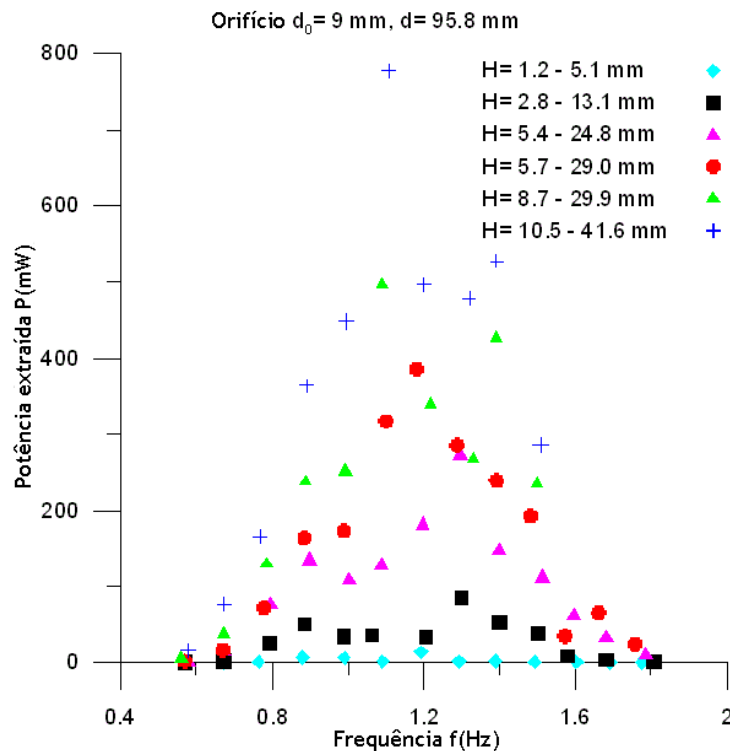


Figura 7.2: Potência extraída P versus frequência f , para diferentes alturas de onda H (Série 1).

O rendimento da máquina, expresso em termos de comprimento de captura W referido ao diâmetro do tubo da ANACONDA, está representado na Fig. 7.3 em função da frequência f das ondas incidentes. Podemos observar que o comprimento de captura máximo varia entre 2,0 e 2,25 diâmetros, para frequências de 1,1 a 1,2 Hz e uma altura de onda até 2,79 cm. Em termos do protótipo, cujo tubo tem 7 m de diâmetro, este pode atingir 15,8 m de frente de captura em ondas de 8 a 9 segundos de período e 104 a 122 m de comprimento, com alturas que variam até 2,8 m. Nas frequências mais baixas o rendimento não é grandemente afectado pela altura das ondas, ao contrário do que acontece nas frequências acima dos 0,8 Hz. O comprimento de captura tem na realidade dois picos, relativamente próximos, cujos valores variam entre 1,5 e 2,25 diâmetros, localizados entre 0,9 e 1,2 Hz. Existe igualmente um patamar de rendimento que oscila entre 0,75 e 2,0, em termos de comprimento de captura, para frequências entre 1,3 e 1,5 Hz. Estes valores são estreitamente dependentes da altura das ondas.

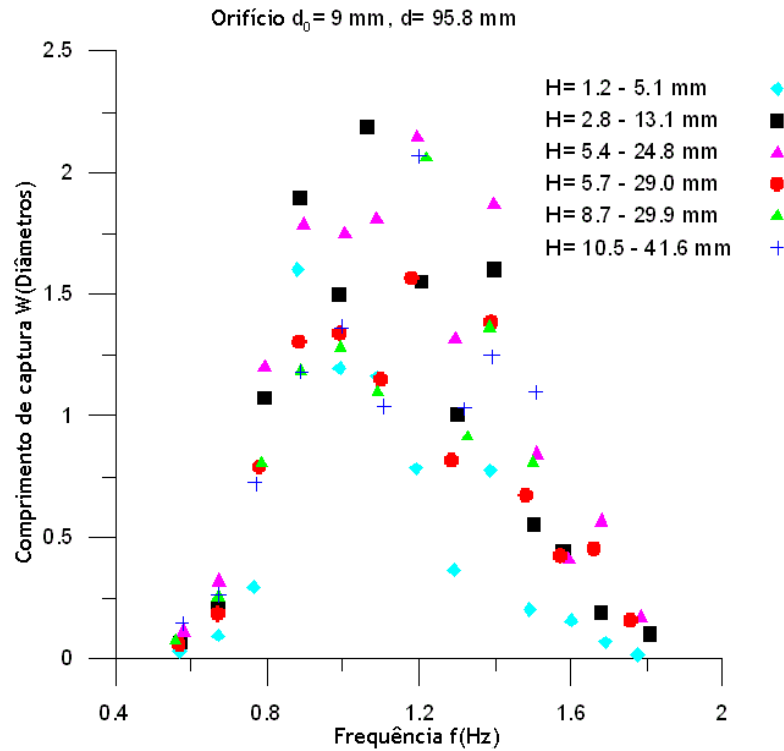


Figura 7.3: Comprimento de captura W versus frequência f , para diferentes alturas de onda H (Série 1).

As Figs. 7.4, 7.5 e 7.6 dizem respeito aos ensaios da Série 2, para os quais o diâmetro do tubo é $d=97,8 \text{ mm}$. A frequência de sintonização do tubo é neste caso $f = 0,89 \text{ Hz}$ ($T = 1,12 \text{ s}$). Na Fig. 7.4 está representado o factor de amplificação para esta segunda série de ensaios, em função da frequência das ondas incidentes. Para ondas de período igual a $0,91 \text{ s}$ e alturas H entre $1,0$ e $4,7 \text{ mm}$, o factor de amplificação ζ é máximo, sendo a amplitude de oscilação da água dentro da chaminé ligeiramente inferior á da Série 1, mas ainda assim acima de 5 vezes a amplitude da onda incidente. Também neste caso, esta situação não corresponde á potência máxima extraída pelo sistema. A potência extraída é praticamente nula (Fig. 7.5). Ainda neste período de sintonização do tubo, a situação em que o sistema tem menor oscilação corresponde á maior extracção de potência pelo sistema (Fig. 7.5), com alturas de onda H entre $11,0 \text{ m}$ e $41,6 \text{ mm}$. Estas condições correspondem no protótipo a períodos $T = 9,1 \text{ s}$ e ondas de altura H entre $1,1 \text{ m}$ e $4,2 \text{ m}$. O factor de amplificação do sistema é neste caso de aproximadamente 2,6.

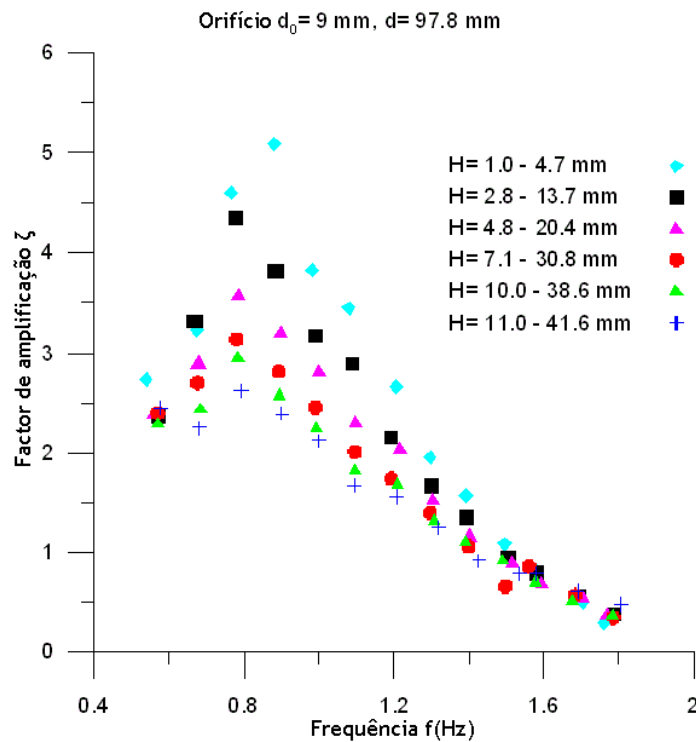


Figura 7.4: Factor de amplificação ζ versus frequência f , para diferentes alturas de onda H (Série 2).

A Fig. 7.5 mostra a evolução da potência média extraída pelo dispositivo nestes ensaios, em função de f . A potência máxima extraída pelo dispositivo é de 0,748 W, para ondas de 0,91 s de período e 3,44 cm de altura. Surge um primeiro pico, elevado, para a frequência de 1,1 Hz, que é independente da altura das ondas. Isto ocorre em águas de profundidade intermédia, para ondas de 122 m de comprimento e 3,44 m de altura em condições reais, onde a profundidade do mar é $h = 33,4 \text{ m}$. A energia extraída pelo dispositivo decresce consideravelmente com a altura das ondas, como seria de esperar. Isto deve-se, possivelmente, aos efeitos não-lineares associados á interacção do sistema com as ondas incidentes. Um segundo pico de potência extraída ocorre entre 1,2 e 1,6 Hz (Períodos de 0,63 a 0,83 s), que atinge aproximadamente 50 a 90% do valor do primeiro pico. Estas últimas condições correspondem a ondas de cerca de 7 segundos em condições de mar real, isto é ondas de comprimento de onda $\lambda = 62 - 102 \text{ m}$, que são mais ou menos as condições de ressonância da coluna-de-água dentro da chaminé.

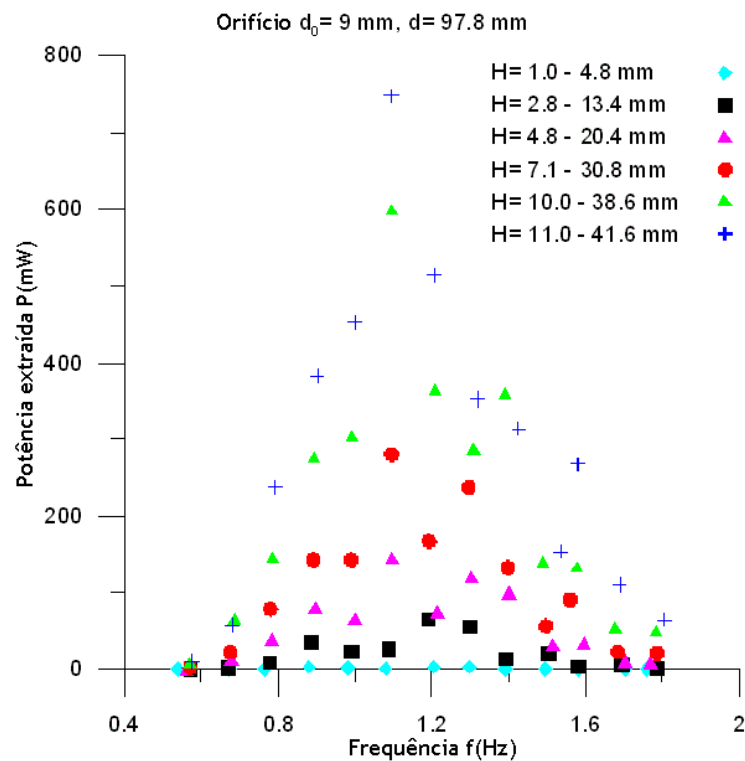


Figura 7.5: Potência extraída P versus frequência f , para diferentes alturas de onda H (Série 2).

Na Fig. 7.6 optámos por apresentar o rendimento de captura de energia para esta segunda Série de ensaios, parâmetro que é em tudo semelhante ao comprimento de captura. Trata-se do quociente entre a energia extraída pelo dispositivo e a energia das ondas incidentes a toda a largura do canal. Como se pode observar, para baixas frequências o rendimento de absorção não é grandemente influenciado pela altura das ondas, em oposição ao que acontece com ondas de frequência acima de 0,9 Hz. Os resultados mostram dois picos de rendimento muito próximos, para 0,9 e 1,2 Hz respectivamente. Os valores destes rendimentos dependem da altura de onda. Para frequências abaixo de 0,6 Hz e acima de 1,8 Hz poderá haver um novo pico de elevado rendimento. Neste caso o rendimento máximo obtido é de 0,54, para ondas de 1,2 Hz de frequência e 30 mm de altura de onda. Esta não é a frequência que corresponde ao valor máximo da potência total absorvida pelo dispositivo.

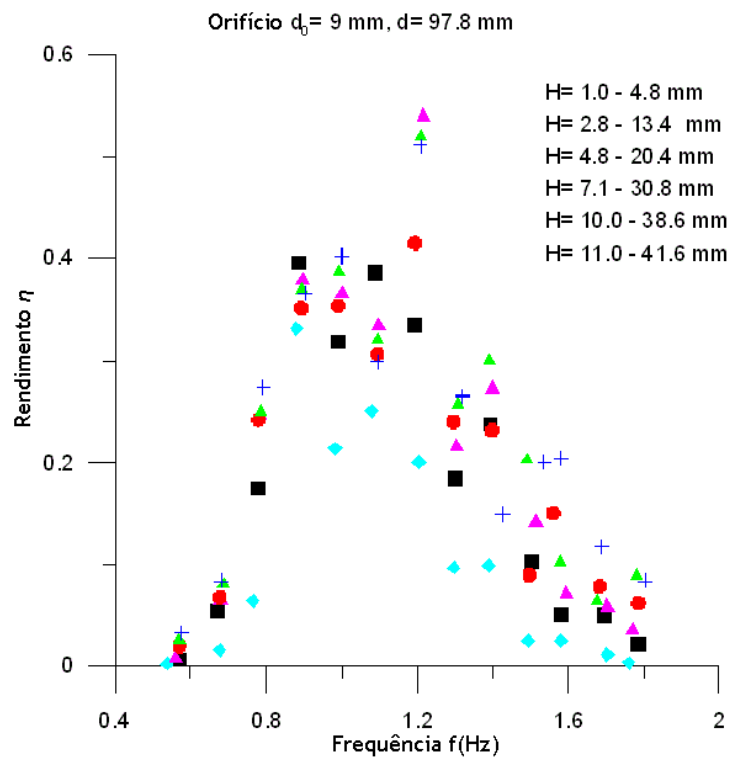


Figura 7.6: Rendimento de captura η versus frequência f , para diferentes alturas de onda H (Série 2).

8. Conclusão

Contrariamente ao que sucede com a Energia Eólica, no campo do aproveitamento da Energia das Ondas estão a ser desenvolvidos muitos sistemas em simultâneo, cujos promotores competem entre si, sem contudo possuírem uma visão clara e objectiva do enquadramento e reais capacidades dos respectivos dispositivos. Neste contexto os Estados e a União Europeia despendem verbas consideráveis para financiar um conjunto de programas descoordenados, alguns deles sem viabilidade económica evidente.

Neste cenário, o presente trabalho incide no estudo experimental de um dispositivo de recuperação de energia das ondas de última geração, que possui qualidades promissoras, demonstradas no decurso de um longo programa de investigação internacional, concertado entre diferentes instituições públicas e privadas: o dispositivo ANACONDA. Este dispositivo foi anteriormente ensaiado no Denish Hydraulics Institute e na Universidade de Solent (Southampton), entre outras. O promotor era a *Maritime Energy Developments*, apoiada pela AVON Engineering Ltd., UK. O presente estudo foi realizado no *fluidslab*, o Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Turbomáquinas da Universidade da Beira Interior, no quadro de um projecto institucional cofinanciado pela *FCT* e pela União Europeia.

O dispositivo de energia das ondas ANACONDA é um sistema simples e barato. O sistema utiliza uma tecnologia de conversão bem estudada, do tipo turbina de ar. O elemento principal do dispositivo, que estabelece a interface com as ondas de superfície incidentes, é um tubo de borracha suficientemente longo. As pulsações que as ondas do mar induzem no interior do tubo permitem activar todo o sistema de conversão e extracção de potência, sendo o PTO um sistema pneumático em tudo semelhante ao do sistema *OWC*.

O ensaio do dispositivo foi conduzido em modelo reduzido no Canal Hidráulico *Armfield S6*, tirando proveito do moderno sistema de aquisição e processamento de dados que foi implementado no Laboratório, na sequência de um *upgrade* do equipamento experimental.

Antes do início dos trabalhos procedemos ainda ao melhoramento do sistema de bombagem, para reposição automática do nível de água no canal. Num segundo tempo foi projectado, fabricado e instalado um mecanismo extensor da excentricidade do gerador de ondas, a fim de cobrir uma gama alargada de frequências das ondas geradas no canal. Concluída esta etapa passámos à fase de planeamento e execução do modelo físico, cuja realização e monitorização ocupou grande parte do tempo que havia sido inicialmente previsto para as

tarefas experimentais. Estas tiveram início com a calibração do canal e do equipamento de medida.

O nosso estudo experimental, conduzido em modelo à escala 1:100, faz uma análise do desempenho do dispositivo quando este funciona com o tubo flutuando livremente face às ondas regulares incidentes. No modelo físico do dispositivo o sistema de extracção de potência é simulado por meio de um orifício calibrado, através do qual a câmara pneumática do sistema comunica com a atmosfera. Este modelo do sistema PTO reproduz de maneira aceitável a característica da turbina do sistema real, dado que a máquina tem, em boa verdade, uma curva de funcionamento não-linear. Assumimos contudo que a impedância do sistema é constante e independente da pressão na câmara pneumática, o que é também razoável se as variações da pressão na câmara não forem muito elevadas. Desprezamos finalmente os efeitos de compressibilidade do ar na câmara.

De acordo com as observações experimentais, o dispositivo ANACONDA revela-se eficaz para extrair energia das ondas quando acoplado a um sistema PTO pneumático, desde que o sistema esteja devidamente sintonizado para o estado de mar em que opera. Estima-se que o rendimento médio do dispositivo se situe acima de 0,4, para uma gama alargada de frequências das ondas entre 0,9 e 1,6 Hz, em condições de funcionamento reais (não-lineares). Contudo, em condições ideais, de funcionamento próximo do linear, já foram reportados rendimentos acima deste valor na literatura corrente. Em definitivo, isto deixa supor que a razão pressão-caudal do PTO ainda possa ser otimizada.

Na gama de frequências entre 0,8 e 1,1 Hz o comportamento do sistema observado é o que seria de esperar. Na ressonância, contudo, verificamos que a respiração do PTO é assimétrica, isto é, a aspiração da chaminé é mais funda que a expiração. Para frequências acima de 1,1 Hz observam-se efeitos de difracção das ondas em redor do tubo da Anaconda e os efeitos de “blocagem” daí resultantes.

O comprimento da frente de captura de energia estimada, para este dispositivo, situa-se entre 1,0 e 2,25 diâmetros (do tubo), numa larga gama de frequências que variam sensivelmente entre 0,8 e 1,5 Hz. Extrapolando para o real, em termos médios o protótipo deverá conseguir extrair pelo menos 1,5 MW por frente de onda, em condições de ressonância, desde que correctamente sintonizado para ondas de 8 a 11 segundos. Esta é a gama de períodos típicos da ondulação do Atlântico Norte. Para períodos abaixo dos 8 s, por outro lado, os efeitos de difracção parecem afectar significativamente o desempenho do dispositivo.

Pensamos que o efeito de constrição do modelo, que é introduzido pelo facto da secção do canal não ser mais larga e mais profunda, pode ter conduzido a uma estimativa por excesso do rendimento do dispositivo. Por outro lado, na gama de frequências entre 0,5 e 0,8 Hz a ANACONDA exhibe um movimento de “cavalgamento” das ondas, o que curiosamente parece

favorecer a captura de energia. É conveniente notar que a impedância do sistema de extracção ainda pode ser recondicionada, se necessário.

Na sequência deste estudo é igualmente possível ter uma ideia da energia que é dissipada por histeresis no tubo de borracha. A percentagem de energia perdida por este efeito é na realidade desprezável. A ocorrência de aneurismas no tubo de borracha tem também sido uma constatação evidente durante os ensaios laboratoriais. Este fenómeno é uma importante limitação do sistema, o que exige uma procura de novos materiais distensíveis para substituir ou reforçar o Látex. Existem diferentes métodos para remediar esta ocorrência. Este ponto ainda está em aberto, apesar das várias tentativas realizadas por diferentes investigadores com este objectivo. As causas dos aneurismas do tubo e as formas de os prevenir não foram investigadas ao longo do presente trabalho.

A ancoragem do nariz da ANACONDA ao fundo do mar, tarefa que é absolutamente necessária, muito em particular no protótipo, será um dos pontos mais desafiantes no que diz respeito à hidrodinâmica do dispositivo real. Este ponto também está em aberto. De futuro é importante começar a pensar em testar um modelo físico maior, por forma a pôr em evidência possíveis efeitos de escala na estimativa da performance do dispositivo.

Convém por fim referir que este trabalho de investigação foi realizado no âmbito do Projecto PTDC/EME-MFE/111763/2011-16, co-financiado pela FCT e pela União Europeia ao abrigo do Programa Operacional Factores de Competitividade COMPETE. Neste contexto foi também criada uma página Web de divulgação das actividades de I&D realizadas (<http://fluidslab.ubi.pt>).

Referências bibliográficas

- [1.1] G. Boyle (2004): Renewable Energy, Oxford University Press, Oxford.
- [1.2] A. M. Cornett (2008): A Global Wave Energy Resource Assessment, Paper ISOPE-2008-579, Proc. 18th International Offshore and Polar Engineering Conference, 9 pp., Vancouver.
- [1.3] M. T. Pontes (2009): Assessing the Wave Energy Resource Using Remote Sensed Data, Proc. 8th European Wave and Tidal Energy Conference, p. 106-111, Upsala.
- [1.4] M. Folley, T.J.T. Whittaker (2009): Analysis of the Nearshore Wave Energy Resource, J. Renewable Energy, Vol. 34, 7, p. 1709-1715.
- [1.5] G. Mork, S. Barstow, A. Kabuth, M. T. Pontes (2010): Assessing The Global Wave Energy Potential, Paper OMAE2010-20473, Proc. 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 8 pp., Shanghai.
- [1.6] Observatório Tecnológico para as Energias Offshore (2014): Offshore Renewable Energy, Current Status - Future Perspectives for Portugal, Eds. A. Sarmiento et al., OTEO - INEGI, Porto.
- [1.7] M. E. McCormick (1981): Ocean Wave Energy Conversion, John Wiley & Sons Inc., New York.
- [1.8] S. Salter (1974): Wave Power, Nature, Vol. 249, p. 720-724.
- [1.9] K. Budar, J. Falnes (1975): A Resonant Point Absorber of Ocean-Wave Power, Nature, Vol. 256, p. 478-479.
- [1.10] D. V. Evans, A. F. de O. Falcão, Eds. (1985): Hydrodynamics of Ocean Wave Energy Utilization, Proc. IUTAM Symposium, Lisbon.
- [1.11] A. F. O. Falcão (2014): Modelling of Wave Energy Conversion, 38 pp., Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [1.12] J. Falnes (2014): Ocean-Wave Energy, Introductory lectures, 13-16 October, Energy Og Miljøfysikk-TFY4300 (Energy and Environmental Physics).
- [1.13] V. Diego, M. Lucia, F. P. Bak (2007): Spatial Distribution of Wave Pressures on Seawave Slot-cone Generator, Coastal Structures '07, International Conference : 2-4 July, Venice, Italy.
- [2.1] A. F. O. Falcão (2010): Wave Energy Utilization - A Review of the Technologies, J. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, 3, p. 899-918.
- [2.2] Y. You, S. Sheng, B. Wu, Y. He (2015): Wave Energy Technology in China, Philosophical Transactions of The Royal Society, Vol. A 370, p. 472-480.
- [2.3] J. Joubert, J. Niekerk, J. Reinecke, I. Meyer (2013): Wave Energy Converters (WECs), Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies, pp 1-96, Matieland, South Africa.

- [2.4] R. Waters (2008): Energy from Ocean Waves - Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter, Doctoral Thesis, Faculty of Science and Technology, Uppsala University.
- [3.1] A. Brito e Melo (2008): Zona Piloto Portuguesa para a Energia das Ondas, Seminário do WAVEC sobre Energias Renováveis Marinhas em Portugal, Estado da Tecnologia e Perspectivas do Mercado, Fundação EDP, 24 de Novembro.
- [4.1] F. J. M. Farley, R. C. T. Rainey (2006): Radical Design Options for Wave-Profiling Wave Energy Converters, Proc. 21st International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 4 pp., Loughborough.
- [4.2] J. R. Chaplin, F. J. M. Farley, M. E. Prentice, R. C. T. Rainey, S. J. Rimmer, A. T. Roach (2007): Development of the ANACONDA all-rubber WEC, Proc. 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Ed. A. F. Falcão et al., 13 pp., Porto.
- [4.3] J. R. Chaplin, F. J. M. Farley, G. E. Hearn, V. Heller, A. Mendes (2010): Hydrodynamic Performance of the ANACONDA Wavepower Device, Hydralab III Closing Event, Stakeholder Dissemination Meeting, Hannover.
- [4.4] F. J. M. Farley, R. C. T. Rainey, J. R. Chaplin (2012): Rubber Tubes in the Sea, Philosophical Transactions of The Royal Society, Vol. A 370, p. 381-402.
- [4.5] A. C. Mendes, L. M. A. Paredes, F. A. S. Gil, J. R. Chaplin (2014): Small-Scale Model Tests of a Rubber-Tube Wave Energy Converter with Pneumatic Power Take-Off, Paper OMAE2014-23452, Proc. 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 10 pp., San Francisco.
- [4.6] A. C. Mendes, L. M. A. Paredes, F. A. S. Gil, M. L. Aguiar (2014): O Dispositivo de Recuperação de Energia das Ondas ANACONDA - Ensaios Experimentais em Modelo Reduzido, Proc. V Conferência Nacional de Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia, 5 pp., Porto.
- [4.7] A. C. Mendes, L. M. A. Paredes, F. A. S. Gil (2014): The ANACONDA Wave Power System - Experimental Tests in Wave Flume, Proc. 2nd International Conference on Advanced Technology & Sciences, 6 pp., Antalya.
- [5.1] L. M. A. Paredes (2013): Canal Hidráulico - Upgrade do Gerador de Ondas, Análise de Reflexão e Calibração, relatório elaborado no âmbito do Projecto PTDC/EME-MFE/111763, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- [6.1] J. Falnes (2005): Ocean Waves and Oscillating Systems - Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction, Cambridge University Press, Cambridge.

Lista de *Websites* consultados

- [1-A] <https://www.eng.ed.ac.uk/research/themes/offshore-renewable-energy>.
- [2-A] <http://www.panoramio.com/photo/64544574>.
- [3-A] <https://www.kvaerner.com/toolsmenu/Media/Press-releases/2011/Aker-Solutions-announces-name-for-new-EPC-company-Kvarner/>
- [4-A] <http://montaraventures.com/energy/?cat=5&paged=2>
- [5-A] <http://www.domsweb.org/ecolo/dessaler.php>
- [6-A] <http://www.dailykos.com/story/2008/12/5/669590/>
- [7-A] <http://www.waveenergy.dk/files/hanstholmfase2B>
- [8-A] <http://www.nordicgreen.net/startups/wavehydro/sewave-ltd>
- [9-A] <http://coastalenergyandenvironment.web.unc.edu/ocean-energy-generating-technologies/wave-energy/anaconda-wave-converter-device-research/>
- [10-A] <http://www.seasteading.org/2010/10/pneumatically-stabilized-platform-ppsp/>
- [11-A] <http://www.seabased.com/en/technology/seabased-wave-energy>
- [12-A] <http://www.oceannavitasscotland.com/technology/coastal.html>
- [13-A] <http://www.nrsd.info/student/71109.htm>
- [14-A] http://en.openei.org/wiki/MHK_Technologies/Wave_Rotor
- [15-A] http://personalpages.manchester.ac.uk/staff/robert.j.brown/Default_files/Manchester_Bobber.htm
- [16-A] http://www.engineering.lancs.ac.uk/lureg/group_research/wave_energy_research/wraspa.php
- [17-A] <http://www.alternativeconsumer.com/2008/09/17/5-ways-to-ride-wave-power/>
- [18-A] http://www.maritimejournal.com/news101/marine-renewable-energy/simple_wave_generator_powers_forward
- [19-A] <http://rustrade.org.uk/eng/wp-content/uploads/FLOAT-WAVE-ELECTRIC-POWER-STATION.pdf>
- [20-A] <http://www.homepages.ed.ac.uk/v1ewaveg/sloped%20IPS/Sloped%20IPS%20intro.htm>
- [21-A] http://peswiki.com/index.php/Directory:Ocean_Wave_Energy
- [22-A] http://www.sara.com/RAE/ocean_wave.html
- [23-A] <http://coastalenergyandenvironment.web.unc.edu/2010/05/31/wave-energy-desalination-progress/>
- [24-A] <http://www.owel.co.uk/owel-technology/background/>
- [25-A] http://prod-http-80-800498448.us-east-1.elb.amazonaws.com/w/images/5/51/Ocean_Wave_Energy_Converter_OWEC.jpg

[26-A] http://en.openei.org/wiki/MHK_Technologies/TETRON

[27-A] <http://libertyparkusafd.org/lp/BuildingGreenUSA/Ocean%20Power/Wind%20Wavesand%20Sun.htm>

[28-A] http://en.openei.org/wiki/MHK_Technologies/Wave_Energy_Conversion_Activator

[29-A] <http://montaraventures.com/energy/?cat=5&paged=2>

[30-A] <http://www.customstoday.com.pk/kerala-cabinet-accepts-adani-groups-bid-for-construction-of-vizhinjam-port/>

[31-A] http://www.aquatera.co.uk/search/report_project.asp?ID1=105

[32-A] <http://lerpa.eigsi.fr/index.php?module=projets>

[33-A] <https://tethys.pnnl.gov/annex-iv-sites/pico-oscillating-water-column>

[34-A] <http://www.espoes.org/es/conservacion/electricitat-que-ve-del-mar.html>

[35-A] http://www.bcp-energia.it/immagini/Mighty_Whale.jpg

[36-A] <http://www.zulenet.com/electriceco/wavemill.html>

[37-A] <http://www.offshorewind.biz/2013/04/03/ireland-wavebob-to-go-into-liquidation/>

[38-A] http://peswiki.com/index.php/Directory:Sea_Wave_Energy

[39-A] <http://www.portal-energia.com/caracteristicas-do-sistema-pelamis-para-energia-das-ondas/>

[40-A] <https://sites.google.com/site/waveenergygeneration/oscillating-water-columns>

[41-A] <http://www.see.murdoch.edu.au/resources/info/Tech/wave/>

[42-A] http://www.buch-der-synergie.de/c_neu_html/c_06_08_wasser_wellenenergie_d_bis_norwegen.htm

[43-A] <http://wavestarenergy.com/>

[44-A] <http://www.waveriderenergy.com.au/Technology.html>

[45-A] <http://ecogeek.org/category/ecogeek/tidal/page/6/>

[46-A] <http://www.waveberg.com/wavenergy/1988.htm>

[47-A] <http://www.zulenet.com/electriceco/waveplane.html>

[48-A] <http://www.seao2.com/oceanenergy/>

[49-A] <http://subseaworldnews.com/2012/10/15/biopower-to-advance-biowave-energy-system-to-commercial-stage-australia/>

[50-A] <https://tethys.pnnl.gov/annex-iv-sites/testing-ocean-energy-buoy-galway-bay-ireland>

[51-A] <http://www.oceantecenergy.com/about-us/media/gallery/>

[52-A] <http://www.electric-vehiclenews.com/2010/05/aquamarine-power-officially-releases.html>

[53-A] http://www.all-energy.co.uk/__novadocuments/28732?v=635024806214530000

[54-A] <http://www.energy-without-carbon.org/OscillatingWaterColumn>

[55-A] <http://highlike.org/text/wave-power-station-in-the-port-of-pecem/>

[56-A] <https://mendocoastcurrent.wordpress.com/2008/02/20/the-seadog-pump-for-electricity-desalination/>

- [57-A] <http://www.maritimejournal.com/news101/comment-and-analysis/sino-scots-partnership-to-harness-wave-power>
- [58-A] <http://www.oceanenergyireland.com/TestFacility/AMETS>
- [59-A] http://www.seai.ie/Renewables/Ocean_Energy/Galway_Bay_Test_Site/Map_of_test_site.html
- [60-A] <http://www.wavehub.co.uk/wave-hub-site>
- [61-A] <http://www.fp7-marinet.eu/public/img/EVE3.png>
- [62-A] <http://metcentre.no/>
- [63-A] <http://www.fp7-marinet.eu/AAU-nissum-bredning-test-site.html>
- [64-A] <http://en.france-energies-marines.org/Test-sites/SEM-VER>
- [65-A] <http://www.danwec.com/download/boejepositioner.pdf>
- [66-A] <https://tethys.pnnl.gov/annex-iv-sites/lysekil-wave-energy-test-site>

Anexo

Descrição de alguns sistemas ensaiados ou planeados

Os dispositivos de extracção de energia das ondas baseiam-se, muitas vezes, em conceitos que são estudados e desenvolvidos por investigadores de Universidades ou de Institutos de investigação. Após uma fase preliminar de estudo a ideia passa normalmente para as mãos de entidades privadas, através da venda de patentes, por exemplo, o que faz com que os impulsionadores do invento percam o contacto com o desenvolvimento da tecnologia. Muitos destes dispositivos ficam-se apenas pela fase dos ensaios preliminares realizados. Passemos em revista alguns deles.

Dispositivo McCabe Wave Pump, Irlanda (1996)

O dispositivo McCabe Wave Pump é desenvolvido pela *Hydam Technology Ltd.* (Fig. A.1). O sistema possui três pontões de aço, que apontam em diferentes direcções, e uma placa no centro de cada pontão. A energia das ondas é convertida em potência útil através de bombas hidráulicas, podendo o sistema bombear água do mar para ser dessalinizada por osmose inversa. A potência do dispositivo é estimada em 250-500 KW. O tamanho do protótipo será de aproximadamente 40 m de envergadura. Em 2000 foi testado no Estuário do Rio Shannon um primeiro protótipo do que viria a ser o dispositivo actual, que se encontra em fase de construção.



Figura A.1: Ensaio do modelo do dispositivo McCabe Wave Pump [5-A].

Dispositivo Wave Master, Reino Unido (2002)

O Wave Master é uma tecnologia da empresa Ocean WaveMaster Ltd. O projecto continua em curso desde 2002. O sistema utiliza a diferença de pressão entre os picos e cavas das ondas para mover uma turbina hidráulica. Estima-se que a potência ideal das máquinas a utilizar seja de 50 KW, para ondas com 1 m de altura. Em 2003 o Wave Master foi financiado pela Carbon Trust para trabalhar com a NaREC, empresa que opera no campo das energias renováveis, no sentido de construir e instalar um protótipo com 20 m de envergadura no mar (Fig. A.2).

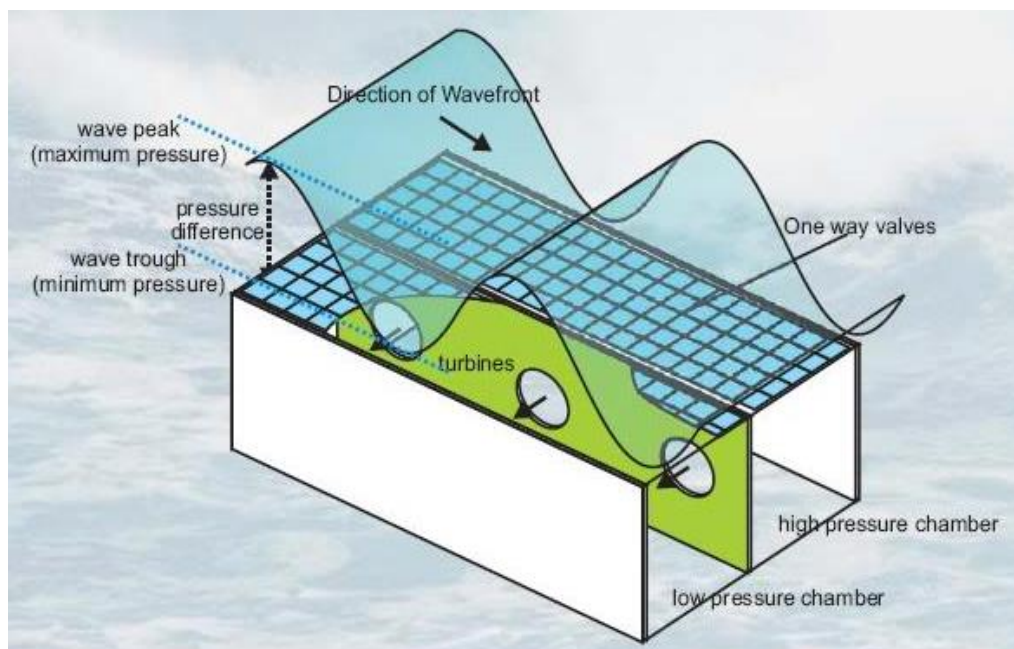


Figura A.2: Esquema do dispositivo Wave Master [6-A].

Dispositivo DWFPF, Dinamarca (2002)

O Dispositivo Danish Wave Power Float-Pump (DWFPF) é desenvolvido pela *Danish Wave Power* e consiste numa bóia de absorção pontual, com 2,5 m de diâmetro, ligada a uma bomba montada no fundo do mar, a 25 m de profundidade (Fig. A.3). Este sistema funciona a uma distância de 2,5 km da costa. O conversor é concebido para absorver uma potência máxima de 140 KW através de um sistema hidráulico convencional. Foram testados dois protótipos à escala de 1:4 e 1:2 respectivamente, no Mar do Norte.



Figura A.3: Foto do Dispositivo Danish Wave Power Float-Pump (DWFP) [7-A]

Sistema Tunneled Wave Power Plant, Dinamarca (2003)

A SeaWave, em cooperação com a Wavegen, desenvolveu uma nova ideia para a instalação de dispositivos OWC na linha de costa. O sistema baseia-se na construção de uma série de túneis na costa, que são ligados para formar uma coluna-de-água oscilante (Fig. A.4). A extracção da energia é feita através de uma turbina de ar. A empresa pensa aplicar esta tecnologia para extrair energia das ondas nas Ilhas Faroé, na Dinamarca. Já foram realizados ensaios em modelo reduzido deste dispositivo.

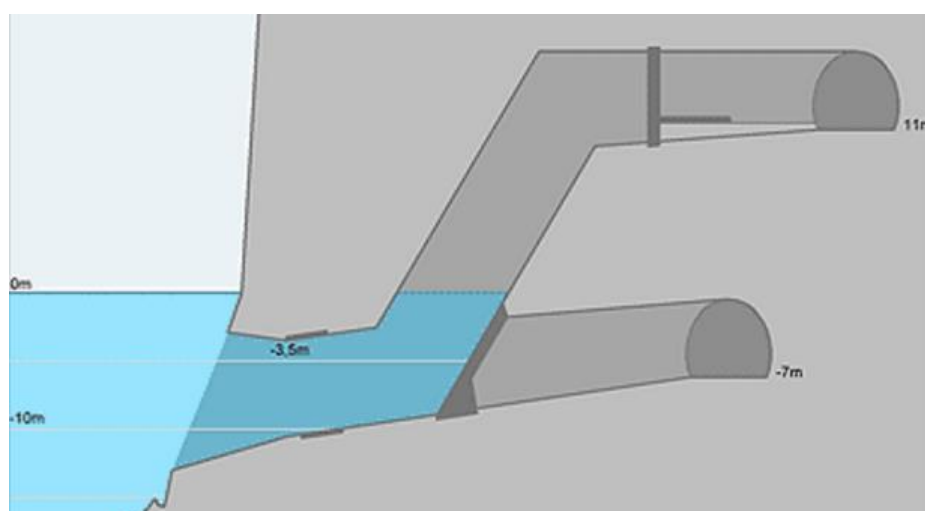


Figura A.4: Desenho do sistema Tunneled Wave Power Plant [8-A].

Dispositivo ANACONDA, Reino Unido (2006)

O Sistema ANACONDA é um dispositivo de corpo único, atenuador das ondas, patenteado em 2006 por Rainey (WS Atkins Oil and Gas) e Francis Farley (Maritime Energy Development Ltd.). Este sistema capta a energia das ondas sob a forma de pulsos de pressão que viajam no interior de um tubo flexível, em borracha, por acção das ondas incidentes (Fig. A.5). O nariz do tubo enfrenta as ondas, enquanto na sua extremidade traseira pode ser instalado um sistema PTO para extrair a energia dos impulsos de pressão. O dispositivo ANACONDA já ultrapassou sucessivos testes laboratoriais em diferentes instituições, a diferentes escalas. Prevê-se que o tubo atinja os 50 m de comprimento e tenha 7 m de diâmetro, à escala real.



Figura A.5: Ilustação do dispositivo ANACONDA [9-A].

Dispositivo PSP, EUA (2007)

O Dispositivo PSP - Pneumatically Stabilized Platform - está a ser desenvolvido pela Float Inc. e consiste numa estrutura composta por diversos sistemas de coluna-de-água, cujo funcionamento contribui para a estabilização de uma plataforma flutuante (Fig. A.6). A estrutura da plataforma comporta diversos sistemas OWC, sendo cada câmara pneumática ligada a um tubo comum que alimenta uma turbina de ar. Quando as ondas passam as oscilações das várias colunas-de-água estão desfasadas, fazendo com que o regime do escoamento de ar que alimenta a turbina seja permanente. O sistema já foi ensaiado em laboratório.



Figura A.6: Ensaio do modelo da Pneumatically Stabilized Platform [10-A].

Sistema SLG, Suécia (2007)

O Seabased Linear Generator (SLG) foi desenvolvido pela Seabased AB, em conjunto com a Universidade de Upsala, na Suécia. É basicamente um dispositivo de absorção pontual. O sistema utiliza um gerador linear de ímãs permanentes, de três fases, para gerar electricidade. O gerador linear é montado no fundo do mar e é accionado por uma bóia flutuante (Fig. A.7). Os ensaios realizados na zona de testes Lysekil, na Suécia, mostram que o sistema é capaz de funcionar eficazmente com ondas de baixa frequência, o que o torna economicamente viável, com unidades de 10 KW reunidas num parque de 1 MW.

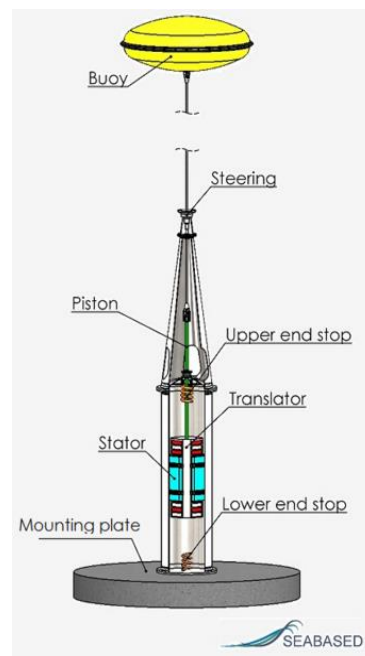


Figura A.7: Representação do dispositivo Seabased Linear Generator [11-A].

Dispositivo Aegir Dynamo, Reino Unido (2007)

O dispositivo Aegir Dynamo é um projecto da Ocean Navitas Ltd. O dispositivo funciona com uma boia de absorção pontual composta por dois componentes principais: a base de sustentação e um flutuador (Fig. A.8). As ondas induzem um movimento relativo linear entre o flutuador e a base, que é depois convertido em movimento de rotação. Este é depois utilizado para accionar o gerador que se encontra selado no interior da coluna central.



Figura A.8: Desenho de um parque de dispositivos Aegir Dynamo [12-A].

Dispositivo OMI Wave Pump, EUA (2007)

O Sistema OMI Wavepump foi desenvolvido pela Ocean Motion International. O sistema consiste numa grande plataforma, do tipo Jack-up, que suspende um conjunto de bombas (Fig. A.9). Todas as bombas estão ligadas a um depósito de acumulação, onde a água é armazenada a alta pressão e depois acciona uma turbina hidráulica e o respectivo alternador.

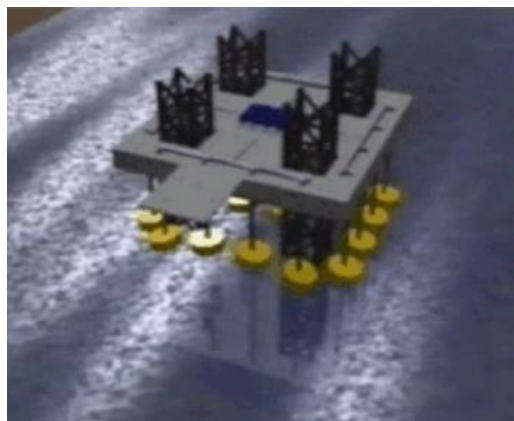


Figura A.9: Representação do dispositivo OMI Wavepump [13-A].

Sistema Wave Rotor, Holanda (2007)

O conceito Wave Rotor encontra-se em fase de simulação computacional, estando a ser desenvolvido pela Ecofys (Fig. A.10). As turbinas do dispositivo utilizam dois tipos de rotores, um rotor Darius e um rotor Wells. Estas máquinas são utilizadas para gerar electricidade a partir das correntes induzidas no oceano. O sistema utiliza o mesmo princípio das turbinas eólicas. O dispositivo pode em princípio apresentar uma boa eficácia, dado que utiliza um sistema de accionamento directo. O tamanho do protótipo previsto atinge os 40 m de diâmetro.



Figura A.10: Ilustração de um parque de dispositivos Wave Rotor [14-A].

Dispositivo Manchester Bobber, Reino Unido (2007)

O dispositivo Manchester Bobber foi desenvolvido pela Universidade de Manchester (Fig. A.11). O sistema é composto por uma série de flutuadores que estão ligados entre si por baixo de uma plataforma. Os flutuadores aproveitam o movimento das ondas para gerar electricidade, através de motores lineares. Os flutuadores flutuam livremente, permitindo tirar proveito das ondas incidentes provenientes de qualquer direcção. A potência a instalar no sistema, à escala real, é estimada em 5 MW. O sistema já foi ensaiado em canal de ondas.



Figura A.11: Modelo do Manchester Bobber em canal hidráulico [15-A].

Dispositivo PS Frog, Reino Unido (2007)

O dispositivo PS Frog está a ser desenvolvido pela Universidade de Lancaster (Fig. A.12). O conceito consiste numa bóia de configuração irregular, cujo movimento de oscilação provocado pelas ondas é utilizado como força motriz. O sistema inercial é uma massa de água que se move num circuito hidráulico, no interior da bóia. O dispositivo possui um lastro na parte inferior, de modo a mantê-lo estável. Este conceito foi testado numa fase ainda muito embrionária, em 2007, na Universidade de Lancaster.

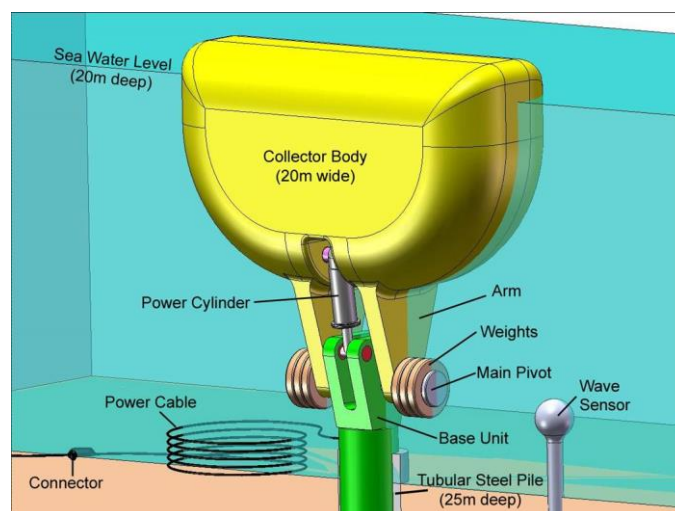


Figura A.12: Representação do dispositivo PS Frog [16-A].

Dispositivo SSG, Noruega (2007)

O dispositivo Seawave Slot-Cone Generator (SSG) é um conceito da WAVEenergy AS, que funciona através do galgamento das ondas num plano inclinado (Fig. A.13). O sistema utiliza um total de três reservatórios empilhados uns em cima dos outros, para capturar as cristas das maiores ondas. O PTO é uma turbina hidráulica de vários andares, concebida para converter a energia potencial em potência ao veio. Está previsto ligar o sistema à rede eléctrica ou, em alternativa, utilizá-lo para produzir hidrogénio.



Figura A.13: Desenho do sistema Seawave Slot-Cone Generator [1.13].

Sistema C-Wave, Reino Unido (2007)

O Sistema C-Wave é um dispositivo da C-Wave Ltd. (Fig. A.14). O protótipo é composto por três pendulos invertidos flutuantes espaçados entre si. As três placas têm a sua charneira horizontal fixa nas extremidades a duas paredes laterais. As placas são posicionadas a uma distância de um comprimento de onda entre elas, o que faz com que se movam em sentidos opostos. O movimento relativo entre placas será utilizado para accionar um gerador eléctrico.

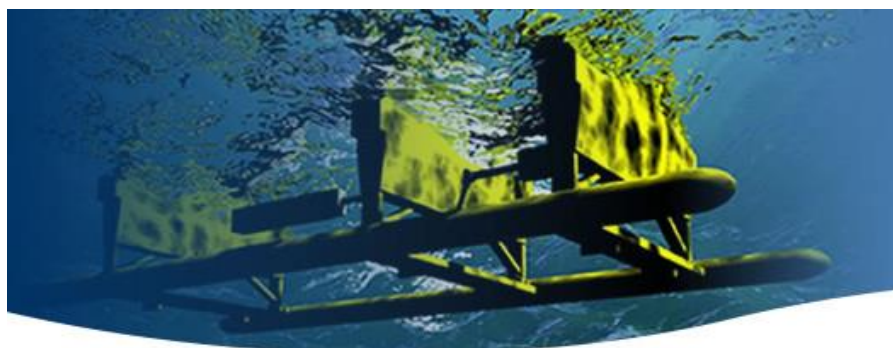


Figura A.14: Representação do sistema C-Wave [17-A].

Dispositivo Trident Energy Converter, Reino Unido (2007)

O Sistema Trident Energy Converter é desenvolvido pela *Trident Energy Ltd.* (Fig. A.15). Este dispositivo é um sistema de absorção pontual, que usa uma bóia para captar a energia das ondas e um gerador linear para converter as oscilações do flutuador em energia eléctrica. O gerador está alojado fora da água, contrariamente a outras soluções, onde permanece protegido contra a acção das tempestades e a corrosão. Em mar tempestuoso o gerador linear actua como motor, levantando a bóia para fora de água. Os promotores do projecto antevêm um rendimento elevado, de 80%, dado que existem apenas dois processos de conversão de energia. Em 2013 foi testado na Universidade de Edinburgh um protótipo a pequena escala do Trident. Em função dos resultados obtidos a empresa promotora decidiu passar à construção de um modelo a maior escala, que se encontra actualmente em fase adiantada.



Figura A.15: Ensaio do modelo do dispositivo Trident Energy Converter [18-A].

A Float Wave Electric Power Station, FWEPS, Rússia (2008)

O Sistema FWEPS foi desenvolvido pela Applied Technologies Company Ltd (Fig. A.16). O conceito do dispositivo é do tipo absorvedor pontual. O sistema apoia-se numa cápsula à superfície do mar, em cujo interior funciona um conversor de energia das ondas que consiste num sistema oscilatório e num gerador de energia linear com acumulador. Os ensaios em modelo reduzido foram realizados no canal hidráulico da Applied Technologies Company Ltd.



Figura A.16: Modelo do dispositivo FWEPS em fase de montagem [19-A].

Dispositivo Sloped IPS Buoy, Reino Unido (2008)

O dispositivo IPS Buoy é um projecto da Universidade de Edinburgh (Fig. A.17). Este sistema consiste numa bóia flutuante, de absorção pontual, cujo movimento relativo em relação a uma haste é o modo útil de captação de energia. O sistema produz potência sob a forma de fluido hidráulico pressurizado. A haste inclinada, que é uma variante do sistema original, permite que o sistema oscile em ambos os movimentos vertical e horizontal, quando excitado pelas ondas incidentes. Os ensaios do modelo deste dispositivo foram realizados no tanque de ondas da Universidade de Edinburgh.

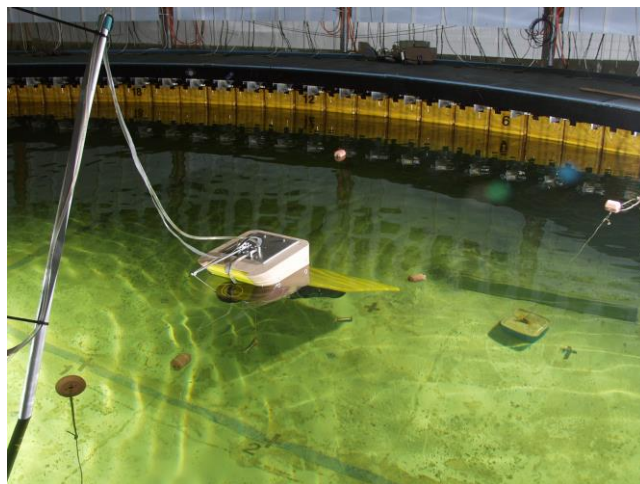


Figura A.17: Ensaio do dispositivo Sloped IPS Buoy em tanque de ondas [20-A].

Sistema Triton, Reino Unido (2008)

O Sistema Triton foi desenvolvido pela *Neptune Renewable Energy* (Fig. A.18). Este dispositivo opera na zona costeira e consiste numa bóia assimétrica ligada a uma estrutura que está suspensa acima do nível da água do mar. A configuração assimétrica do flutuador e a

proximidade da linha de costa são os factores que maximizam a captação de energia da onda incidente e o rendimento do sistema. A fim de sintonizar o sistema para o regime de ondulação dominante, a massa do flutuador pode ser controlada por bombagem de água do mar para o interior da bóia. A extracção de potência é feita através de um sistema hidráulico. Os ensaios deste dispositivo foram realizados no canal hidráulico da Universidade de Maine, nos Estados Unidos.

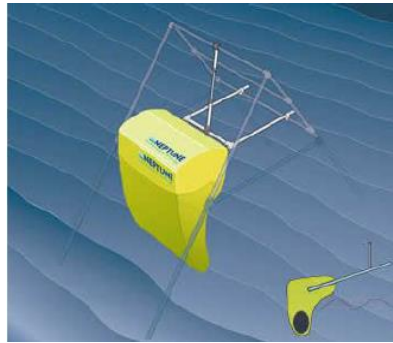


Figura A.18: Representação do sistema Triton [21-A].

Dispositivo MHD Generator, Reino Unido (2008)

O dispositivo MHD é um sistema que está a ser desenvolvido pela *Scientific Applications & Research Associates* (SARA). O dispositivo (Fig. A.19) aproveita basicamente o movimento de oscilação das ondas para accionar um gerador MHD. A energia é então convertida para 60 Hz AC por um inversor eléctrico, sendo depois transmitida para a costa a partir de múltiplas estações geradoras conectadas à rede. Prevê-se que o protótipo virá a ter 100 KW de potência instalada e um rendimento global de 50%.

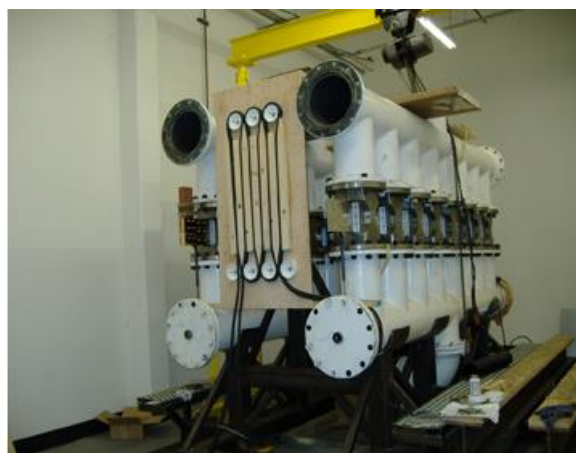


Figura A.19: Protótipo do MHC Generator testado em laboratório [22-A].

Dispositivo WET EnGen, Canadá (2009)

O dispositivo WET EnGen é desenvolvido pela *Wave Energy Technologies Inc.* (Fig. A.20). A principal característica do sistema é a sua “bóia inteligente”, que sobe e desce uma longarina rígida inclinada a 45°. A bóia acciona um veio por meio de um cabrestante, ao qual está ligada através de um cabo. A energia de rotação do veio é então usada para gerar electricidade através de um alternador, ou para dessalinizar água utilizando uma bomba de alta pressão. Os ensaios do protótipo em escala reduzida foram feitos no National Research Council Institute for Ocean Technology situado no Canadá.

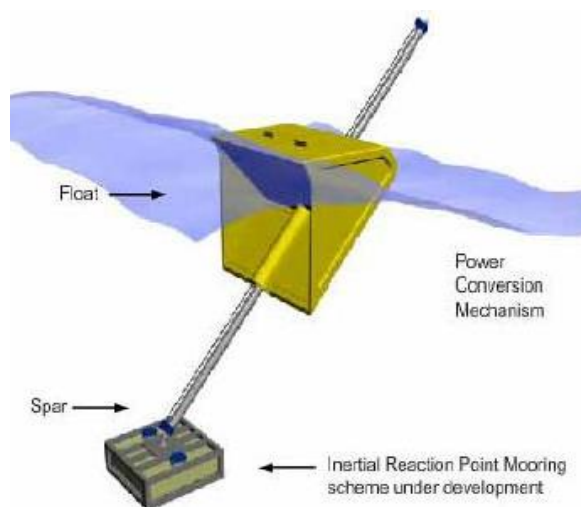


Figura A.20: Esquema de funcionamento do dispositivo WET EnGen [23-A].

Sistema OWEL Grampus, Reino Unido (2009)

O Sistema OWEL é desenvolvido pela *Offshore Wave Energy Ltd* (OWEL). O sistema é basicamente uma conduta horizontal flutuante, composta por várias secções (Fig. A.21). A abertura da conduta à entrada é determinada pela altura de onda significativa e o seu comprimento é determinado pelo comprimento de onda médio das ondas. O grande comprimento da conducta assegura a sua estabilidade. O sistema de ancoragem permite o alinhamento do dispositivo com as ondas incidentes. Estas ondas confinam o ar dentro das condutas à medida que a água penetra dentro destas, uma vez que a sua secção diminui para jusante. O ar comprimido é recolhido num depósito antes de ser expandido através de uma turbina acoplada a um alternador. O protótipo, de 32 000 T, tem 200 m de largura à entrada. A capacidade instalada do sistema é estimada em 12 MW. Foi ensaiado um protótipo à escala de 1:40 deste dispositivo no tanque hidrodinamico da Universidade de Southampton.



Figura A.21: Ensaio do modelo do dispositivo OWEL Grampus [24-A].

Sistema OWEC, Reino Unido (2010)

O Sistema Ocean Wave Energy Converter (OWEC) é desenvolvido pela *Ocean Wave Energy Company* (Fig. A.22). Toda a estrutura do dispositivo é submersa, excepto a bóia. É utilizada uma placa de amortecimento para resistir ao movimento da base, permitindo assim que a bóia trabalhe em relação ao referencial da base. A energia deste movimento relativo é convertida em electricidade por meio de um gerador linear. A empresa promotora prepara-se para testar um dispositivo à escala de 1:38.



Figura A.22: Fotografia do dispositivo Ocean Wave Energy Converter [25-A].

Dispositivo Tetron, Reino Unido (2010)

O Dispositivo Tetron é desenvolvido pela *Joules Energy Efficiency Services Ltd* (Fig A.23). O dispositivo utiliza uma esfera imersa no centro de uma estrutura. Sabe-se apenas que a

conversão de energia deste dispositivo é feita através de pressurização hidráulica. Está em fase de construção um modelo a escala reduzida deste sistema.

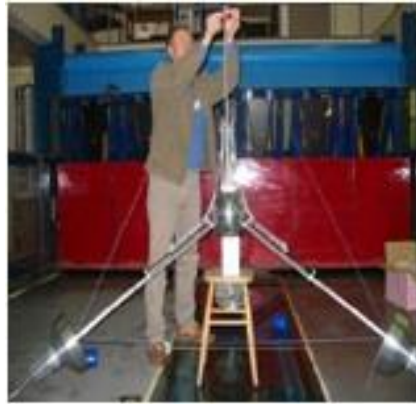


Figura A.23: Modelo reduzido do dispositivo Tetron [26-A].

Sistema Wave Blanket, EUA (2012)

O Sistema Wave Blanket é um conceito desenvolvido pela *Wind Waves and Sun* (Fig. A.24). O sistema utiliza tubos capilares poliméricos que são preenchidos com água, formando uma manta que flutua na superfície do mar. O movimento das ondas excita as câmaras hidropneumáticas, sendo o diferencial de pressão entre as câmaras utilizado, num sistema de circuito fechado, para gerar electricidade. O aproveitamento da energia é feito através de uma turbina de ar. O sistema conta com a sua flexibilidade para suportar ondulação forte. Este dispositivo encontra-se numa fase muito prematura de desenvolvimento não havendo ainda previsões de ensaios de protótipos.

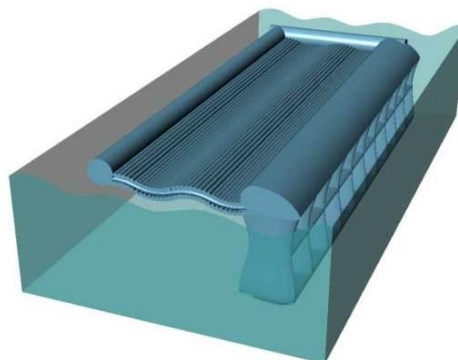


Figura A.24: Esquema do dispositivo Wave Blanket [27-A].

Dispositivo WECA, Grécia (2012)

O dispositivo Wave Energy Conversion Actuator (WECA) é desenvolvido pela *Daedalus Informatics Ltd* (Fig. A.25). O projecto consiste numa estrutura de aço modular que pode ser montada em qualquer local junto à costa. Este sistema utiliza a energia das ondas para produzir ar comprimido. O dispositivo, em cunha, utiliza uma superfície submersa a fim de converter a energia cinética em energia potencial. Esta energia potencial será absorvida através da compressão de ar, que é em seguida expandido através de uma turbina de ar.

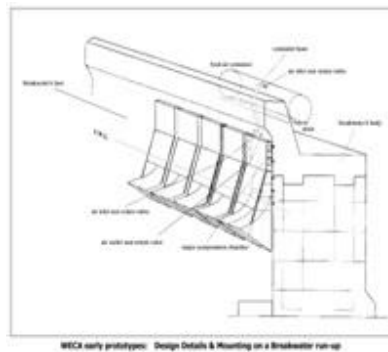


Figura A.25: Desenho do dispositivo Wave Energy Conversion Actuator [28-A].

Os sistemas descritos nesta secção encontram-se ainda numa fase bastante preliminar de desenvolvimento. Muitos deles ainda só existem através de simulações computacionais, não havendo ainda um modelo físico do sistema, a escala reduzida. Como acontece sempre, muitas das ideias nunca chegaram a sair do papel. As causas são as mais diversas. Alguns dos sistemas que chegam à fase de demonstração experimental, também dão ou não origem a um protótipo testado em condições próximas das reais, na maioria dos casos por falta de financiamentos.