



**energia das ondas**  
- joão m. b. p. cruz  
- antónio j. n. a. sarmento





**energia das ondas**  
**introdução aos aspectos tecnológicos,**  
**económicos e**  
**ambientais**

- joão m. b. p. cruz  
- antónio j. n. a. sarmento

Instituto do Ambiente  
Alfragide  
2004

Título: Energia das Ondas:  
Introdução aos Aspectos Tecnológicos,  
Económicos e Ambientais

Autoria: João M.B.P. Cruz  
António J.N.A. Sarmento

Instituto Superior Técnico  
WEC – Wave Energy Centre

Edição: Instituto do Ambiente

Data da Edição: Outubro de 2004

Impressão: Fernandes & Terceiro, Lda.

Capa: Enclave, Publicidade & Marketing, Lda.

Tiragem: 1 500 exemplares

ISBN: 972-8577-11-7

Depósito Legal: 217316/04

Para o Prof. António Falcão,  
que inspirou e inspira gerações e gerações de estudantes  
(incluindo as duas que escreveram este livro).



## índice

1.	Origem e Recurso Energético das Ondas dos Oceanos	7
2.	Aspectos Genéricos da Energia das Ondas	9
2.1.	História da Energia das Ondas	9
2.2.	A Energia das Ondas em Portugal	11
2.2.1.	Perspectivas Futuras no Caso Português	12
3.	Tecnologias de Conversão de Energia das Ondas	15
3.1.	Classificação das Tecnologias	15
3.2.	Dispositivos Costeiros	16
3.2.1.	Dispositivos de Coluna de Água Oscilante (CAO)	16
3.2.2.	Central Piloto Europeia da Ilha do Pico	17
3.2.3.	Central LIMPET	20
3.2.4.	Outras Centrais: a Energetech OWC	21
3.3.	Dispositivos Próximos da Costa	21
3.3.1.	OSPREY	22
3.3.2.	CEO Douro	22
3.4.	Dispositivos Afastados da Costa	23
3.4.1.	Archimedes Wave Swing	23
3.4.2.	Pelamis	25
3.4.3.	Wave Dragon	27
3.4.4.	Mighty Whale	29
3.4.5.	Outros Dispositivos: Perspectivas Futuras	30

4.	Economia da Energia das Ondas	33
4.1.	Custo Unitário de Potência Instalada para Condições de Viabilidade Económica	33
4.2.	Investimento, Produtividade e Remuneração de um Parque de Energia das Ondas com 1 km de Extensão	35
4.3.	Custo Actual da Tecnologia e Investimento Necessário para se Atingir a Viabilidade Económica	36
4.4.	Aproveitamento de Energia das Ondas Integrado em Obras de Protecção Costeira	39
4.5.	Dimensões Típicas de um Parque de Energia das Ondas	40
5.	Impactes Ambientais Associados à Conversão de Energia das Ondas	43
5.1.	Impactes Visuais	43
5.2.	Ruído	43
5.3.	Perturbação do Meio Envoltente	44
5.4.	Esquematização dos Impactes Ambientais	45
5.5.	Aspectos Relevantes numa Política Ambiental	48
6.	Barreiras ao Desenvolvimento	65
7.	Conclusões	68
8.	Referências	71
	Lista de figuras	59
	Lista de tabelas	61

# 1. Origem e recurso energético das ondas dos oceanos

Os desafios impostos pela necessidade de implementar políticas que assegurem um desenvolvimento sustentável são particularmente pertinentes no domínio da energia. Cada vez mais somos confrontados com a exigência de encontrar nas energias renováveis uma alternativa real e fiável às formas convencionais de produção de energia eléctrica, responsáveis por sérias ameaças ao meio ambiente. As obrigações legais impostas pelas directivas comunitárias e pelo protocolo de Quioto apenas reforçam esta necessidade. Os oceanos, contendo o maior de todos os recursos naturais, albergam um potencial energético enorme, que pode contribuir de forma significativa para as necessidades crescentes de energia a um nível global.

A energia contida nos oceanos pode ter origens diferentes, o que origina diferentes classificações (Pontes e Falcão, 2001). As mais relevantes são sem dúvida a *energia das marés*, fruto da interacção dos campos gravíticos da lua e do sol, a *energia térmica dos oceanos*, consequência directa da radiação solar incidente, a *energia das correntes marítimas*, cuja origem está nos gradientes de temperatura e salinidade e na acção das marés e finalmente a *energia das ondas*, que resulta do efeito do vento na superfície do oceano. Esta última forma de energia pode ser considerada uma forma concentrada da energia solar, pois é esta que, pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, é responsável pelos ventos. Uma vez criadas as ondas podem viajar milhares de quilómetros no alto mar praticamente sem perdas de energia. Em regiões costeiras a densidade de energia presente nas ondas diminui devido à interacção com o fundo do mar. Esta diminuição pode ser atenuada por fenómenos naturais, como veremos mais à frente. A potência de uma onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude e ao seu período. Ondas de elevada amplitude (cerca de 2 m) e de período elevado (7 a 10 s) excedem normalmente os 50 kW por metro de frente de onda (CRES, 2002).

A energia das ondas apresenta-se assim como particularmente atractiva para ilhas ou países com grandes faixas costeiras, pelo que, após o choque petrolífero de 1973, países que satisfazem as condições geográficas necessárias e partilham as necessidades de importação de energia elegeram a energia das ondas em programas de carácter governamental ou em instituições de investigação e desenvolvimento<sup>1</sup>. Como exemplos temos os casos do Reino Unido, Noruega, Dinamarca, Suécia e Portugal, na Europa, os Estados Unidos da América na América do Norte e a China, Índia e Japão na Ásia (Sarmiento e Cruz, 2003). O recurso global atribuído à energia das ondas ronda os 2 TW, sendo assim equiparável à potência eléctrica média anual consumida mundialmente. O recurso energético das ondas encontra-se exemplificado na Figura 1.1 onde o potencial de cada zona é representado em kW por metro de frente de onda. Estes valores representam o fluxo médio anual de energia que atravessa cada metro de frente de onda e são variáveis, podendo atingir, em estados de tempestade, o 1 MW/m. O recurso energético das ondas na Europa representa cerca de 16% do mundial, contabilizando assim 320 GW.

Em Portugal estão "disponíveis" 21 GW, distribuídos entre 15 GW para o continente e 6 GW para as Regiões Autónomas. Mesmo sendo extremamente conservadores nas taxas de conversão da energia

<sup>1</sup> Embora as primeiras ideias para a extracção da energia das ondas remontem a Girard (pai e filhos), em 1799.

disponível facilmente concebemos que este recurso constitui uma mais valia para Portugal, que se encontra ainda por explorar.



**Figura 1.1**  
Distribuição do potencial mundial das ondas em kW/m de frente de onda

Portugal foi aliás um dos países pioneiros na investigação e desenvolvimento dos dispositivos de conversão de energia das ondas, pois desde 1977 que um grupo do Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade Técnica de Lisboa se dedica a este tópico, grupo ao qual se juntou em 1983 um outro do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI). A central piloto europeia da Ilha do Pico, que é descrita em 3.2.2., representa o culminar do esforço conjunto do IST, do INETI e de algumas empresas, tais como a EDP, a EDA e a EFACEC, no que diz respeito à implementação de tecnologias de conversão da energia das ondas. A sua importância histórica será salvaguardada seguramente pelas futuras gerações de investigadores e cientistas. A constituição, em 2003, do Centro de Energia das Ondas<sup>2</sup>, uma associação internacional sem fins lucrativos cuja índole está direccionada para o desenvolvimento e promoção da utilização da energia das ondas através de apoio técnico e estratégico a empresas, prova o crescente interesse nesta área.

Este texto tem como objectivo fundamental apresentar e descrever as principais tecnologias que permitem a conversão da energia das ondas em energia eléctrica. Dada a própria natureza destas tecnologias outras podem surgir, substituindo ou não as existentes, mas o estado actual de desenvolvimento permite já esquematizar um método de classificação e prever os seus impactes ambientais, tecendo ainda considerações sobre as principais barreiras ao seu desenvolvimento e aspectos relativos à viabilidade económica das tecnologias. Será dada naturalmente especial ênfase ao caso Português. Pretende-se que este texto permita ao leitor um primeiro contacto (em Português) com as tecnologias de conversão de energia das ondas, servindo de base para estudos futuros neste tema.

---

<sup>2</sup> [www.wave-energy-centre.org](http://www.wave-energy-centre.org)

## 2. Aspectos genéricos da energia das ondas

Neste capítulo procuraremos dar algumas noções da história da energia das ondas, com particular ênfase no caso Português. A primeira secção foca a sua atenção numa perspectiva mundial da energia das ondas, desde 1960 até à actualidade, enquanto a segunda e última secção evidencia os factos mais relevantes que estão relacionados com a actividade de desenvolvimento das tecnologias de conversão de energia das ondas em Portugal.

### 2.1. História da energia das ondas

Embora nem sempre associado ao conceito de energia útil, o potencial energético das ondas dos oceanos é reconhecido desde a antiguidade, sendo do século XVIII as primeiras propostas para aproveitamento da energia das ondas (McCormick 1981; Ross, 1995). Na Tabela 2.1.1 procura-se esquematizar os factos importantes desde a década de 1960 até à actualidade, sendo que o primeiro nome que nela figura é o do comandante Yoshio Masuda, que, a partir de meados da década de 1960, iniciou no Japão o desenvolvimento de bóias de sinalização marítima alimentadas por energia das ondas.

<b>1960</b>	Princípios	
	Meados	Bóias Comandante Y. Masuda
	Finais	
<b>1970</b>	Princípios	Propostas Salter para a produção de energia em larga escala
	Meados	Programa Reino Unido (2 GW)
	Finais	
<b>1980</b>	Princípios	Teoria linear no domínio da frequência
	Meados	Primeiras centrais piloto no Japão e na Noruega
	Finais	Modelos lineares no domínio do tempo de WEC's
<b>1990</b>	Princípios	Análise linear no domínio da frequência de conjuntos de WEC's
	Meados	Modelos "Wave-to-Wire" de WEC's
	Finais	Análise hidrodinâmica não linear de WEC's
<b>2000</b>	Princípios	Testes no mar de diversas centrais piloto
	Meados	Demonstração da tecnologia
	Finais	Demonstração da viabilidade económica da tecnologia

Nota: WEC's : Wave Energy Converters (dispositivos de extracção de energia das ondas)

**Tabela 2.1.1**  
Factos relevantes na história da energia das ondas

Foi no período que se seguiu a crise no mercado petrolífero de 1973 que a energia das ondas surgiu nos programas de I&D (Investigação e Desenvolvimento) no Reino Unido, sendo que o trabalho de Salter chamou a atenção para o potencial energético disponível nas ondas (Salter, 1974). O resultado imediato deste interesse culminou no aparecimento de diversas actividades em diversos países (casos da Suécia, Noruega, Dinamarca, Portugal, Irlanda, Japão e EUA) salientando-se o programa britânico que se revelaria demasiado ambicioso (o objectivo inicial visava a instalação de centrais que perfaziam 2 GW), facto que se pode considerar responsável pelo abandono quase na totalidade do apoio governamental a este programa em meados da década de 1980.

A experiência japonesa divergiu consideravelmente do programa do Reino Unido, uma vez que a opção de investigação passou das bóias do comandante Masuda para o Kaimei, um navio de demonstração que integrava 13 câmaras pneumáticas acopladas a gerados eléctricos de 40 a 50 kW, sendo o princípio de operação o da CAO – Coluna de Água Oscilante (*Oscillating Water Column*, ver 3.2.1.). Os testes do Kaimei ocorreram em 1978 e 1979, seguindo-se a construção de uma central de CAO (40 kW) em Senze, por volta de 1983. No final dessa década foi ainda construída uma outra central de CAO (60 kW), desta feita num quebra-mar no porto de Sakata. O programa Japonês inclui ainda uma central flutuante de CAO: o Migthy Whale (ver 3.4.4.).

A abordagem Norueguesa foi semelhante, tendo conduzido à construção de duas centrais de tipos diferentes: uma de CAO de 400 kW (Kvaerner) e uma central de galgamento denominada Tapchan (*Tapered Channel*). A primeira foi entretanto destruída devido a uma tempestade, tendo a segunda estado em operação durante diversos anos. Desde o início da década de 1990 que outras centrais pilotos foram construídas na Índia, China, Portugal e Reino Unido, com potências que oscilam entre os 20 e os 500 kW, e todas do tipo de CAO (excepto o Tapchan). Não é de estranhar que as centrais de CAO, nomeadamente as costeiras, sejam pois as mais estudadas, embora não existam publicações extensas sobre a *performance* destas centrais, facto que pode ser visto como um indicador de que as expectativas sobre os rendimentos das centrais não foram atingidas. Este facto não é surpreendente, em especial nas centrais mais antigas, que não beneficiaram do estado avançado de simulação, controlo e projecto que estão na actualidade disponíveis. Também não deve ser desprezado o facto do Japão, China e Índia terem um recurso energético baixo, que conduz necessariamente a condições menos favoráveis para a conversão da energia das ondas.

O apoio da Comissão Europeia está patente desde 1991, iniciando-se com os estudos preliminares sobre a energia das ondas (1991 e 1992) a que se seguiram, desde 1993, uma série de projectos sob a alçada do programa JOULE. Salientam-se os projectos que conduziram à criação de um atlas europeu do recurso energético das ondas (*Atlas of Wave Energy Resource in Europe*) e a construção de duas centrais piloto de CAO, uma na ilha do Pico (ver 3.2.2.) e outra na ilha de Islay, Escócia (ver 3.2.3). Mais recentemente, em 2003, a Comissão financiou a construção e o teste de uma central à escala 1:4 do Wavedragon (ver 3.4.3.). Desde 1993 a Comissão patrocina uma conferência internacional de energia das ondas (Edimburgo 1993, Lisboa 1995, Patras 1998, Aalborg 2000 e Cork 2003) que tem vindo a estimular a continuação da I&D nesta área na Europa. Esta acção foi complementada, de 2000 a 2003, pelas actividades de uma rede Europeia de energia das ondas (*European Wave Energy Network*), que envolve 14 equipas de universidades, institutos de investigação e empresas das mais activas no campo da utilização da energia das ondas. Esta rede europeia será alargada no triénio seguinte com uma Acção Coordenada em Energia dos Oceanos, que envolve 51 parceiros, metade dos quais são empresas. No mesmo período será desenvolvida uma rede europeia de investigação em energia das ondas, também financiada pela Comunidade Europeia, envolvendo 11 parceiros, dos quais 2 são empresas.

O final da década de 1990 e início do novo século viram aparecer 5 centrais piloto de 4 diferentes tecnologias, que estão ou serão ainda em 2004 testadas no mar. O facto de 4 destas centrais piloto serem propriedade de empresas deve ser encarado como factor de motivação extra, e como sinal da evolução para a maturidade das tecnologias de energia das ondas. Os dados retirados destas centrais piloto são fundamentais para o desenvolvimento dos sistemas, pois constituem, por exemplo,

ferramentas de validação dos modelos realizados. Uma outra etapa não menos importante passa pela demonstração da viabilidade económica das tecnologias, que seguirá um processo análogo ao de outras tecnologias, como as inerentes à conversão da energia eólica (ver 4.) Existem também notícias de planos para a instalação no norte de Espanha de um "parque de ondas", em 2005. As tendências para o desenvolvimento futuro encontram-se patentes na Tabela 2.1.1.

## 2.2. A energia das ondas em Portugal

A problemática associada à energia das ondas é particularmente pertinente no caso Português. Portugal foi um dos países pioneiros a estudar este tema e tem ainda uma contribuição activa no panorama internacional, facto que não deve ser encarado com estranheza e que se encontra directamente relacionado com as características energéticas das ondas da costa portuguesa. Nesta secção procuraremos mostrar um pouco dos momentos chave da energia das ondas em Portugal. Poderá ser procurada em Falcão (2004) uma descrição mais completa do desenvolvimento da energia das ondas em Portugal.

A actividade de investigação e desenvolvimento nesta área iniciou-se no IST em 1978, motivada pelo aparecimento de um invento português, da autoria do Sr. Agnelo Gonçalves David, um comerciante de Almeirim entretanto falecido, premiado em feiras internacionais de inventos. O invento consistia numa central de coluna de água oscilante, exemplificado através de um pequeno tanque em que as ondas eram geradas manualmente. Continha uma coluna de água oscilante no lado oposto ao batedor, e no topo estava uma pequena turbina de ar de fluxo reversível acoplada a um dínamo eléctrico que alimentava um pequeno rádio, que por sua vez tocava com um volume suficientemente alto para impressionar quem se encontrava na vizinhança.

A actividade iniciou-se com o desenvolvimento de métodos analíticos para análise da interacção de ondas com sistemas de aproveitamento de energia das ondas do tipo de coluna de água oscilante (CAO). Numa fase posterior foram realizados ensaios experimentais com modelos reduzidos em canais e tanques de ondas regulares e irregulares, quer para verificação dos resultados analíticos, quer para apoio ao dimensionamento da central de CAO que veio a ser construída na ilha do Pico. Esta central de 0,4 MW de potência instalada foi construída (1998-2000) com apoio financeiro da EU, do estado português, da Electricidade dos Açores e da Electricidade de Portugal, empresas que, conjuntamente com o IST, o INETI (Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação), a Profabril e a EFACEC, forneceram o suporte técnico-científico ao projecto.

Numa segunda fase foram dados passos muito importantes no estudo e desenvolvimento da turbina Wells (ver 3.2.1.). Por volta do início desta actividade criava-se no Departamento de Energias Renováveis do INETI (à data LNETI) - um grupo com o objectivo primordial de estudar o recurso energético das ondas em Portugal.

Para além do envolvimento na central do Pico, a equipa do IST participou no desenvolvimento da concepção e dimensionamento da central de CAO LIMPET (concluída em 2001), na ilha de Islay, na Escócia, e, a partir de 1997, na concepção e modelação do dispositivo holandês AWS (ver 3.4.1.), cujos testes se iniciaram em Maio de 2004.

Apresentam-se seguidamente alguns elementos representativos da actividade realizada pela equipa do IST/INETI na área da energia das ondas, presentemente constituída por seis membros doutorados:

- Na sequência dos trabalhos de investigação iniciais de natureza mais fundamental seguiram-se actividades de desenvolvimento e demonstração da tecnologia que incluem três centrais piloto construídas: a da ilha do Pico, nos Açores (concluída em 1999, com 400 kW), a do LIMPET na ilha de Islay, na Escócia (concluída em 2001, com 500 kW), e a central AWS instalada em 2004 ao largo da Póvoa do Varzim (2 MW), bem como os estudos preliminares da central de demonstração a construir no quebra-mar da Foz do Douro (ver 3.2.2.).
- A equipa tem grande experiência de participação e coordenação de projectos científicos: participou em 12 projectos de investigação financiados pela Comissão Europeia nesta área, dos quais coordenou 6. Para além disso a equipa coordenou numerosos projectos nacionais nesta área, colaborando com um grande número de empresas nacionais e estrangeiras na sua actividade.
- A implantação internacional da equipa revela-se também pela sua grande contribuição na organização de conferências e simpósios nesta área, sendo de salientar a presença de membros da equipa no comité científico de todas as conferências europeias na área e das duas grandes conferências anuais de impacto mundial com sessões na área, a *Internacional Offshore and Polar Engineering Conference* e a *International Offshore Mechanics and Artic Engineering*. Por iniciativa do INETI, que detém a sua presidência, foi criado em 2001 um *Implementing Agreement on Ocean Energy Systems* no âmbito da Agência Internacional de Energia.
- Para além do desenvolvimento tecnológico, a equipa tem uma elevada produção científica ilustrada por 8 teses de doutoramento e 9 de mestrado defendidas no IST e pela publicação de 41 artigos científicos em revista da especialidade e 112 artigos científicos publicados em anais de conferências científicas.

Na sequência destas actividades realizadas no país, foi criado em 2003 o Centro de Energia das Ondas (CEO)<sup>3</sup>, e uma nova vaga de investigadores procura desenvolver alguns dos sistemas mencionados, contribuindo para que o esforço até aqui desenvolvido não seja desaproveitado.

### 2.2.1. Perspectivas futuras no caso português

O crescente interesse nas energias renováveis em Portugal, e em particular na energia das ondas, originou a criação de uma associação internacional sem fins lucrativos cuja índole está direccionada para o desenvolvimento e promoção da utilização de energia das ondas através de apoio técnico e estratégico a empresas: o Centro de Energia das Ondas. Esta manifestação de interesse surge no culminar de vinte e cinco anos de I&D em Portugal, tendo o País assegurado neste intervalo de tempo uma posição de vanguarda. A nível internacional o interesse é também crescente: empresas como a Wavegen e a Ocean Power Delivery na Escócia, a SPOK na Dinamarca, a Teamwork Technology na Holanda, a Ocean Energy na Irlanda, a AquaEnergy e a Ocean Power Technology nos Estados Unidos da América, e a Energetech na Austrália trabalham com o objectivo de extrair a energia das ondas

---

<sup>3</sup> Para um descrição mais detalhada do CEO e dos seus associados recorrer directamente a [www.wave-energy-centre.org](http://www.wave-energy-centre.org).

dos oceanos. Fruto da actividade de algumas destas empresas e ainda de diversas instituições de I&D, a Europa dispõe na actualidade de diversas centrais piloto de diferentes tipos, que se encontram em teste no mar ou em elevada fase de desenvolvimento. Duas destas centrais, uma costeira (Pico) outra *offshore* (AWS), encontram-se em Portugal. Os chamados sistemas *offshore* são particularmente vocacionados para a extracção de energia em larga escala, através da sua instalação em parques (análogos aos parques eólicos), pelo que são aqueles onde a investigação recente tem focado a sua atenção, embora a tecnologia mais estudada seja a de Coluna de Água Oscilante para aplicação na linha de costa. A viabilidade económica destes dispositivos (ver 4.) começa também a ser seriamente equacionada. Um documento recente (PNEO, 2004) visa esboçar uma estratégia nacional para a energia das ondas. Nesta secção procuram-se salientar os pontos fortes e fracos da actual situação nacional nesta temática, evidenciando as oportunidades que se oferecem e as dificuldades na concretização dos objectivos.

Os pontos fortes e fracos tendo em vista a implementação destas tecnologias em Portugal são esquematizados genericamente na Tabela 2.2.1, sendo brevemente comentados em seguida.

Pontos Fortes	Pontos Fracos
Existência de mercado	Riscos inerentes a uma tecnologia em desenvolvimento
Condições naturais e estruturais	Falta de experiência em inovação tecnológica
Capacidade científica	Pouca disponibilidade das empresas portuguesas para investimentos nesta área
Capacidade tecnológica e industrial	Imagem pouco favorável dos primeiros sistemas
Política governamental favorável	Barreiras técnicas (agressividade do recurso)
Exigências comunitárias no âmbito das energias renováveis	Complexidade e demora dos processos de licenciamento

**Tabela 2.2.1**  
**Pontos fortes e pontos fracos do caso português (PNEO, 2004)**

Analisemos primeiramente os pontos fortes. Como primeiro elemento dessa coluna da Tabela 2.2.1 temos a existência de mercado. Do ponto de vista interno este mercado existe pois uma primeira análise sobre a batimétrica do 50 m de profundidade mostra que ao largo da costa ocidental do continente Português existem cerca de 250 a 350 km de extensão que podem ser aproveitados para fins de extracção de energia de energia das ondas, pois não estão se enquadram no estatuto de zonas reservadas a outros fins (regiões protegidas, tráfego marítimo, actividades militares e de recreio, zonas de protecção de cabos submarinos; e não colidem com a actividade da pesca). Note-se que os sistemas *offshore* serão em princípio instalados em profundidades entre os 50 e os 80 m, dependendo de condicionalismos locais, como a existência de zonas ou corredores de pesca e o tipo de fundo (geologia e batimetria). Mesmo adoptando critérios conservadores (admitindo, por exemplo, que 15% da energia disponível para sistemas *offshore* é convertida em energia eléctrica e assumindo que apenas são viáveis para instalação deste sistemas 250 km de linha costeira) chegamos ao valor de 10TWh/ano, representativo da introdução de energia eléctrica na rede e que corresponde a cerca de

20% do consumo nacional de electricidade. Se assumirmos ainda que o factor de carga<sup>4</sup> é de 25% obtemos como valor da potência a instalar 4,5 GW para a extensão de costa referida, valor que deve ser comparado com os cerca de 3,75 GW de potência eólica a instalar até 2010 e que pode ser considerado como o potencial nacional (PNEO, 2004). Do ponto de vista do mercado externo os estudos efectuados levam a crer que a energia das ondas será economicamente viável em zonas com recursos energéticos superiores a 15 kW/m (fluxo de energia médio anual transportado em cada metro de frente de onda), valor que é suplantado pelas condições naturais de Portugal: 45 kW/m em alto mar e um pouco menos de 30 kW/m em profundidades de cerca de 50 m. Outro factor importante é o do recurso energético das ondas ser atractivo num número muito elevado de locais a uma escala global, o que confere uma excepcional oportunidade para quem vier a dominar a tecnologia. Um outro ponto forte a salientar prende-se com os incentivos governamentais, que no presente se traduzem, por exemplo, na tarifa atribuída a energia das ondas (0,225 €/kWh), valor extraordinariamente favorável a nível mundial. No que diz respeito aos pontos fracos salientam-se os riscos inerentes a uma tecnologia em desenvolvimento, que exige um elevado esforço financeiro até a viabilidade económica ser atingida, a pouca experiência de Portugal em matéria de inovação tecnológica e as barreiras técnicas associadas à natureza do próprio recurso. O peso relativo destes pontos fortes e fracos é naturalmente subjectivo, e apenas o futuro poderá dizer quais são preponderantes. As oportunidades para o país são desta forma diversas, e passam pela produção de uma quantidade relevante de energia eléctrica por uma fonte renovável, pela criação de emprego, pelo desenvolvimento da economia na perspectiva de uma tecnologia de impacto mundial e a de uma tecnologia *offshore* com aplicação potencial noutros recursos oceânicos, e pela oportunidade para empresas nacionais, como fornecedoras de componentes, equipamentos e serviços. A definição de uma Estratégia Nacional para a área da Energia das Ondas é essencial para que, a curto-médio prazo, as oportunidades e pontos fortes acima referidos sejam rentabilizados (PNEO, 2004), e pressupõe a definição de medidas de apoio que a sustentem. Salienta-se também o envolvimento de uma empresa portuguesa produtora independente de energia, a ENERSIS, em duas das actuais tecnologias, o AWS e o Pelamis, o que poderá permitir a curto prazo o teste de centrais deste tipo em águas nacionais.

---

<sup>4</sup> Razão entre a potência média produzida e a potência instalada.

### 3. Tecnologias de conversão de energia das ondas

#### 3.1. Classificação das tecnologias

Após décadas de investigação e desenvolvimento surgem na actualidade diferentes soluções capazes de responder ao desafio tecnológico que é apresentado na extracção de energia das ondas. Estas tecnologias não são concorrentes na actualidade, situação que poderá ser alterada num futuro próximo, tal como não será correcto afirmar que estas serão as únicas soluções possíveis, dado o crescente interesse neste domínio e a permanente entrada de novas ideias, empresas e outras instituições nesta área. É fundamental estabelecer critérios de classificação das diferentes tecnologias, que poderiam passar, à semelhança de tecnologias de extracção de outras formas de energias renováveis, pela potência dos dispositivos. O critério de classificação adoptado na esmagadora maioria de referências prende-se com a distância à costa do dispositivo, agrupando-os desta forma em:

- i. dispositivos costeiros (na nomenclatura inglesa: *shoreline*);
- ii. dispositivos próximos da costa (*near-shore*);
- iii. dispositivos afastados da costa (*offshore*).

A principal diferença entre os dispositivos próximos da costa e os afastados da costa resulta das profundidades envolvidas. No primeiro caso as profundidades serão normalmente inferiores a 20 m e os dispositivos serão assentes no fundo do mar, enquanto no segundo caso rondarão os 50 m e os dispositivos serão flutuantes. É importante notar que o regime de ondas é mais energético em profundidades de 50 m do que em profundidades de 20 m, havendo, por este lado, vantagem em colocá-los em profundidades superiores. Assim, quando o leitor for confrontado com a classificação genérica de "distância à costa" deve ter presente que o factor preponderante é a profundidade evidenciada a essa distância e não o valor da distância à costa em si.

Uma outra classificação é plausível, classificação essa que está associada ao modo de conversão de energia das ondas em energia eléctrica (isto é, ao tipo de dispositivo). Temos assim três classes<sup>5</sup> principais de dispositivos de conversão de energia das ondas, que podem ser de:

- a. coluna de água oscilante, CAO (*OWC - Oscillating Water Column*);
- b. corpos flutuantes, podendo ser de absorção pontual (*Point Absorbers*) ou progressivos (*Surging devices*);
- c. galgamento (*Overtopping devices*).

Como veremos mais à frente estas duas classificações podem ser associadas de forma coerente e lógica, pelo que será seguida a primeira e será mencionada a segunda sempre que se justifique. Estas e outras questões serão abordadas à medida que as diferentes tecnologias forem sendo apresentadas.

---

<sup>5</sup> Uma descrição destas classes será efectuada à medida que as mesmas forem apresentadas.

## 3.2. Dispositivos costeiros

Os dispositivos costeiros são aqueles que se encontram fixos ou que são construídos de raiz na orla costeira. Esta proximidade confere-lhes vantagens imediatas, tais como uma maior facilidade de instalação e manutenção, ausência de grandes extensões de cabos submarinos e de sistemas de fixação complexos, mas retiram-lhes a possibilidade de usufruírem dos regimes mais poderosos de ondas, característicos de zonas de grande profundidade. De facto os efeitos de dissipação de energia devidos ao atrito (fruto da interacção entre a onda e o fundo do mar) manifestam-se para profundidades inferiores a 80 m e os associados à rebentação das ondas são dominantes para profundidades inferiores a 10 m, pelo que em média um dispositivo costeiro tem apenas disponível entre 25% e 50% do recurso disponível para um dispositivo afastado da costa (ETSU, 2001)<sup>6</sup>. Esta limitação pode ser parcialmente eliminada no processo de selecção do local de implementação do dispositivo, procurando-se zonas onde existe uma concentração natural de energia<sup>7</sup>. Outra limitação relevante prende-se com as preocupações ao nível dos impactes ambientais (nomeadamente na salvaguarda do meio envolvente do dispositivo). Dentro da classe dos dispositivos costeiros aquela que se destaca, pelo número de aplicações e pela investigação de que foi alvo, é a dos dispositivos de coluna de água oscilante (CAO), denominados na nomenclatura Inglesa por *OWC (Oscillating Water Column)*, que serão descritos em 3.2.1..

### 3.2.1. Dispositivos de coluna de água oscilante (CAO)

Os dispositivos de coluna de água oscilante (CAO) consistem basicamente em estruturas ocas parcialmente submersas, que se encontram abertas para o mar abaixo da superfície livre da água do mar (ver Figura 3.2.1). O processo de geração de electricidade segue duas fases: quando uma onda entra na estrutura o ar que se encontrava dentro dela é forçado a passar por uma turbina, como consequência directa do aumento de pressão na "câmara de ar". Quando a onda regressa ao mar o ar passa novamente na turbina, desta vez no sentido inverso, dada a pressão inferior no interior da "câmara de ar". Para aproveitar ambos estes movimentos de sentidos opostos a turbina utilizada é, normalmente, do tipo Wells<sup>8</sup>, que possui a propriedade de manter o sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento. O grupo turbina/gerador é o responsável pela produção de energia eléctrica.

Os dispositivos de CAO têm sido instalados um pouco por todo o mundo. Por exemplo em 1985 um dispositivo de 500 kW foi instalado em Tofteshallen, na Noruega, tendo funcionado durante 3 anos, sendo destruído por uma tempestade em 1988 (White, 1989). Em 1991 foi instalado um protótipo de 150 kW num quebra-mar de um porto indiano (Ravindran et al., 1995). Os dados recolhidos durante o seu funcionamento permitiram efectuar melhoramentos no local, surgindo assim a proposta para a construção de 10 destes dispositivos na costa oeste da Índia, perfazendo uma potência de 1.1 MW. Outro programa bastante activo numa fase inicial foi o japonês, com dispositivos de CAO a serem instalados no porto de Sakata, em quebra-mares em Kujukuri-Cho e ainda em Haramachi, onde pela

---

<sup>6</sup> Nas costas britânicas a plataforma continental é muito mais extensa e a dissipação por atrito no fundo tem mais peso. A dissipação por rebentação é a mais importante, pelo que os dispositivos devem ser colocados fora da zona de rebentação.

<sup>7</sup> Na nomenclatura Inglesa estas zonas tomam o nome de *hot spots*.

<sup>8</sup> Inventada pelo Prof. Allan Wells da Queen's University of Belfast (Reino Unido) em 1976.

primeira vez foram utilizadas válvulas rectificadoras com o objectivo de controlar o escoamento de ar de e para a turbina, permitindo uma produção de energia estável (Hotta, 1995; Miyazaki, 1993)<sup>9</sup>. Salienta-se que alguns destes dispositivos (nomeadamente os associados a estruturas costeiras como quebra-mares) são considerados dispositivos fixos próximos da costa, uma categoria que será analisada em detalhe em 3.3.

Serão seguidamente apresentados os dois exemplos actuais que melhor ilustram os dispositivos de CAO costeiros: a central piloto europeia da ilha do Pico, Açores, e a central LIMPET, na ilha de Islay, Escócia.



Figura 3.2.1  
Esquema de uma central de coluna de água oscilante (cortesia Wavegen)

### 3.2.2. Central piloto europeia da ilha do pico

A central piloto europeia da ilha do Pico (doravante mencionada como central do Pico) surge como o culminar das acções iniciadas em 1991 pela comissão europeia no âmbito de acções de investigação e desenvolvimento na temática da energia das ondas. Estas acções visavam, numa primeira fase, a selecção de um local num dos países comunitários para a implementação da primeira central piloto europeia do tipo CAO (Falcão et al., 1993). O arquipélago dos Açores apresenta condições muito propícias para aproveitamento da energia das ondas (Falcão, 2000), quer pela sua localização numa zona onde existe um elevado recurso energético, quer pelo facto de não existir uma plataforma continental responsável pela dissipação de energia das ondas por atrito no fundo, característica patente nas ilhas vulcânicas. O facto da amplitude de maré ser pequena (menos de metade da amplitude no continente Português) foi decisivo para a escolha final que recaiu sobre Porto Cachorro, na costa noroeste da ilha do Pico<sup>10</sup>.

Nesta zona a costa termina em falésias rochosas de origem vulcânica muito recortadas, tendo sido escolhido para implantação da estrutura uma reentrância com cerca de 15 m de largura. Este local está exposto à direcção dominante da agitação marítima apresentando uma acentuada concentração natural de energia sobretudo por efeitos de difracção (Brito e Melo, 2000). O projecto, que culminou

<sup>9</sup> Note-se que as turbinas Wells não requerem válvulas rectificadoras para controlar a produção de energia.

<sup>10</sup> Ilha do Pico: localização - grupo central do arquipélago dos Açores; população - 15 000 habitantes; área - 447 km<sup>2</sup>

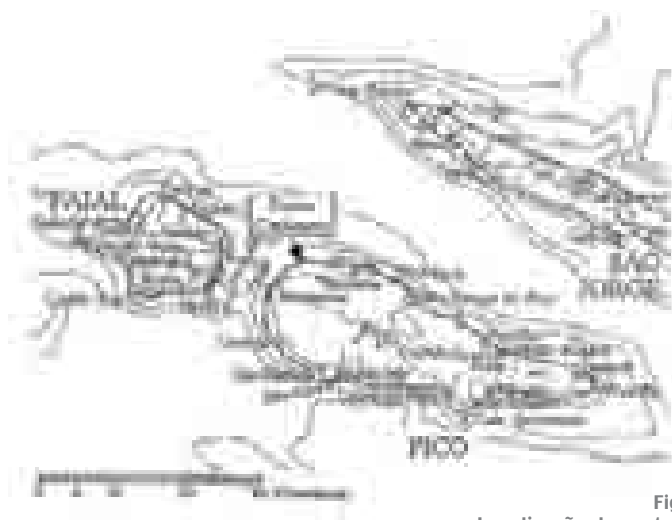
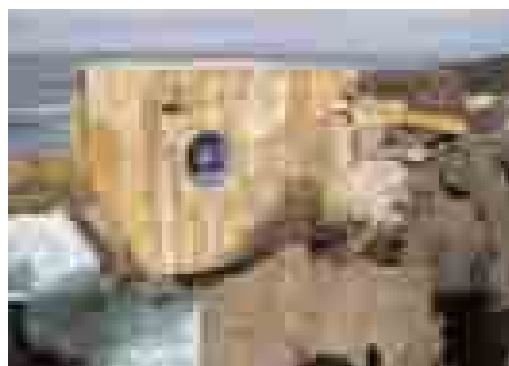


Figura 3.2.2  
Localização da central do Pico

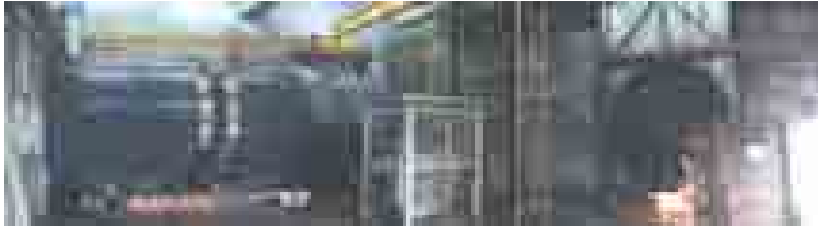
com a construção da central, cuja potência é de 400 kW, foi desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico, que o coordenou, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, Electricidade dos Açores E.P., Electricidade de Portugal S.A., Efacec Sistemas de Electrónica S.A. e Profabril Centro de Projectos S.A.. O projecto teve ainda a colaboração de duas instituições universitárias estrangeiras: a Queen's University of Belfast (Reino Unido) e a University College Cork (Irlanda).

A central encontra-se assente no fundo, em águas com cerca de 8 m de profundidade, com uma secção em planta de dimensões interiores de 12 x 12 m<sup>2</sup>, ao nível médio das águas do mar (Falcão, 2000). A parede frontal apresenta uma inclinação de 30° em relação à vertical. A central foi inserida numa reentrância da costa, apoiada num rochedo do lado poente, tendo sido construída no local ao abrigo de uma protecção provisória (Brito e Melo, 2000).

A estrutura engloba a câmara pneumática e zonas projectadas para instalação do equipamento turbo-eléctrico. As Figuras 3.2.3, 3.2.4 e 3.2.5 mostram uma vista lateral, traseira e interior da central, respectivamente.

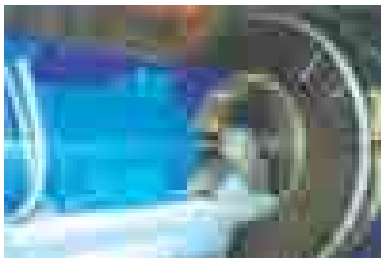


Figuras 3.2.3 e 3.2.4  
Central piloto europeia de energia das ondas do Pico (vista lateral)

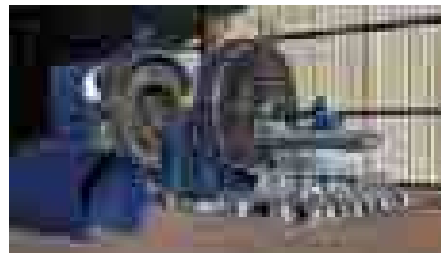


**Figura 3.2.5**  
Central piloto europeia de energia das ondas do Pico (vista interior)

A turbina da central do Pico é do tipo Wells. O gerador eléctrico está directamente acoplado à turbina (Figura 3.2.6) com uma velocidade de rotação variável, limitada inferiormente pela velocidade síncrona (750 r.p.m.) e superiormente pelo dobro deste valor.



**Figura 3.2.6**  
Turbina Wells e gerador  
instalados na central do Pico



**Figura 3.2.7**  
Turbina Wells da central do Pico  
na fase de construção

A central tem também uma válvula de guilhotina que se encontra na entrada da conduta de ar que liga a câmara ao exterior, cuja finalidade é isolar a turbina durante os períodos de paragem. Foi também projectada uma válvula de alívio de actuação rápida que tem por finalidade controlar o valor máximo da pressão no interior da câmara, evitando caudais excessivos na turbina, que induziriam a sua entrada em perda com a correspondente queda de rendimento. A central dispõe de um sistema de controlo para executar as operações de arranque e paragem da central, paragens de emergência e registo de eventos que possam ocorrer. Refira-se que a central do Pico foi o primeiro dispositivo no mundo a introduzir electricidade produzida pela conversão de energia das ondas numa rede eléctrica, embora tal tenha ocorrido apenas pontualmente e durante a fase de ensaios.

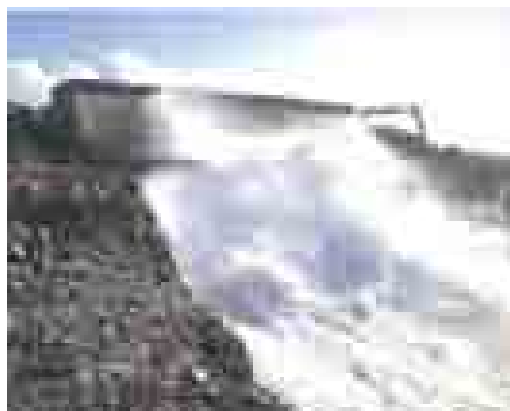
Os testes na central do Pico iniciaram-se no verão de 1999 e estenderam-se, com interrupções significativas, até 2001, em resultado de deficiências várias, sobretudo ao nível do equipamento mecânico auxiliar. Está actualmente em curso a recuperação desta central, no âmbito das actividades do Centro de Energia das Ondas. Os ensinamentos, lições e experiência adquirida neste projecto constituem uma valiosa contribuição para o desenvolvimento de futuras centrais de energia das ondas em Portugal.

### 3.2.3. Central LIMPET

A central LIMPET (sigla de Land Installed Marine Power Energy Transmitter) surgiu como a continuação natural do sucesso de um protótipo de 75 kW que se encontrava instalado na ilha escocesa de Islay, onde se localiza a central. A central LIMPET é o primeiro dispositivo de conversão de energia das ondas a ser explorado comercialmente no Reino Unido (operacional desde Novembro de 2000). Foi desenvolvido por uma empresa escocesa, a Wavegen<sup>11</sup> (a mesma que forneceu o equipamento mecânico para a central do Pico), em conjunto com a Queen's University of Belfast, o Instituto Superior Técnico, a comissão Europeia e a Charles Brand Engineering. Com uma potência nominal de 500 kW a central pode fornecer electricidade a cerca de 400 habitações. A sua localização permite-lhe receber cerca de 20 kW por metro de frente de onda incidente, valor ligeiramente superior ao equivalente para a central do Pico (Falcão, 2000). Nas Figuras 3.2.8, 3.2.9 e 3.2.10 são apresentadas a fase de montagem da turbina da central LIMPET e duas vistas da mesma central, respectivamente. Note-se que relativamente à central do Pico a central LIMPET apresenta algumas diferenças ao nível do equipamento, que fogem no entanto à natureza desta publicação.



Figura 3.2.8  
Turbina da central LIMPET na fase de construção  
(cortesia Wavegen)



Figuras 3.2.9 e 3.2.10  
Vistas da central LIMPET (cortesia Wavegen)

<sup>11</sup> <http://www.wavegen.co.uk>

Refira-se ainda que a ilha de Islay apresentou-se como candidata natural à implementação desta central (e do protótipo que a antecedeu) não só pelas condições naturais no que diz respeito ao clima de ondas mas também ao acesso fácil à central, ao facto de uma parcela importante da electricidade consumida ser importada da Escócia (não é gerada na própria ilha) e ainda ao entusiasmo da população local face às energias renováveis, com especial incidência na energia das ondas. À semelhança da central do Pico, mas ainda com maior relevância, os custos relacionados com a construção da estrutura foram responsáveis pelo encarecimento do projecto, sendo no entanto passíveis de reduções massivas no futuro.

### 3.2.4. Outras centrais: a Energetech OWC

Uma outra central de CAO em desenvolvimento na actualidade é a central da Energetech, uma empresa australiana. Esta central conta ainda com um parede parabólica (ver Figura 3.2.12) que visa concentrar a energia proveniente das ondas. Uma central deste tipo, com uma potência de 300 kW, encontra-se em fase de projecto, estando a sua instalação prevista para Port Kembla (80 km a sul de Sydney). Esta tecnologia ganhou recentemente um concurso (juntamente com o Pelamis, da Ocean Power Delivery) da British Columbia (BC) Hydro para o fornecimento de 4 MW de electricidade a uma localidade canadiana.



Figura 3.2.11  
Antevisão artística da Energetech OWC  
(cortesia Energetech)

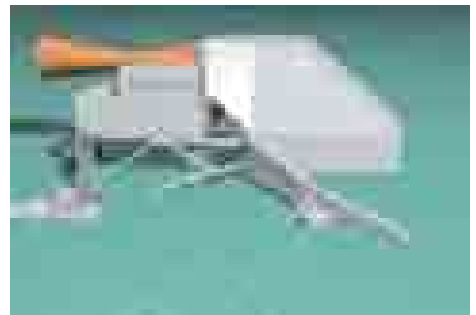


Figura 3.2.12  
Imagem gerada por computador do sistema de CAO da Energetech em Port Kembla  
(cortesia Energetech)

## 3.3. Dispositivos próximos da costa

Como já foi mencionado o conceito de "proximidade" da costa deve ser interpretado em termos da profundidade evidenciada em zonas mais ou menos afastadas da costa. Desta forma os dispositivos do tipo CAO instalados em quebra-mares, referidos em 3.2.1, podem ser englobados nesta categoria, dado que um quebra-mar ou um molhe não constitui uma linha de costa natural (não será correcto falar assim em dispositivos costeiros). A incorporação de dispositivos nestas estruturas tem vantagens adicionais, pois elas já existem em muitos casos e uma estrutura adicional pode até reforçar o seu objectivo inicial (por exemplo protecção costeira).

Dado o carácter introdutório deste texto será apresentado um dispositivo do tipo CAO que pode ser genericamente englobado nesta categoria, o OSPREY, sendo também referida a central a construir num quebra-mar na Foz do Douro.

### 3.3.1. OSPREY

O OSPREY (Ocean Swell Powered Renewable Energy) foi desenvolvido em meados da década de 1990 pela empresa escocesa Wavegen, como sistema isolado de CAO, para ser colocado próximo da costa, em águas de 20 m de profundidade. Era constituído por uma estrutura metálica de parede dupla, que deveria ser rebocada até ao local de instalação, onde seria afundada através do enchimento das suas paredes ocas, com materiais densos, ficando assente no mar. A ocorrência de um acidente na fase de afundamento levou à interrupção do projecto. Existem planos para recuperar este projecto, associando uma turbina eólica *offshore* a uma destas centrais (ver Figuras 3.3.2).

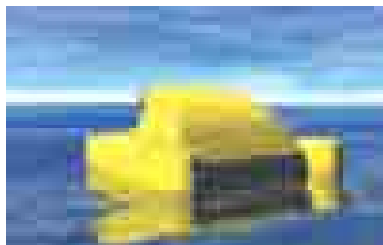


Figura 3.3.1  
Antevisão artística do OSPREY



Figura 3.3.2  
Modelo do OSPREY com a inclusão do aerogerador para aproveitamento eólico

### 3.3.2. CEO Douro

A CEO (Central de Energia das Ondas) Douro resulta de uma proposta submetida pela Consulmar ao programa IDEIA do PRIME, na qual se encontra envolvido o Centro de Energia das Ondas entre outras entidades. O projecto pretende desenvolver e implementar uma central de CAO na cabeça do molhe da Foz do Douro (ver Figuras 3.3.3 e 3.3.4). A participação do Centro de Energia das Ondas passa pelos ensaios laboratoriais em tanque de ondas (especificação do modelo e dos ensaios, acompanhamento dos ensaios e análise de resultados), especificação preliminar do equipamento de produção de energia (grupo turbo-gerador) e pela avaliação da produção anual de energia. Esta proposta foi recomendada para financiamento em resultado da avaliação dos peritos, esperando-se para meados de 2004 a confirmação do financiamento e a formalização do respectivo contrato.



Figura 3.3.3  
Antevsão artística do molhe da foz do Douro

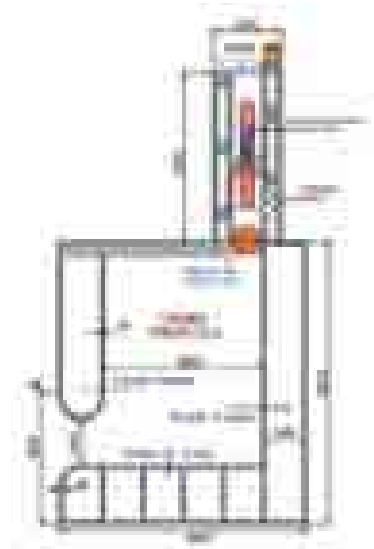


Figura 3.3.4  
Desenho esquemático da CEO Douro

### 3.4. Dispositivos afastados da costa

A última classe de dispositivos de conversão de energia das ondas analisada neste capítulo é a mais recente (daí estes dispositivos serem por vezes mencionados como de terceira geração) e aquela que permite beneficiar dos regimes de ondas mais poderosos, característicos de zonas de elevada profundidade. Estes regimes acarretam no entanto um desafio tecnológico mais elevado. Para conseguirem extrair o máximo de energia possível estes dispositivos precisam de estar à (ou perto da) superfície, requerendo desta forma sistemas de amarração (flexíveis ou rígidos) e cabos submarinos para a transferência para terra da energia eléctrica produzida. Os custos e as perdas associados a esta transferência são suplantados por uma maior "produção" de energia, aumentando desta forma a relação Energia Produzida/Custos Associados (ETSU, 2001). O conceito generalizado na actualidade passa pela implementação de parques de diversos dispositivos quando o objectivo é a produção de energia eléctrica em larga escala.

Serão apresentados em detalhe três casos concretos (Archimedes Wave Swing, Pelamis e Wave Dragon) e ainda referidos outros considerados relevantes. É de realçar que estes três dispositivos convertem de modos diferentes a energia das ondas (ver 3.1), pelo que será dada, caso a caso, uma breve descrição sobre o tipo de dispositivo e o modo de conversão de energia das ondas.

#### 3.4.1. Archimedes Wave Swing

O Archimedes Wave Swing é um dispositivo de conversão de energia das ondas da classe dos corpos flutuantes (absorção pontual), desenvolvido pela Teamwork Technology<sup>12</sup> (Países Baixos), tendo o seu desenvolvimento sido iniciado em 1994. Este sistema, esquematicamente representado na

<sup>12</sup> <http://www.waveswing.com>

Figura 3.4.1, é formado por dois cilindros ocos, colocados um sobre o outro, no interior dos quais há ar pressurizado a uma pressão tal que equilibra o peso do cilindro superior (o flutuador) e da coluna de água exterior que ele sustenta. Com a passagem da onda a pressão exterior varia, sendo mais alta nas cristas e menor nas cavas, produzindo um movimento oscilatório vertical do flutuador relativamente à base.

Este movimento é utilizado para accionar um gerador eléctrico linear que produz energia eléctrica transmitida por um cabo submarino para uma estação em terra, onde a energia é transformada de modo a poder ser injectada na rede eléctrica. Com um diâmetro de 10 a 15 m, muito inferior ao comprimento de onda (cerca de 150 m), o AWS pode pois ser considerado um dispositivo de absorção pontual.

Uma central piloto à escala 1:2, com potência nominal de 2 MW, foi submersa em meados de 2004 ao largo da Póvoa de Varzim. Refira-se que a portaria n.º 1357/2003, de 13 de Dezembro, concede à OCEANERGIA - Projecto de Produção de Energia das Ondas, Unipessoal, Lda., o direito à implantação desta central piloto (ver Figuras 3.4.2, 3.4.3 e 3.4.4).

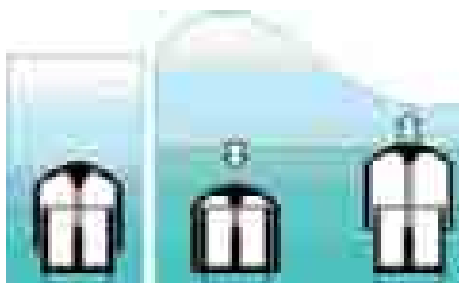


Figura 3.4.1  
Princípio de funcionamento do AWS

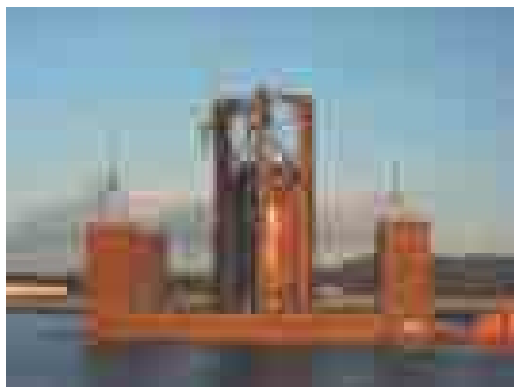


Figura 3.4.2  
Central piloto do AWS em águas portuguesas  
(cortesia AWS BV)

Note-se que esta central piloto diverge do dispositivo final na forma como se encontra fixo ao fundo do mar: enquanto nesta instalação é utilizada uma plataforma de apoio, o dispositivo final, cuja potência nominal unitária será próxima dos 5 MW, será fixo provavelmente recorrendo a cabos de amarração, como ilustram as antevisões artísticas das Figuras 3.4.5 e 3.4.6.

É de salientar que desde 1997 o IST colabora no desenvolvimento deste sistema, nomeadamente na estabilização do conceito e no desenvolvimento dos ensaios em laboratório, dos modelos matemáticos de simulação, na definição de uma nova estratégia de submersão e dos ensaios a realizar após o afundamento do sistema. No âmbito desta colaboração foram realizadas três teses de mestrado no país. Para o sucesso desta colaboração foi essencial a experiência adquirida nos estudos relativos à central de CAO do Pico.



Figura 3.4.3  
Perspectiva da central piloto do AWS em construção  
(cortesia AWS BV)



Figura 3.4.4  
Central piloto do AWS no porto de Leixões  
(cortesia AWS BV)

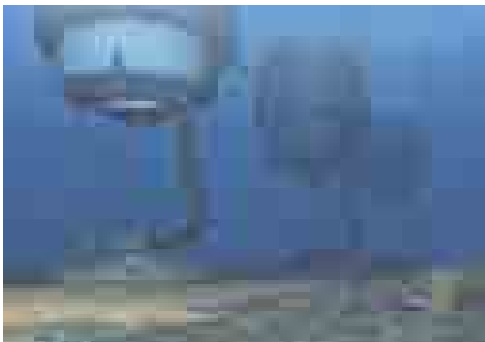


Figura 3.4.5  
Antevisão artística do AWS da próxima geração  
(cortesia AWS BV)



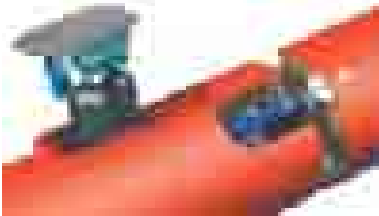
Figura 3.4.6  
Antevisão artística do AWS da próxima geração  
(cortesia AWS BV)

### 3.4.2. Pelamis

O Pelamis é um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo progressivo, desenvolvido pela Ocean Power Delivery Ltd<sup>13</sup> (Escócia), empresa fundada em 1998 com o intuito de o desenvolver e explorar comercialmente. Os dispositivos progressivos são sistemas alongados com uma dimensão longitudinal da ordem de grandeza do comprimento de onda e estão dispostos no sentido de propagação da onda, de modo a gerarem um efeito de bombeamento progressivo, associado à passagem da onda, por acção de um elemento flexível em contacto com a água. O Pelamis consiste basicamente numa estrutura articulada semi-submersa composta por diferentes módulos cilíndricos que se encontram unidos por juntas flexíveis.

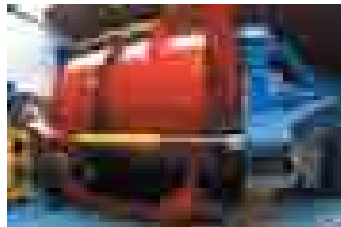
O movimento ondulatório das ondas incidentes provoca a oscilação dos módulos cilíndricos em torno das juntas que os unem e dessa forma a pressurização de óleo que será forçado a passar por motores

<sup>13</sup> <http://www.oceanpd.com>



Figuras 3.4.7 e 3.4.8  
Detalhe das  
juntas flexíveis do Pelamis  
(cortesia OPD Ltd)

hidráulicos, que por sua vez accionam geradores eléctricos que produzem electricidade. Cada dispositivo contará com quatro tubos circulares e três módulos de conversão de energia, esquematizados na Figura 3.4.9, perfazendo uma capacidade unitária do dispositivo igual a 750 kW, sendo o seu comprimento à escala 1:1 de 120 m e o diâmetro externo igual a 3.5 m. O programa de testes do Pelamis incluiu ensaios laboratoriais com diversos modelos (cujas escalas oscilaram entre 1:80 e 1:7). Em 23 de Fevereiro de 2004 foi anunciado que seria iniciado o ensaio de um dispositivo à escala real (ver Figura 3.4.13), o que foi concretizado muito recentemente.



Figuras 3.4.9 e 3.4.10  
Detalhe e vista lateral do módulo de conversão de energia do Pelamis  
(cortesia OPD Ltd)

O Pelamis foi concebido tendo em mente a sua implementação em parques, pelo que não é de estranhar o facto de a energia extraída de todos os módulos (três em cada dispositivo) ser retirada e enviada para terra através de um único cabo, algo particularmente relevante se tivermos um número elevado de dispositivos presentes (numa perspectiva de minimização de custos). Outras variáveis importantes na concepção do Pelamis foram por um lado a tentativa de utilização de componentes já existentes na indústria *offshore*, pois foi do entendimento da empresa que uma vez que fique claro que o dispositivo é viável essa mesma indústria irá produzir componentes mais eficientes e a um custo extraordinariamente mais reduzido do que o actual, e por outro lado a sobrevivência do dispositivo, que foi identificada como parâmetro fulcral em todo o processo de desenvolvimento, prioritário até sobre as tentativas para melhorar a eficiência de conversão de energia.

Uma das componentes importantes do Pelamis é o seu sistema de fixação ao fundo do mar, que dadas as características do dispositivo assume um relevância fundamental (ver Figura 3.4.11).

A antevisão artística representada na Figura 3.4.12 refere-se a um parque de 40 dispositivos (30 MW instalados), que, ocupando uma área de 1 km<sup>2</sup>, poderia ser responsável pelo abastecimento de 20 000 habitações, de acordo com os dados fornecidos pela empresa.



Figura 3.4.11  
Esquema do sistema de fixação do Pelamis  
(cortesia OPD Ltd)



Figura 3.4.12  
antevisão artística de um parque de Pelamis  
(cortesia OPD Ltd)



Figura 3.4.13  
Lançamento do primeiro Pelamis à escala 1:1  
(cortesia OPD Ltd)

### 3.4.3. Wave Dragon

O Wave Dragon é um dispositivo de conversão de energia das ondas que pode ser considerado como um dispositivo de galgamento afastado da costa (*offshore*), constituindo assim um exemplo da única classe que até agora não tinha sido focada. O desenvolvimento deste dispositivo está a ser efectuado pela Wave Dragon ApS<sup>14</sup>, um consórcio internacional que engloba empresas e instituições da Dinamarca, Reino Unido, República da Irlanda, Suécia, Áustria e Alemanha.

Com uma potência nominal que pode ir dos 4 aos 11 MW (consoante o clima de ondas) o Wave Dragon foi o primeiro dispositivo afastado da costa a, em Junho de 2003, introduzir electricidade numa rede eléctrica, em Nissum Bredning, Dinamarca, através do teste de uma central piloto construída à escala de 1:4,5 (potência instalada de 20 kW). O sistema consiste basicamente em dois reflectores que focam as ondas incidentes para uma rampa, um reservatório que armazena a água que entretanto galgou a rampa e ainda de um determinado número de turbinas de baixa queda, através das quais a energia eléctrica é produzida (ver Figura 3.4.14a). O Wave Dragon pode ser comparado a uma mini-

<sup>14</sup> <http://www.wavedragon.net>

hídrica flutuante, pois o seu princípio de funcionamento é em tudo semelhante ao de um aproveitamento hidroeléctrico convencional.



Figura 3.4.14a  
princípio de funcionamento do Wave Dragon  
(cortesia Wave Dragon ApS)

O protótipo (escala 1:4,5) que se encontra agora em funcionamento segue um programa de testes laboratoriais iniciado em 1998, na Universidade de Aalborg. Os planos actuais passam pela concepção, num horizonte temporal de 2 a 3 anos, de um dispositivo à escala real com potência nominal de 7 MW, sendo o clima de ondas de referência o do Atlântico (36 a 40 kW/m). Em Portugal está em fase inicial de desenvolvimento um sistema de galgamento fixo a ser instalado junto à costa, patenteado pela empresa portuguesa ENERWAVE.

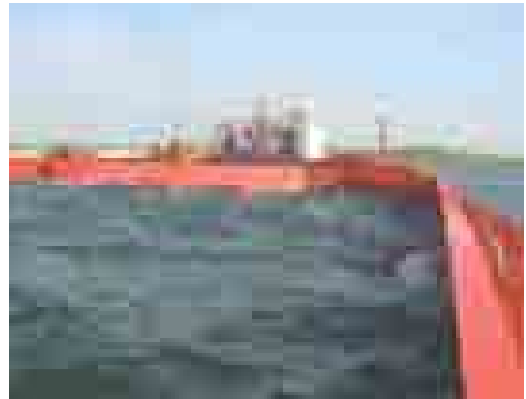


Figura 3.4.14b  
Wave Dragon visto de um dos reflectores  
(cortesia Wave Dragon ApS)



figura 3.4.15  
Wave Dragon em funcionamento  
(cortesia Wave Dragon ApS)

### 3.4.4. Mighty Whale

A relevância da inclusão deste dispositivo neste livro prende-se com o esforço desenvolvido em termos de demonstração da tecnologia que ele possui. Pelo seu carácter flutuante o sistema pode ser ancorado em diversas profundidades, o que justifica a sua inclusão nesta secção pois em maiores profundidades poderia beneficiar de um regime de ondas mais poderoso. A investigação no domínio da energia das ondas iniciou-se no Japão na década de 1940, com as experiências do Comandante Yoshio Masuda, que atingiram em 1970 escalas consideráveis. Por volta desta década a JAMSTEC (Japan Marine Science and TEchnology Center) desenvolveu um protótipo flutuante de nome Kaimei, que foi testado no mar sob a observação da Agência Internacional de Energia. Na década seguinte a JAMSTEC virou as suas atenções para um dispositivo costeiro de CAO instalado em Sanze, na prefeitura de Yamagata. Os estudos realizados nesta instituição a partir de 1987 referem-se ao Mighty Whale (ver Figuras 3.4.16, 3.4.17 e 3.4.18), que deve o seu nome ao seu perfil transversal. O Mighty Whale é um dispositivo de CAO flutuante, desenvolvido pela JAMSTEC para operar ao largo da costa e cuja aplicação estava destinada ao fornecimento de energia a pisciculturas instaladas nas águas calmas que ficariam a jusante dos dispositivos. Outros objectivos eram os da purificação da água do mar e o de permitir actividades de recreio nas zonas de águas tranquilas entretanto criadas. O protótipo ancorado a uma profundidade de 40 m perto da baía de Gokasho operou entre 1998 e 2002, e tinha previsto uma capacidade máxima de extracção de energia de 110 kW (Pizer, 1998). O dispositivo mostrou, no entanto, uma eficiência baixa. Note-se a este propósito que a densidade de energia das ondas no Japão é muito baixa e inferior ao que se considera o limiar necessário para atingir a viabilidade económica.

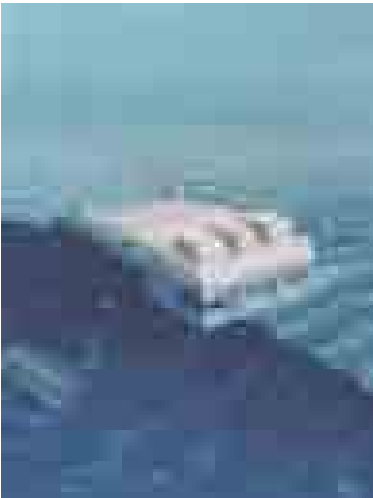


figura 3.4.16  
antevisão artística do Migthy Whale



Figura 3.4.17  
Mighty Whale pronto para o lançamento ao mar  
(Março de 1998)



Figura 3.4.18  
Mighty Whale pronto para o lançamento ao mar  
(Março de 1998)

### 3.4.5. Outros dispositivos: perspectivas futuras

Como já foi referido a natureza das tecnologias de conversão de energia das ondas não permite afirmar que as soluções até agora apresentadas serão as únicas num futuro mais ou menos próximo. Como exemplo disso temos a conferência da British Wind Energy Association (BWEA) sobre energia das ondas e das marés realizada em Bristol, a 11 de Fevereiro de 2004, onde um importante comunicado foi efectuado pelo Carbon Trust, uma empresa independente fundada pelo governo do Reino Unido cujo objectivo é o de fomentar uma economia capaz de responder ao desafio que é apresentado pela necessidade de reduzir as emissões de dióxido de carbono, conseguindo simultaneamente aproveitar as oportunidades que são introduzidas pelo mercado das energias renováveis. O Carbon Trust irá trabalhar com oito empresas com a meta de tornar o Reino Unido o líder nas tecnologias de conversão de energia das ondas. São elas a Clearpower Technologies (WaveBob), a Ocean Power Delivery (Pelamis), a SeaVolt Technologies (Wave Rider), a AquaEnergy

(AquaBuOY), a Lancaster University (PS Frog), a Evelop (Wave Rotor), a Embley Energy (Sperboy) e a Wave Dragon ApS (Wave Dragon). O Carbon Trust irá ainda desenvolver estudos complementares, procurando estabelecer "códigos de boa engenharia" para estas e outras tecnologias da mesma natureza.

Muitos foram os dispositivos que chegaram a protótipo mas que não evoluíram para uma fase pré-comercial à semelhança daqueles que já foram apresentados. Em alguns casos a investigação continua, sendo injusto não referir um dos primeiros, cujo desenvolvimento prossegue na University of Edinburgh: o pato de Salter (Salter Duck). Foi um dos primeiros conceitos a ser introduzido no programa de energia das ondas do Reino Unido, tendo sido concebido em 1974 pelo Prof. Stephen Salter<sup>15</sup>. Mesmo no seu desenho actual este dispositivo requer um estudo mais aprofundado para provar a sua viabilidade. A sua importância está directamente relacionada com o carácter inovador que introduziu no meio científico.

---

<sup>15</sup> <http://www.mech.ed.ac.uk/research/wavepower/>



## 4. Economia da energia das ondas

Uma dos temas estudados recentemente no MARETEC - IST e no Centro de Energia das Ondas refere-se à economia da energia das ondas. A importância destes estudos é óbvia, e neste capítulo procuraremos apresentar uma breve análise introdutória a este tema, equacionando diversos cenários.

### 4.1. Custo unitário de potência instalada para condições de viabilidade económica

Dadas as incertezas actuais relativamente à economia do aproveitamento da energia das ondas, utilizar-se-á um modelo simples de análise económica, baseado no *método da anuidade*. Este método determina o custo anual do capital  $a$  em função da taxa de juro  $i$ , do capital inicial  $C$  e do período de amortização  $n$ ,

$$a = C \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \quad (1).$$

Para que uma dada central seja rentável, os proveitos anuais da venda de energia  $g$  devem suportar a anuidade e os custos de operação e manutenção. Expressando os custos de operação e manutenção como uma fracção  $x$  do capital investido, como é comum em projectos de sistemas energéticos, teremos,

$$g = a + xC \quad (2).$$

Por outro lado, os proveitos anuais da venda da energia são dados pelo produto da energia anualmente produzida  $p$  pela tarifa de venda  $s$ ,

$$g = ps \quad (3).$$

O custo de capital  $C$  pode ser expresso em termos da potência instalada  $P$  através do custo unitário de potência instalada  $b$ ,

$$C = bP \quad (4)$$

e a produção média anual de energia eléctrica (em MWh) pode ser referida à potência nominal do equipamento eléctrico (em MW) através de

$$p = hP \quad (5)$$

em que  $h$  é o número de horas equivalentes à potência nominal.

Combinando as equações anteriores obtém-se o custo unitário de potência instalada (em €/MW) compatível com as condições de viabilidade económica, isto é, aquele que permite que os proveitos

suportem os encargos financeiros e de manutenção,

$$b_0 = \frac{hs}{x + \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}}} \quad (6)$$

em que  $s$  vem expresso em €/MWh.

Para avaliar a bondade desta expressão iremos aplicá-la a um projecto típico de energia eólica e a outro de central minihídrica. A tabela seguinte indica os valores de referência das variáveis independentes que aparecem na equação (6) para os dois tipos de projectos e os valores de referência calculados para o investimento por unidade de potência instalada.

**tabela 4.1.1**  
Investimento por unidade de potência instalada obtido através do método da anuidade e sua comparação com os valores de referência para projectos típicos de energia eólica e de energia mini-hídrica

	Minihídrica	Eólica
Período amortização	9	9
Taxa de juro	0,03	0,03
Custo O&M (% investimento)	1	3
Nº de horas de funcionamento	2800	2300
Tarifa [€/kWh]	0,075	0,08
Inv. Máx. Fórmula [€/kW]	1517	1161
Inv. Típica Real [€/kW]	1500	1100

A Tabela 4.1.1 mostra que a equação (6) apresenta valores realistas do investimento por unidade de potência instalada para os dois tipos de projecto considerados, quando se utilizam dados de entrada típicos para os dois tipos de projecto.

Aplicando o mesmo valor para a taxa de juro a projectos de energia das ondas obtêm-se os valores da Tabela 4.1.2 para duas situações distintas:

- i) a actual tarifa de 0,225 €/kWh, correspondente a uma situação de tecnologia em fase inicial de desenvolvimento, caso em que se considerou razoável admitir um período de amortecimento de 13,5 anos, e
- ii) uma tarifa de 0,09 €/kWh, igual à mais elevada praticada em Portugal para a energia eólica, que se assume ser característica de uma situação de maturidade tecnológica, caso em que se toma o período de amortização considerado para as energias mini-hídrica e eólica.

Em ambos os casos se admitem 2190 horas de funcionamento e um custo anual de manutenção e operação de 8% do investimento, superior em 5% ao valor usado na energia eólica, devido à agressividade do ambiente marinho e ao sobrecusto associado às operações no mar.

Verificamos assim que, nas condições actuais, um projecto de energia das ondas será rentável se o custo de investimento não for superior a 2879 € por cada kW instalado. Como iremos ver essa não é, em geral, a situação actual. Contudo, quando (e se) a tecnologia ficar madura, o investimento

**tabela 4.1.2**  
**Investimento por unidade de potência instalada obtido através do método da anuidade para projectos de energia das ondas para a tarifa actual, correspondente a tecnologia em fase inicial de desenvolvimento, e tarifa para tecnologia madura**

	Ondas Tarifa actual	Ondas Tarifa Eólica alta
Período amortização	13,5	9
Taxa de juro	0,03	0,03
Custo O&M (% investimento)	8	8
Nº de horas de funcionamento	2190	2190
Tarifa [€/kWh]	0,225	0,09
Inv. Máx. Fórmula [€/kW]	2879	946

máximo não deverá ultrapassar o valor de 946 € por cada kW instalado se se pretender igualar a competitividade actual dos projectos de centrais eólicas mais caros, embora não seja possível assegurar que projectos de energia das ondas de menor rentabilidade que esta não venham a ser atractivos, por não haver outras alternativas para a produção de energia eléctrica através de fontes renováveis.

## 4.2. Investimento, produtividade e remuneração de um Parque de energia das ondas com 1 km de extensão

De seguida iremos caracterizar a economia de um parque de energia das ondas com 1 km de extensão. Tal não significa que esta seja a extensão adequada, mas tão somente que este é um valor de referência.

Designemos por  $\lambda$  o factor de carga (relação entre a potência média anual e a potência nominal de cada dispositivo), por  $\varepsilon$  a percentagem de energia incidente que em média pode ser convertida em energia eléctrica na rede e por  $F$  o fluxo médio de energia das ondas incidente em cada quilómetro de frente de onda, que para os fins em vista admitiremos que é idêntico ao que atravessa cada quilómetro ao longo da batimétrica sobre a qual estão colocados os dispositivos de extracção de energia.

A produção média anual de energia eléctrica será, então, dada por

$$p = \varepsilon F \quad (7)$$

a potência média instalada em cada quilómetro,

$$P = \frac{\varepsilon F}{\lambda} \quad (8)$$

e o respectivo investimento em condições de rentabilidade económica (ver equação (6)),

$$I = b_0 P \quad (9)$$

A remuneração anual resultante da venda de energia é dada pela equação (3), sendo o custo de operação e manutenção anual por cada quilómetro de utilização de energia das ondas dado por

$$OM = xI \quad (10)$$

**tabela 4.2.1**  
valores de referência por quilómetro de aproveitamento de energia das ondas.  
Os valores em Euros foram calculados admitindo um investimento por unidade de potência instalada e uma tarifa correspondentes a uma tecnologia madura

Fluxo médio de energia incidente em Portugal $F$ [MW/km]	30
Fracção de aproveitamento de energia incidente $\epsilon$	0,15
Factor de carga	0,25
Tarifa de venda de energia eléctrica [€/kWh]	0,09
Produção anual de energia eléctrica [GWh]	39
Potência média instalada [MW]	18
Investimento requerido [M€]	17
Remuneração anual do investimento [M€]	3,5
Custo anual de manutenção e operação [M€]	1,4

No estado actual do aproveitamento da energia das ondas é habitual tomar-se como valores de referência  $\epsilon = 0,15$  e  $\lambda = 0,25$ . No caso da costa Oeste portuguesa o fluxo médio de energia das ondas em águas de 50 metros de profundidade, onde se espera que o aproveitamento de energia das ondas em larga escala se realize, é  $F = 30$  MW/km. Utilizando estes valores obtêm-se os resultados apresentados na Tabela 4.2.1 para cada quilómetro de aproveitamento, admitindo as condições de investimento por unidade de potência instalada e de tarifa correspondentes a uma tecnologia madura. Note-se que uma parte significativa dos custos de operação e manutenção têm a ver com os sobrecustos decorrentes da agressividade do meio e da necessidade de realizar operações no mar. Assim, parte significativa destes custos terá um impacto directo na economia das regiões onde venha a ser realizado o aproveitamento.

### 4.3. Custo actual da tecnologia e investimento necessário para se atingir a viabilidade económica

Os estudos de viabilidade económica do aproveitamento da energia das ondas têm sido realizados sobretudo no Reino Unido (Thorpe, 2003) e são de uma forma geral bastante promissores, conforme se pode constatar das Figuras 4.3.1 e 4.3.2 que se apresentam e comentam de seguida. Estes estudos são baseados em dados fornecidos pelas empresas que desenvolvem os diversos sistemas de extracção de energia e em avaliações independentes. Contudo, como apenas nos últimos anos foram construídas as primeiras centrais para teste no mar e não se atingiu ainda uma fase industrial, ainda que incipiente, as estimativas apresentadas devem ser vistas com alguma cautela.

Sobre este aspecto, podem referir-se os gastos com as primeiras centrais construídas, referidas pelas empresas envolvidas no seu desenvolvimento, durante a 5ª Conferência Europeia de Energia das

Ondas, realizada em Cork, na Irlanda, em Setembro de 2003 e que se apresentam na Tabela 4.3.1. Faz-se notar que estes custos incluem o desenvolvimento e a engenharia das centrais em causa, que são protótipos e, portanto, pouco representativas do custo das unidades a construir no futuro.

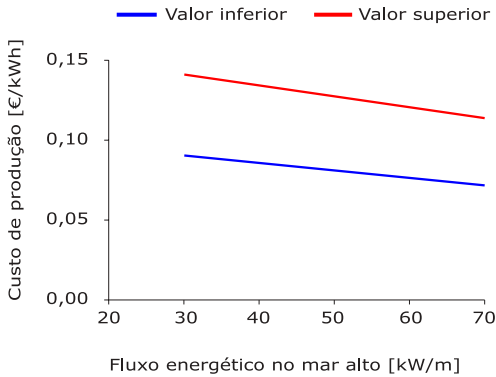


figura 4.3.1  
gama de custos de produção de energia eléctrica para centrais costeiras de coluna de água oscilante em função do fluxo médio de energia das ondas no alto mar (Thorpe, 2003).

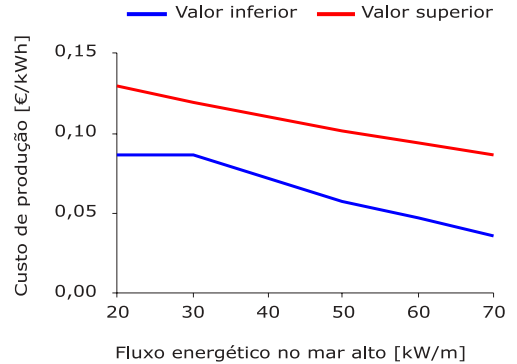


figura 4.3.2  
gama de custos de produção de energia eléctrica para centrais de absorção pontual (*point absorbers*) em função do fluxo médio de energia das ondas no alto mar (Thorpe, 2003).

	Potência Instalada [kW]	Custo [M€]
Central do Pico	400	5
Pelamis	750	15
AWS	1000	20
Wave Dragon	20	7,5

tabela 4.3.1  
custo e potência instalada de algumas das centrais piloto construídas.

O custo por unidade de potência instalada é bastante variável e muito elevado, sobretudo para o Wave Dragon (o que resulta deste ser uma instalação construída a uma escala 1:4,5 e, portanto, particularmente pouco representativo).

De acordo com o responsável pelo actual programa britânico de aproveitamento de energia das ondas, o custo actual é cerca de 5 M€ por cada MW instalado. Este valor, apresentado na conferência de Cork, não parece irrealista face ao exposto.

É sabido que o custo das tecnologias se reduz com a experiência acumulada. Numa fase inicial de desenvolvimento é comum assistir-se a uma redução de cerca de 20% do custo cada vez que duplica a potência instalada, tal como se verifica hoje na energia fotovoltaica. Em fases mais avançadas do

desenvolvimento esta taxa de redução tende a ser menor, podendo atingir 10%, como no caso da energia eólica.

Designando por  $r$  a redução de custo por cada duplicação da potência instalada, a evolução de custos acima indicada é representada matematicamente pela seguinte curva de experiência,

$$b_m = b_1 m^a \quad (11)$$

em que  $a = \ln(1 - r) / \ln 2$ ,  $b_m$  é o custo unitário de potência instalada após instalar  $m$  MW e ( $b_1$ ) o custo do primeiro MW instalado. A viabilidade económica atinge-se quando o custo unitário de potência instalado atinge o valor  $b_0$  dado pela equação (6), ou seja, quando for instalada uma potência de  $M$  MW, dada por

$$M = \left( \frac{b_0}{b_1} \right)^{1/a} \quad (12)$$

resultado que se obtém utilizando a equação (11).

Até se atingir viabilidade económica, ou seja a potência instalada  $M$ , parte do investimento realizado não é compensado pela venda de energia eléctrica à tarifa correspondente a uma tecnologia madura, sendo esse valor, por cada unidade de potência instalada, dado por  $b_m - b_0$ . Esta parcela de investimento poderá ser considerada como um subsídio, que pode ter origem pública ou origem privada. No primeiro caso pode ser resultante de uma tarifa artificial (como no caso previsto pela legislação portuguesa), ou de subsídios ao investimento (como os que possam resultar de projectos submetidos ao PRIME ou à Comissão Europeia). O volume total de subsídio acumulado até se atingir viabilidade económica será, então, dado por,

$$V = \int_0^M (b_1 m^a - b_0) dm = \frac{b_1}{1+a} M^{1+a} - b_0 M \quad (13)$$

Após se atingir a viabilidade económica o custo da tecnologia continuará a baixar, eventualmente a uma taxa  $r$  menor, passando a haver um lucro, por cada unidade de potência instalada, dado por  $b_0 - b_m$ . O subsídio acumulado  $V$  será reembolsado depois de ser instalada uma potência  $N$  que se obtém através de

$$V = \int_M^N (b_0 - b_1 m^a) dm \quad (14)$$

de onde se tira que

$$N = \sqrt[1+a]{1+a} M \quad (15)$$

Note-se que os valores de  $V$ ,  $M$  e  $N$  obtidos não correspondem apenas ao que vier a ser feito no País, mas ao esforço internacional nesta área.

Admitindo que a redução do custo da tecnologia com a duplicação da potência instalada é de 15% até se atingir viabilidade económica compatível com a tarifa para tecnologias maduras e de 10% após esta, obtêm-se os valores apresentados na Tabela 4.3.2..

$b_0$ - Custo do MW instalado em condições de viabilidade económica	0,95 M€/MW
$b_1$ - Custo do 1º MW instalado	5 M€/MW
$M$ - Potência a instalar para se atingir viabilidade económica	1215 MW
$V$ - Volume total de subsídio requerido para se atingir viabilidade económica	352 M€
$N$ - Potência a instalar para recuperar o subsídio $V$	3102 MW

**tabela 4.3.2**  
valores de potência a instalar e subsídio acumulado para se atingir condições de viabilidade económica comparável aos projectos de energia eólica mais caros (tarifa de 0,09 €/kWh) e potência a instalar para recuperar o subsídio acumulado

Utilizando o valor referido na Tabela 4.2.1, indicativo para a costa ocidental portuguesa, de 18 MW instalados por quilómetro, seria necessário aproveitar cerca de 67,5 km de costa para se atingirem custos de produção de energia semelhantes aos das centrais eólicas. A extensão de costa necessária aproveitar para se recuperar o subsídio seria de 172 km. Contudo, como o esforço de desenvolvimento desta tecnologia não será feito apenas em Portugal, os valores referidos efectivamente aplicáveis a Portugal poderão ser substancialmente mais baixos.

#### 4.4. Aproveitamento de energia das ondas integrado em obras de protecção costeira

A análise acima efectuada é válida para o aproveitamento da energia das ondas fora da costa, em águas de 50 a 80 metros de profundidade. Existe, contudo, a possibilidade de aproveitar a energia das ondas na linha de costa, integrando centrais de aproveitamento da energia das ondas em obras de protecção costeira, situação aplicável às centrais de coluna de água oscilante (CAO) e do sistema VIPRE, em fase inicial de desenvolvimento pela empresa portuguesa ENERWAVE. Nestes casos a estrutura em betão constitui parte do próprio quebra-mar e, por isso, o seu custo é em grande parte assumido pelo custo da própria estrutura de protecção costeira. O custo da estrutura é cerca de 60% do custo total deste tipo de centrais, sendo esta a ordem de grandeza da redução de custos a esperar neste tipo de integração. Contudo, o recurso energético junto à costa é significativamente menor, sendo próximo de metade, pelo que a rentabilidade deste tipo de aproveitamento deverá ser

semelhante ao do que é feito fora da costa. No caso da tecnologia CAO, têm, no entanto, a vantagem de permitirem desenvolver a tecnologia com investimentos significativamente menores antes de aplicar em sistemas oscilantes, fora da costa.

#### 4.5. Dimensões típicas de um parque de energia das ondas

Num clima de ondas com uma potência média anual de 30 kW por metro de frente de crista, os estados de mar com uma potência de 120 kW/m<sup>16</sup> são suficientemente frequentes para serem tomados como referência para efeitos do dimensionamento de centrais de energia das ondas.

Para dispositivos pontuais<sup>17</sup> de simetria axial sujeitos a oscilações verticais e ondas sinusoidais, a teoria linear das ondas de superfície indica que o limite máximo de extracção de energia das ondas é

$$W = \lambda/\pi \quad (1)$$

em que  $\lambda$  é o comprimento de onda. Para ondas de 12 s de período o comprimento de onda é igual a 206 m em águas de 50 m de profundidade, onde se espera que os dispositivos *offshore* venham a ser instalados. Daí resulta que a potência de projecto disponível para uma central com as características indicadas é de  $W = 7,8$  MW. Admitindo um rendimento de 50% em condições de projecto teremos uma potência eléctrica instalada  $W_i = 3,9$  MW.

Estima-se que o factor de carga duma central de energia das ondas seja de 25%, ou seja que forneça anualmente a energia equivalente a 1/4 das horas do ano à potência nominal, isto é, que a central forneça uma energia de 8,5 GWh/ano. Com um afastamento de 200 metros, poderão ser instaladas 5 destas centrais por quilómetro, obtendo-se uma potência instalada de 20 MW por quilómetro e uma produção anual de energia de 42,5 GWh, valores que, embora calculados doutra forma, não se afastam significativamente dos apresentados na Tab. 4.2.1.

Algumas das centrais, por motivos intrínsecos à tecnologia de aproveitamento, não comportam uma potência unitária tão elevada como 3,9 MW. Nesses casos deverão ser colocadas com um afastamento inferior aos referidos 200 metros e eventualmente em várias linhas paralelas à direcção típica da crista das ondas. De facto é de esperar que em algumas das tecnologias a potência instalada em cada central seja de apenas 0,5 MW.

Para manter a potência instalada em cerca de 20 MW por quilómetro de frente de onda (aproximadamente por quilómetro de costa) com centrais com 0,5 MW de potência eléctrica instalada, será necessário colocar 40 centrais por quilómetro paralelo à costa. De modo a manter um afastamento entre centrais de 100 metros, será necessário ter 4 linhas de colocação de centrais com um afastamento entre elas de cerca de 87 metros, o que perfaz uma extensão de 350 metros na direcção dominante da propagação das ondas.

<sup>16</sup> O fluxo de energia varia com o quadrado da altura da onda, pelo que este valor corresponde a uma onda com uma altura dupla da onda média, que na costa portuguesa vale cerca de 1,5 metros.

<sup>17</sup> Dispositivos de dimensão muito inferior ao comprimento de onda. Na prática estima-se que estes dispositivos sejam circulares e tenham um diâmetro de cerca de 15 metros.

No caso do Pelamis cada central tem um comprimento que pode atingir 120 metros e uma potência instalada de 0,75 MW. Dado disporem de uma amarração flexível, estes sistemas têm que estar suficientemente afastados uns dos outros, da ordem de 200 metros. Nestas condições poderão instalar-se 5 centrais e 3,75 MW por quilómetro paralelo à costa, pelo que serão necessárias 5 linhas de dispositivos para atingir uma potência de cerca de 18,75 MW por quilómetro paralelo à costa. Essas 5 linhas ocuparão cerca de 1 km na direcção perpendicular à costa.

Conclui-se, assim, que os parques de energia das ondas poderão ter uma largura entre 15 m e 1 km, dependendo da tecnologia a utilizar. O comprimento dos parques depende do impacto sobre a navegação, nomeadamente a pesqueira. Sabendo que as embarcações de pesca se deslocam a uma velocidade de cerca de 5 nós<sup>18</sup>, e tomando como base que o parque fica interdito à navegação e que não será desejável que uma embarcação pesqueira perca mais do que 15 minutos a contornar o parque, somos levados a concluir que deverá haver um corredor de navegação cada 4,5 km. Desta forma, um parque de 100 MW, que deverá ter um comprimento de 5 km, não levantará uma dificuldade muito significativa à navegação pesqueira.

Um parque de 100 MW terá, assim, um comprimento de 5 km e uma largura entre 15 m e 1 km.

---

<sup>18</sup> 5 nós correspondem a cerca 9 km/h.



## 5. Impactes ambientais associados à conversão de energia das ondas

A implementação de dispositivos de conversão de energia das ondas pode ter uma gama vasta de impactes ambientais, alguns dos quais benéficos outros nefastos. O conhecimento destes efeitos no caso concreto de dispositivos de conversão de energia das ondas é limitado, uma vez que não existem, na actualidade, unidades ou protótipos à escala real cujo intervalo de tempo em funcionamento tenha permitido apurar com o rigor necessário todas as implicações decorrentes da sua introdução no meio envolvente. A análise aqui apresentada segue a efectuada por Thorpe (2001) e a apresentada em Vries (2000) e no relatório da WaveNet (2003), onde aliada à experiência para outras formas de energias renováveis, nomeadamente a colocação de aerogeradores afastados da costa, surge associada alguma experiência com certos dispositivos (realça-se o primeiro protótipo instalado na ilha de Islay, Escócia). Os impactes ambientais são certamente específicos para cada local, pelo que a definição da sua tolerabilidade irá variar também de local para local. Procura-se neste capítulo ilustrar algumas destas questões, evidenciando ainda as áreas onde o conhecimento actual não permite tecer considerações exactas.

### 5.1. Impactes visuais

O impacte visual é muito variável consoante o tipo de dispositivo. Pode ser praticamente nulo no caso dos dispositivos afastados da costa ou consideráveis no caso de dispositivos costeiros. Começamos por analisar os dispositivos afastados da costa: no caso de serem totalmente submersos o seu impacte visual é nulo, e mesmo no caso de serem apenas semi-submersos a sua distância à costa é suficientemente elevada para minimizar este impacte. Poderá no entanto ter algum impacte visual a sinalização luminosa, quando visível de terra, resultante da demarcação da área ocupada pelos dispositivos. Terão necessariamente de existir estruturas em terra para a transmissão de energia eléctrica para a rede, e essas sim tem sempre um impacte associado que importa minimizar. Os dispositivos próximos da costa têm uma maior tendência para serem responsáveis por um maior impacte visual, que pode no entanto ser minimizado através da sua integração em estruturas de protecção costeira, como molhes ou quebra-mares. A implementação de dispositivos costeiros deve fazer-se, em princípio, em zonas de grande densidade energética, que tipicamente não são adequadas para fins de lazer, não interferindo portanto com este tipo de utilizações. Refira-se que estudos independentes realizados no Reino Unido mostram que o impacte visual é sempre menor do que o associado à situação equivalente para as tecnologias de conversão de energia eólica (WaveNet, 2003).

### 5.2. Ruído

O impacte ambiental associado ao ruído é muitas vezes negligenciado mas pode ser considerável. Por exemplo a central piloto de 75 kW de CAO da ilha de Islay produzia, num dia calmo, ruído audível a cerca de 200 m (Ross, 1995)<sup>19</sup>. É de esperar que num dia de mar agitado o ruído natural das ondas

<sup>19</sup> Uma situação semelhante ocorreu também na central LIMPET, sendo ultrapassada com protecções sonoras adequadas.

e do vento seja semelhante ao ruído proveniente do funcionamento de uma central de energia das ondas do tipo de CAO, desde que sejam utilizados sistemas adequados de supressão de ruído. No que diz respeito aos sistemas afastados da costa o impacto sobre o homem é nulo. Como o som se propaga até distâncias maiores debaixo de água, o ruído provocado pelos dispositivos de extracção de energia das ondas pode, no entanto, influenciar os sistemas de navegação e comunicação de certos animais marinhos, particularmente cetáceos (Thorpe, 1999; WaveNet, 2003). Este problema merece um estudo mais rigoroso, embora pareça improvável a sua influência negativa numa escala relevante (note-se que o problema de interferência com a comunicação no caso dos golfinhos é pouco provável, pois a frequência associada é particularmente elevada quando comparada com a emitida pelos dispositivos). Mesmo que a influência nos sistemas de navegação e comunicação dos animais não seja significativa, especial atenção deve ser dada para evitar que a instalação de parques de dispositivos constitua uma barreira física para os percursos migratórios das espécies, o que aliás acaba por ser salvaguardado por motivos de projecto e instalação, devido às distâncias impostas entre os dispositivos.

### 5.3. Perturbação do meio envolvente

Como já foi referido um dos grandes impactes ambientais associados a este tipo de tecnologia está relacionado com a interferência que estes provocam no meio em que se encontram inseridos nas fases de construção e instalação, embora em alguns destes sistemas a fase de construção não seja efectuada no local. Embora estas preocupações não sejam exclusivas dos dispositivos de extracção de energia das ondas, devem ser tidas em consideração quando se planeia a implementação deste tipo de tecnologia. A construção em módulos, num estaleiro, pode minimizar o impacto imediato mas em certas estruturas costeiras, como foi o caso da central LIMPET, podem ser necessárias alterações consideráveis na linha costeira. Embora não sejam ainda lícitos todos os possíveis efeitos que a introdução destes dispositivos pode causar no ambiente marinho, é de esperar que as alterações no próprio regime de ondas sejam causa de perturbação temporária no padrão de vida de algumas espécies. Thorpe (1999) prevê alterações não só no clima de ondas mas também nas correntes marítimas, no regime de marés e nos padrões de mistura de espécies microscópicas, que constituem a base da cadeia alimentar de inúmeras espécies do meio marinho. No caso dos dispositivos afastados da costa, e quando colocados em parques, é de prever uma redução da acção das ondas nas zonas costeiras mais próximas, o que tanto pode constituir uma vantagem como uma desvantagem, dependendo da utilização dessas mesmas zonas. Nestes dispositivos um outro cuidado deve ser tomado, estando este relacionado com as tintas anti-corrosão e com o tipo de protecção empregue para prevenir as encrustações de organismos marinhos. Estes produtos eram no passado de natureza tóxica, podendo a longo prazo ser prejudiciais para as espécies marinhas. A experiência da indústria naval mostra que podem ser utilizados produtos não tóxicos sem consequências ambientais (Vries, 2000).

Relativamente ao problema de emissão de poluentes, ao produzir electricidade estes dispositivos não emitem qualquer tipo de poluente, o que não quer dizer que sejam nulas as emissões ao longo de todo o seu ciclo de vida, tal como se verifica no processo de instalação, por exemplo, das tecnologias de extracção de energia eólica (Mendes et al., 2002). A implementação destas tecnologias envolve (Thorpe, 1999):

- extracção e movimentos de terras (casos dos dispositivos costeiros);
- processamento de materiais;
- produção e transporte de componentes;
- construção e modo operativo do dispositivo;
- desmantelamento;
- tratamento dos resíduos resultantes.

Em termos de emissões de poluentes as fases mais críticas são aquelas que envolvem um maior consumo energético, como o fabrico das componentes do dispositivo, estando no extremo oposto as acções que envolvem o transporte de materiais. Prevê-se ainda que todas as fases sejam (pelo menos) uma ordem de grandeza inferior à de fabrico das componentes do dispositivo no que diz respeito às necessidades energéticas. Fases como a do desmantelamento<sup>20</sup> e do tratamento dos resíduos resultantes (reciclagem de materiais, etc.) são ainda negligenciadas, dada a fase prematura em que a tecnologia se encontra. De qualquer forma a magnitude das emissões em todas estas fases é praticamente nula quando comparada com as opções convencionais para a produção de energia eléctrica, e uma análise do ciclo de vida destes sistemas (WaveNet, 2003) traduz claramente os benefícios destas tecnologias.

Para concluir note-se que todos estes impactes ambientais não são equacionados pela legislação actual, pelo que a confirmar-se a viabilidade económica dos dispositivos de extracção de energia das ondas devem ser tomadas acções céleres no plano jurídico. As Tabelas apresentadas em 5.4 procuram esquematizar e resumir a informação do Capítulo 5, servindo de ponto de partida para o estudo dos impactes ambientais de um qualquer dispositivo específico.

## 5.4. Esquematização dos impactes ambientais

As Tabelas aqui apresentadas procuram esquematizar a informação do Capítulo 5, constituindo um primeiro guia no que diz respeito aos impactes ambientais provocados pela implementação, operação e manutenção de dispositivos de conversão de energia das ondas. A análise segue a apresentada pela Wave Dragon ApS, cujas preocupações ambientais foram manifestadas desde a primeira hora, e foram aplicadas já na implementação do seu protótipo em Nissum Bredning (Dinamarca). Serão focadas as fases de construção e instalação, operação e manutenção e ainda a de desmantelamento do dispositivo, procurando abranger em todas as ocasiões o maior tipo de dispositivos possível.

---

<sup>20</sup> Estima-se um tempo de vida típico de 60 anos para um dispositivo de conversão de energia das ondas, valor que pode ser comparado com o de alguns navios comerciais.

### Construção e Instalação:

OPERAÇÃO	IMPACTES POSSÍVEIS	MEDIDAS DE MINIMIZAÇÃO
Instalação de cabos submarinos	Efeitos semelhantes nas turbinas eólicas offshore: perturbação (temporária) de alguns habitats nas imediações do cabo  Danificação de zonas de interesse arqueológico <sup>21</sup>	Evitar a colocação de cabos submarinos em zonas referenciadas
Instalação de cabos na costa	Efeitos semelhantes nas turbinas eólicas <i>offshore</i> : perturbação (temporária) de alguns habitats nas imediações do cabo	Evitar a colocação de dispositivos e toda a sua estrutura envolvente em zonas referenciadas
Instalação do sistema de amarração	Efeitos semelhantes na amarração de navios: perturbação (temporária) de alguns habitats	Evitar a colocação de blocos de amarração (âncoras) em zonas referenciadas
Construção do dispositivo	Impactes diversos (desde visuais, ruído, ...)	Sempre que possível evitar a construção do dispositivo no local
Tráfego marítimo durante a instalação	Aumento do tráfego marítimo durante a instalação de dispositivos não costeiros, o que pode afectar uma gama variada de espécies	Evitar a instalação de dispositivos em períodos relevantes para as espécies locais (migrações, períodos de descanso, ...)

**Tabela 5.4.1**  
**Impactes ambientais associados à construção e instalação de dispositivos de conversão de energia das ondas**

21 As zonas de interesse arqueológico estão assinaladas e serão evitadas.

### Operação e Manutenção:

OPERAÇÃO	IMPACTES POSSÍVEIS	MEDIDAS DE MINIMIZAÇÃO
Presença do dispositivo	Impactes visuais	Depende do tipo de dispositivo, sendo particularmente relevantes nos costeiros
	Efeitos positivos e negativos nos recursos pesqueiros (dispositivos afastados da costa)	Positivos (criação de zonas de exclusão e de recifes artificiais); para os negativos a solução passa por evitar zonas de pesca comercial e de recreio
	Influência do ruído nos mamíferos marinhos	Adaptar o projecto do dispositivo para a possibilidade de este atrair algumas espécies (por ex.: distância entre dispositivos)
	Impactes na navegação (dispositivos não costeiros)	Evitar a colocação em zonas de grande tráfego marítimo; sinalização dos dispositivos (luzes, radar, ...)
	Alterações no regime de ondas (podendo influenciar o processo de erosão costeira, alterar habitats marinhos e alterar o valor turístico de uma zona)	Depende fortemente do tipo de dispositivo, podendo ter impactes benéficos ou nefastos <sup>22</sup>
Presença dos cabos submarinos	Geração de um campo electromagnético	Os cabos submarinos serão enterrados no fundo mar, pelo que este impacte é mínimo
Operação do sistema de conversão de energia	Impactes que dependem fortemente do sistema em causa	O maior impacte será provavelmente o ruído, que varia com o tipo de sistema e deverá ser mais intenso quando se utilizam turbinas de ar e sistemas com velocidades significativas entre partes móveis
Presença do sistema de amarração (dispositivos não costeiros)	A presença dos blocos de amarração (âncoras) afecta o meio envolvente	Devem-se evitar certas áreas identificadas como zonas importantes para pesca, etc.
	A presença das correntes de amarração pode afectar os habitats naturais do fundo (caso de arrastem)	Projectar as correntes de modo a que não permaneçam no fundo
	O sistema de amarração (blocos + correntes) pode constituir um recife artificial, fomentando o aparecimento e o crescimento de espécies marinhas	Impacte benéfico (não necessita de medidas de minimização)
Presença das instalações costeiras	As instalações costeiras (apoio, subestações, ...) têm necessariamente um impacte visual	Escolha adequada do local de implementação e procura de soluções arquitectónicas adequadas
Manutenção	A regularidade na manutenção pode ter associada, por exemplo no caso dos dispositivos não costeiros, o aumento do tráfego marítimo	Devem ser respeitadas as medidas preventivas já mencionadas (evitar períodos de migrações dos animais, etc.); não se espera que o tráfego seja muito diferente do associado à pesca.
Mecanismos anti-corrosão	Possíveis emissões tóxicas para o meio envolvente	A indústria naval apresenta soluções não tóxicas (revestimento à base de silicone, por exemplo)

**Tabela 5.4.2**  
Impactes ambientais associados à operação e manutenção de dispositivos de conversão de energia das ondas

<sup>22</sup> A maior interacção das ondas com a costa faz-se nas tempestades, situação em que os sistemas deverão estar desligados, pelo que o seu efeito é pouco significativo.

### Desmantelamento:

OPERAÇÃO	IMPACTES POSSÍVEIS	MEDIDAS DE MINIMIZAÇÃO
Desmantelamento e remoção do dispositivo do local	Os impactes imediatos são predominantes nos dispositivos costeiros, embora possam ser relevantes nos dispositivos offshore (eventual remoção do recife artificial criado)	O projecto do dispositivo deve ter em atenção a utilização de materiais recicláveis sempre que possível
Remoção do sistema de amarração (quando aplicável)	Influência no meio envolvente (alteração do habitat de algumas espécies)	Utilização de técnicas de minimização disponíveis na indústria <i>offshore</i>
Remoção dos cabos submarinos		

Tabela 5.4.3

Impactes ambientais associados ao desmantelamento de dispositivos de conversão de energia das ondas

## 5.5. Aspectos relevantes numa política ambiental

Como conclusão do Capítulo 5 procuramos esquematizar os traços mais relevantes de uma possível política ambiental que tenha como objecto de estudo as tecnologias de conversão de energia das ondas. As recomendações patentes nestes sete pontos seguem a análise proposta no relatório da WaveNet (2003), e podem ser consideradas como os pontos-chave a reter tendo em vista a implementação destes sistemas. Temos desta forma os seguintes tópicos:

1. não há experiência adquirida, pelo que apenas podemos estimar eventuais impactes ambientais;
2. embora se trate de uma área recente, integra um conjunto de elementos já disponíveis para outras aplicações mais correntes, tais como plataformas flutuantes, navios ancorados, cabos eléctricos de transporte de energia ou telecomunicações, etc., através dos quais se pode estimar o impacto;
3. em nenhuma das tecnologias de conversão de energia das ondas são utilizados materiais nocivos que levistem problemas ambientais graves. As próprias tintas utilizadas são, tal como nos navios, de natureza não tóxica;
4. os cabos eléctricos serão, em princípio, enterrados, até para sua própria protecção relativamente à acção das ondas e actividade da pesca;
5. a avaliação dos impactes produzidos pelos sistemas de energia das ondas deverá ser efectuada com base na experiência que venha a ser adquirida com os primeiros sistemas, sendo importante desenvolver métodos quantitativos de avaliação;
6. a avaliação final dos impactes ambientais de um sistema de energia das ondas deve ter em conta a comparação com métodos alternativos de produção de energia eléctrica;

7. tanto quanto é possível estimar, na fase actual de desenvolvimento da energia das ondas, os impactes ambientais associados às tecnologias de conversão de energia das ondas são pequenos, pelo que também se poderá considerar ser pequeno o risco inerente a uma atitude flexível numa fase inicial (e pontual) da implementação destes dispositivos.



## 6. Barreiras ao desenvolvimento

Existindo um potencial energético reconhecido e considerado extremamente atractivo, o leitor pode, numa primeira análise, estranhar o facto de as tecnologias de conversão de energia das ondas não terem ainda atingido, à semelhança da sua congénere eólica, um patamar de comercialização generalizada<sup>23</sup>. As barreiras ao desenvolvimento destas tecnologias são de diferentes tipos, podendo ser englobadas genericamente em quatro categorias:

- a. técnicas;
- b. conflitos de interesses;
- c. administrativas e legais;
- d. financeiras.

No que diz respeito às barreiras técnicas estas prendem-se com características inerentes ao próprio recurso energético, sendo as mais relevantes (CRES, 2002):

- irregularidade da amplitude, fase e direcção das ondas, sendo um desafio acrescido tentar maximizar a captura de energia numa banda de frequências da onda incidente;
- os esforços estruturais a que os dispositivos estão sujeitos, que em condições extremas de tempestades podem atingir cargas cem vezes superiores às médias;
- o próprio mecanismo inerente aos geradores eléctricos, que exigem uma frequência muito superior à da onda incidente;

Os desafios tecnológicos são ultrapassáveis, sendo que a questão mais relevante prende-se com o custo associado a essas soluções, pois numa economia de mercado este parâmetro é dominante. Uma outra categoria de barreiras ao desenvolvimento de dispositivos de conversão de energia das ondas prende-se com os possíveis conflitos de interesses, pois as zonas de implementação destas tecnologias podem ter outros usos. Dentro desta categoria podemos ainda definir dois tipos de conflitos: os levantados por sobreposição de usos e os levantados por proibição ou restrição de utilização da área. Desta forma temos:

### 1. Áreas passíveis de sobreposição de usos:

- Zonas de pesca;
- Zonas de extracção de materiais;
- Zonas de recreio e lazer;
- Zonas de interesse arqueológico.

### 2. Áreas de acesso restrito ou interdito:

- Zonas que intersectem rotas marítimas importantes;
- Campos de treino militar;

---

<sup>23</sup> Uma explicação possível prende-se com o facto de, contrariamente ao caso da energia eólica, não ter existido a convergência para uma única tecnologia.

- Zonas nas imediações de outras estruturas relevantes, costeiras ou afastadas da costa (pontes, portos, plataformas petrolíferas, parques eólicos *offshore*, ...);
- Zonas de passagem de cabos submarinos ou oleodutos;
- Reservas naturais.

Em 1. a questão das pescas é a que assume maior relevância (no caso dos dispositivos afastados da costa), pelo que devem ser tomadas algumas medidas preventivas, por exemplo estabelecendo um diálogo aberto com as entidades ou comunidades envolvidas antes de concretizado o projecto, tendo em atenção as diferentes artes de pesca praticadas e a sua área de actividade (Brito e Melo, 2004). Na costa Portuguesa a profundidade de instalação de parques *offshore* de energia das ondas está, em geral, suficientemente longe da costa para não interferir com a pesca artesanal e suficientemente perto da costa para não atingir as 6 milhas, distância a partir da qual é permitida a actividade da pesca industrial.

Por exemplo não faz qualquer sentido colocar um ou vários dispositivos de conversão de energia das ondas em zonas já identificadas como áreas de pesca ou em viveiros naturais. Uma consulta a várias entidades deve ser efectuada nesta óptica. Será necessário delimitar as áreas onde se encontram os dispositivos, o que alarga as zonas de exclusão e aumenta a probabilidade de outras actividades serem afectadas. Por outro lado a influência nas zonas de recreio e lazer pode ser benéfica, em particular no caso dos dispositivos *offshore*. Neste caso é criada uma zona a jusante destes que, em princípio, é mais abrigada, principalmente em termos de agitação marítima, o que pode favorecer diversas actividades (*windsurf*, navegação de embarcações de pequeno porte).

Finalmente em 2. o principal efeito prende-se com a influência na navegação, uma vez mais particularmente relevante para os dispositivos afastados da costa. Estes podem representar um perigo para a navegação pelo facto do bordo livre (distância entre o nível da água e a parte superior da cobertura do dispositivo) ser pequeno, o que pode dificultar a sua detecção (visual e por radar), problema que não se coloca se os dispositivos forem submersos. Esta questão, que pode assumir proporções maiores no caso de parques de dispositivos, pode ser contornada através de um controlo rigoroso das cartas náuticas e uma correcta sinalização. Deve-se salientar que, num certo sentido, um parque de energia das ondas poderá até aumentar a segurança à navegação se forem criadas infra-estruturas de fiscalização e intervenção.

É também conveniente referir que deve ser evitada a colocação de dispositivos na zona de acesso aos portos. Um último comentário para as restantes categorias de barreiras ao desenvolvimento: as administrativas prendem-se com questões relacionadas com o licenciamento nada ágil, que envolve muitos ministérios e institutos públicos, e que torna o domínio do aproveitamento da energia das ondas pouco atractivo ao investimento, enquanto as legais dizem respeito aos detalhes do acesso à rede eléctrica, restrições no fornecimento de energia e tarifário de compra de electricidade. Finalmente as barreiras financeiras estão relacionadas não só com a tarifa de venda da electricidade mas também com estratégias de apoio a projectos, como fundos ou empréstimos especiais para projectos de inovação tecnológica. O desenvolvimento de esquemas de apoio é fundamental numa fase em que a tecnologia ainda está em demonstração.

## 7. Conclusões

É extremamente difícil antever o potencial de uma tecnologia numa fase inicial de desenvolvimento. Para ilustrar essa dificuldade basta lembrar que em 1943 a revista *Popular Mechanics* anunciava que o computador do futuro poderia pesar menos que 1 tonelada e em 1983 Bill Gates anunciava que 256 kBytes seriam suficientes para qualquer computador pessoal.

Uma percentagem muito expressiva da energia eléctrica consumida no País, que pode atingir os 20%, poderá vir a ser produzida através das ondas do mar, caso se venha a concretizar o baixo impacte ambiental e a viabilidade tecnológica e económica das centrais de extracção deste tipo de energia. Para tal será necessário instalar cerca de 45 parques de centrais de energia das ondas, perfazendo uma potência instalada da ordem de 4500 MW, a que corresponderá um investimento total na gama dos 4500 milhões de Euros. Os parques deverão vir a ser instalados sensivelmente paralelos à costa, a uma distância desta de cerca de 5 milhas, em águas entre os 50 e 80 metros de profundidade. Dependendo do tipo de tecnologia de extracção de energia das ondas a utilizar, a potência de cada central pode oscilar entre 0,5 e 5 MW e cada parque de 100 MW poderá ter cerca de 5 km de comprimento e entre 15 m e um 1 km de largura.

O impacte negativo que estes parques tecnológicos podem causar deverá ser relativamente pequeno, a diversos níveis. Em termos ambientais o impacte directo é quase nulo, uma vez que a tecnologia em causa não utiliza substâncias nocivas. Em termos visuais, as estruturas, em geral pouco salientes da linha de água, ficarão instaladas a uma distância já considerável da costa e fora do alcance da vista a partir de terra. As centrais serão instaladas fora dos canais de acesso a portos ou a pesqueiros e muito aquém das rotas de alto mar, pelo que não causarão impacto negativo significativo sobre a navegação. Estarão, ainda, suficientemente longe de terra para não interferirem com a pesca artesanal e, em geral, aquém das 6 milhas, distância a partir da qual se processa a pesca por arrastão. A opção por sistemas costeiros será feita em situações que permitam a sua integração em obras de protecção costeira, caso em que o principal impacto estará na obra e não no próprio dispositivo.

Apesar de não existir ainda experiência industrial significativa nesta área, há quatro tecnologias distintas de extracção de energia das ondas com protótipos a serem (ou em vias de serem) testados no mar: a Coluna da Água Oscilante (CAO), o Pelamis, o Wave Dragon e o Archimedes Wave Swing (AWS). A Central de Coluna de Água Oscilante é o sistema mais investigado, tendo sido construídas várias centrais a nível mundial. Tipicamente a CAO é um sistema costeiro (embora também possa ser instalado ao largo) que é particularmente adequado para a integração em estruturas de protecção costeira. Presentemente existem duas centrais piloto deste tipo, uma na Escócia, a Central LIMPET, e a Central do Pico nos Açores. Os restantes dispositivos são sistemas *offshore*, completamente submersos ou semi-submersos. Existem outras tecnologias em desenvolvimento, mas numa fase menos avançada. Podemos apontar para um período de dois a três anos como o tempo necessário para obtermos mais informação quanto à avaliação da viabilidade tecnológica e económica destas tecnologias e seu impacte ambiental em resultado directo dos ensaios no mar dos protótipos mencionados.

Com a CAO do Pico, o AWS e o Pelamis, são três os sistemas que podem vir a ser testados nas águas portuguesas ainda em 2004, em resultado do estabelecimento de um consórcio entre empresas, instituições de investigação e o Centro de Energia das Ondas para recuperarem a central do Pico, com apoio do PRIME, e do envolvimento da ENERSIS nas tecnologias AWS (Holandesa) e Pelamis (Escocesa).

Portugal apresenta condições particularmente favoráveis para o aproveitamento da energia das ondas, sobretudo numa fase inicial de desenvolvimento desta tecnologia: recurso energético médio-alto, águas relativamente profundas a pouca distância da costa, portos e estaleiros navais perto dos possíveis locais de instalação dos parques de energia das ondas e rede eléctrica de transporte junto à costa. Acresce ainda a estas condições uma tarifa de remuneração da energia eléctrica produzida através das ondas particularmente favorável. Por último, o país tem conhecimentos técnico-científicos muito significativos nesta área, resultante duma actividade de investigação no IST e no INETI com mais de vinte e cinco anos de existência, da construção da central do Pico, num processo que envolveu diversas empresas nacionais, e da participação no projecto e construção das centrais LIMPET e AWS.

Tendo em conta o elevado grau de importação de energia pelo país e a necessidade de redução de emissão de gases com efeitos de estufa, a vantagem estratégica que uma exploração equilibrada de recursos endógenos e renováveis em grande escala traz, é incontestável. A esta, e no caso da energia das ondas, soma-se ainda a oportunidade de criação de emprego e o elevado potencial de exportação a nível mundial. Finalmente, pelo meio que irá explorar, o desenvolvimento da energia das ondas permitirá desenvolver tecnologia com aplicações na exploração de recursos oceânicos que o futuro venha a revelar de interesse.

Para que os mencionados impactes positivos resultantes do aproveitamento da energia das ondas se concretizem é necessário que o País defina uma estratégia nacional articulando empresas, instituições de investigação e a administração pública de modo a:

1. Atrair e desenvolver projectos credíveis;
2. Desenvolver capacidade nacional de investigação, avaliação, projecto, fabrico, instalação e operação deste tipo de sistemas;
3. Criar legislação adequada e procedimentos expeditos de financiamento e licenciamento de parques de energia das ondas;
4. Criar procedimentos de inserção de empresas nacionais no desenvolvimento e de protecção de propriedade industrial entretanto desenvolvida.

Temos, assim, um desafio à inteligência nacional, com diversas componentes. Se às empresas se pede que invistam e arrisquem parte do seu capital em projectos que a prazo poderão contribuir para a criação de riqueza de que serão as primeiras beneficiárias, ao Estado pede-se apoio para esse esforço e uma partilha do risco. Este risco tem duas componentes: um risco financeiro e um risco ambiental. Para uma aposta justa, ambos devem estar balizados, mas é importante que se compreenda que ambos devem ser assumidos.

## 8. Referências

Ball, I. (2002), "Turning the Tide: Power from the Sea and Protection for Nature", Cardiff University & The WWF Wildlife Trust.

Brito e Melo, A.M.C.F., (2000), "Modelação e Pré-dimensionamento de Centrais de Coluna de Água Oscilante: Aplicação à Central de Energia das Ondas do Pico, Açores", Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico.

Brito e Melo, A.M.C.F., (2004), Comunicação Pessoal.

CRES (2002), "Wave energy Utilization in Europe: Current Status and Perspectives", Centre of Renewable Energy Sources, Grécia.

Cruz, J.M.B.P. & Sarmento, A.J.N.A. (2004), "Wave Energy Absorption by a Submerged Sphere of Variable Radius With a Swinging Single Point Moored Tension Line", 14th International Offshore and Polar Engineering Conference & Exhibition, Toulon, França.

Energy Technology Support Unit (ETSU), (2001) "Technology Status Report, Wave Energy", a report by ETSU as part of the DTI's New and Renewable Energy Programme, Energy and Technology Support Unit, DTI (Department of Trade and Industry of the United Kingdom).

Falcão, A.F. de O., Whittaker, T.J.T. e Lewis, A.W. (1993), "Joule II Preliminary Action : European Pilot Plant Study", Proc. of an International Symposium, Edinburgh, Scotland, pp.247-251.

Falcão, A.F. de O. (2000), "The shoreline OWC wave power plant at the Azores", 4th European Wave Energy Conference, Aalborg, Dinamarca.

Falcão, A.F. de O. (2004), "Energia Hidráulica e Eólica. Energia das Ondas", contribuição para o livro "Momentos de Inovação e Engenharia em Portugal no Século XX", Coordenação de Manuel Heitor et al., Edições Dom Quixote (a publicar).

Falnes, J. (2002), "Ocean Waves and Oscillating Systems", Cambridge University Press.

Heath, T., Whittaker, T.J.T. & Boake, C.B. (2000), "The design, construction and operation of the LIMPET wave energy converter (Islay Scotland), 4th European Wave Energy Conference, Aalborg, Dinamarca.

Hotta, H, (1995). "R&D on Wave Power in Japan", Proc. of the 2nd European Wave Power Conference, Lisboa, Portugal.

McCormick, M.E. (1981), "Ocean Wave Energy Conversion", John Wiley & Sons.

Mei, C.C. (1976), "Power Extraction from Water Waves", J. Ship Research, Vol. 20, pp. 63-66.

Mendes, L., Costa, M., Pedreira, M.J. (2002), "A Energia Eólica e o Ambiente", Instituto do Ambiente.

Miyazaki, T, (1995), "Japanese Wave Energy Devices", Proc. of the 2nd European Wave Power Conference, Lisboa, Portugal.

Pizer, J.D., Korde, U. (1998), "Recent Studies on Mighty Whale Hydrodynamic Efficiency", Proc. of the European Wave Energy Symposium, Patras, Grécia.

Pontes, M.T, Falcão, A.F. (2001), "Ocean Energies: Resources and Utilisation", 18th World Energy Conference, Buenos Aires, Argentina.

Programa Nacional de Energia das Ondas (PNEO), (2004), "Enquadramento e Proposta", Documento conjunto do Centro de Energia das Ondas e do INETI.

Rademakers, L.W.M.M., van Schie, R.G., Schuttema, R., Vriesema, B. & Gardner, F. (1998), "Physical model testing for characterizing the AWS", 3rd European Wave Energy Conference, Patras, Grécia.

Ravindran, M, et al, (1995). "Indian Wave Energy Programme: Progress and Future Plans", Proc. of the 2nd European Wave Power Conference, Lisboa, Portugal.

Ross, D. (1995) "Power from the Waves", Oxford University Press.

Salter, S.H. (1974), "Wave Power", reimpresso na Nature, Vol. 5459.

Sarmiento, A.J.N.A. (2001), "Energia das Ondas: Uma Oportunidade para Portugal no Início do Século XXI", MARETEC.

Sarmiento, A.J.N.A & Cruz, J.M.B.P. (2003), "Wave Energy Absorption by a Submerged Sphere of Variable Radius in Sway Surge and Heave", 5th European Wave Energy Conference, Cork, Irlanda.

Sorensen, H. C., Christensen, L., Hansen, L. K., Duncce, D., Praest, J., Friis-Madsen, E., (2003) "Development of Wave Dragon from Scale 1:50 to Prototype", 5th European Wave Energy Conference, Cork, Irlanda.

Thorpe T.W., (1998) "Benign Energy? The Environmental Implications of Renewables", International Energy Agency.

Thorpe, T.W. (1999), "A Brief Review of Wave Energy", DTI, Reino Unido.

Thorpe, T.W. (1999), "Economic Analysis of Wave Power Devices", IMECHE Seminar, Londres, Reino Unido.

Thorpe, T.W., (2001) "Wave Energy - Current Status and Developments", disponível em [www.nesea.org](http://www.nesea.org).

Thorpe, T.W. (2003), "Economics of Wave Energy", WaveNet Report.

Vries, M. d. (2000), "Assessment of the Environmental Impact of the Archimedes Wave Swing", WL Delft Hydraulics.

WaveNet (2003), "E5: Environmental Impacts - WaveNet Report", European Comission.

White, P., (1989). "Developments in Norwegian Wave Energy", Proc. of a Conference on Wave Energy Devices, Coventry, Reino Unido.

Yemm, R. (1999), "The history and status of the Pelamis Wave Energy Converter", IMECHE Seminar, Londres, Reino Unido.



## Listagem das figuras

- Figura 1.1 - Distribuição do potencial mundial das ondas em kW/m de frente de onda
- Figura 3.2.1 - Esquema de uma central de coluna de água oscilante (cortesia Wavegen)
- Figura 3.2.2 - Localização da central do picofigura 3.2.3 - central piloto europeia de energia das ondas do pico (vista lateral)
- Figura 3.2.3 - Central piloto europeia de energia das ondas do pico (vista lateral)
- Figura 3.2.4 - Central piloto europeia de energia das ondas do pico
- Figura 3.2.5 - Central piloto europeia de energia das ondas do pico (vista interior)
- Figura 3.2.6 - Turbina wells e gerador instalados na central do pico
- Figura 3.2.7 - Turbina wells da central do pico na fase de construção instalados na central do pico
- Figura 3.2.8 - Turbina da central LIMPET na fase de construção (cortesia Wavegen)
- Figura 3.2.9 - Vistas da central LIMPET (cortesia Wavegen)
- Figura 3.2.10 - Vistas da central LIMPET (cortesia Wavegen)
- Figura 3.2.11 - Antevisão artística da Energetech OWC (cortesia Energetech)
- Figura 3.2.12 - Imagem gerada por computador do sistema de CAO da Energetech em Port Kembla (cortesia Energetech)
- Figura 3.3.1 - Antevisão artística do OSPREY
- Figura 3.3.2 - Modelo do OSPREY com a inclusão do aerogerador para aproveitamento eólico
- Figura 3.3.3 - Antevisão artística do molhe da foz do Douro
- Figura 3.3.4 - Desenho esquemático da CEO Douro
- Figura 3.4.1 - Princípio de funcionamento do AWS
- Figura 3.4.2 - Central piloto do AWS em águas portuguesas (cortesia AWS BV)
- Figura 3.4.3 - Perspectiva da central piloto do AWS em construção (cortesia AWS BV)
- Figura 3.4.4 - Central piloto do AWS no porto de Leixões (cortesia AWS BV)
- Figura 3.4.5 - Antevisão artística do AWS da próxima geração (cortesia AWS BV)
- Figura 3.4.6 - Antevisão artística do AWS da próxima geração (cortesia AWS BV)
- Figura 3.4.7 - Detalhe das juntas flexíveis do Pelamis (cortesia OPD Ltd)
- Figura 3.4.8 - Detalhe das juntas flexíveis do Pelamis (cortesia OPD Ltd)
- Figura 3.4.9 - Detalhe e vista lateral do módulo de conversão de energia do Pelamis (cortesia OPD Ltd)
- Figura 3.4.10 - Detalhe e vista lateral do módulo de conversão de energia do Pelamis (cortesia OPD Ltd)
- Figura 3.4.11 - Esquema do sistema de fixação do Pelamis (cortesia OPD Ltd)
- Figura 3.4.12 - Antevisão artística de um parque de Pelamis (cortesia OPD Ltd)
- Figura 3.4.13 - Lançamento do primeiro Pelamis à escala 1:1 (cortesia OPD Ltd)

Figura 3.4.14a - Princípio de funcionamento do Wave Dragon (cortesia Wave Dragon ApS)

Figura 3.4.14b - Wave Dragon visto de um dos reflectores (cortesia Wave Dragon ApS)

Figura 3.4.15 - Wave Dragon em funcionamento (cortesia Wave Dragon ApS)

Figura 3.4.16 - Antevisão artística do Migthy Whale

Figura 3.4.17 - Migthy Whale pronto para o lançamento ao mar (Março de 1998)

Figura 3.4.18 - Migthy Whale pronto para o lançamento ao mar (Março de 1998)

## Listagem de tabelas

Tabela 2.1.1 - factos relevantes na história da energia das ondas

Tabela 2.2.1 - Pontos fortes e pontos fracos do caso Português (PNEO, 2004)

Tabela 4.1.1 - Investimento por unidade de potência instalada obtido através do método da anuidade e sua comparação com os valores de referência para projectos típicos de energia eólica e de energia mini-hídrica

Tabela 4.1.2 - Investimento por unidade de potência instalada obtido através do método da anuidade para projectos de energia das ondas para a tarifa actual, correspondente a tecnologia em fase inicial de desenvolvimento, e tarifa para tecnologia madura

Tabela 4.2.1 - valores de referência por quilómetro de aproveitamento de energia das ondas. Os valores em Euros foram calculados admitindo um investimento por unidade de potência instalada e uma tarifa correspondentes a uma tecnologia madura

Tabela 4.3.1 - custo e potência instalada de algumas das centrais piloto construídas.

Tabela 4.3.2 - valores de potência a instalar e subsídio acumulado para se atingir condições de viabilidade económica comparável aos projectos de energia eólica mais caros (tarifa de 0,09 €/kWh) e potência a instalar para recuperar o subsídio acumulado

Tabela 5.4.1 - Impactes ambientais associados à construção e instalação de dispositivos de conversão de energia das ondas

Tabela 5.4.2 - Impactes ambientais associados à operação e manutenção de dispositivos de conversão de energia das ondas

Tabela 5.4.3 - Impactes ambientais associados ao desmantelamento de dispositivos de conversão de energia das ondas





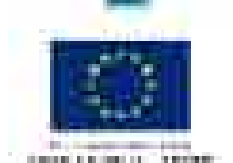
**Instituto do Ambiente**

MINISTÉRIO DO AMBIENTE E DO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO



**Wave Energy Centre**

Ministério do Ambiente



**info:**

**Instituto do Ambiente**

Rua da Murgueira, 9/9A, Zambujal

Ap. 7585, 2611-865 Amadora

Tel: 21 472 82 00 | Fax: 21 471 90 74

email: geral@iambiente.pt

www.iambiente.pt