

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM NOVO DISPOSITIVO DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS Experimental Study of a New Wave Energy Converter

LUÍS TEIXEIRA ⁽¹⁾, PAULO ROSA SANTOS ⁽²⁾, FRANCISCO TAVEIRA PINTO ⁽³⁾ e JOSÉ PINHO RIBEIRO ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465, Porto, luismesquitateixeira@gmail.com

⁽²⁾ Professor Auxiliar Convidado, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465, Porto, pjsantos@fe.up.pt

⁽³⁾ Professor Catedrático, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465, Porto, fpinto@fe.up.pt

⁽⁴⁾ Engenheiro Eletrotécnico, PT-Portugal Telecom,
Rua de Felizardo de Lima, nº 43, 2º, 4100-283, Porto, jpinhoribeiro@sapo.pt

Resumo

O recurso a fontes de energia renováveis tem vindo a aumentar ao longo dos últimos anos, sendo de destacar a energia solar, eólica, geotérmica, das marés, hídrica, da biomassa e das ondas. Neste contexto torna-se importante o desenvolvimento de novos dispositivos para o aproveitamento dessas fontes de energia.

O presente artigo descreve o estudo e a análise da viabilidade e do funcionamento de um novo dispositivo de conversão da energia das ondas, Conversor da Energia Cinética das Ondas (CECO).

O estudo experimental realizado envolveu a utilização de técnicas de medição e experimentação avançadas e permitiu a análise do comportamento do dispositivo CECO para diferentes condições de agitação marítima, de forma a compreender o seu modo de funcionamento e analisar a viabilidade de algumas soluções construtivas. Durante o estudo analisou-se também a influência de outras variáveis no comportamento do dispositivo CECO, nomeadamente da sua inclinação e do nível de amortecimento introduzido pelo sistema *Power Take Off* (PTO).

O estudo envolveu a análise comparativa da evolução temporal dos movimentos do dispositivo, a comparação temporal do movimento principal do dispositivo com a elevação da superfície livre da água no mesmo intervalo de tempo, uma análise espectral visando o estudo da influência dos diferentes amortecimentos introduzidos pelo PTO na resposta do dispositivo, uma comparação da resposta espectral do dispositivo e da onda e o cálculo da potência absorvida e da energia produzida.

Palavras-chave: Energias renováveis, CECO, modelação física, energia cinética das ondas, power take off, potência absorvida.

Abstract

The use of renewable energy sources has been increasing over recent years, especially solar, wind, geothermal, tidal, hydro, biomass and wave energy, which makes the constant development of new devices to improve their use extremely important.

This article describes the study and analysis of the feasibility and performance of a new wave energy converter, the Wave Kinetic Energy Converter (CECO).

The experimental study involved the use of measurement techniques and advanced experimentation and allowed the analysis of the behaviour of the CECO device for different wave conditions, the understanding of its operation and the analysis of the feasibility of some constructive solutions. During the study it was also analyzed the influence of other variables in the response of the device, including its inclination and the damping level introduced by the Power Take Off (PTO) system.

This analysis involved a temporal comparison of the device movements, a temporal comparison of the device main movement with the elevation of the free water surface at the same time interval, a spectral analysis to evaluate the influence on the device response of the different damping coefficients introduced by the PTO, a comparison of the spectral response of the device and of the wave, and the calculation of the absorbed power and of the energy produced.

Keywords: Renewable energy, CECO, physical modeling, wave kinetic energy, power take off; absorbed power.

1. Introdução

Ao longo da história, com a evolução tecnológica e o desenvolvimento das sociedades, foram surgindo novas fontes de energia e novas formas de as explorar. A energia elétrica assumiu um papel muito relevante para a sustentabilidade da vida da sociedade moderna, uma vez que todos os setores de atividade dela dependem. Contudo, é necessário ter em consideração que a produção desta energia não pode depender apenas de recursos esgotáveis. É portanto fundamental desenvolver soluções alternativas e sustentáveis para a produção de energia elétrica. As inovações tecnológicas resultam num aumento do potencial de aproveitamento dos recursos energéticos renováveis, nomeadamente no que diz respeito à energia solar, geotérmica, eólica, das marés, hídrica, das ondas e da biomassa.

Atualmente, a percentagem de utilização de energias renováveis ainda é baixa. No âmbito do aproveitamento da energia das ondas ainda nos encontramos numa fase de demonstração dos conceitos que existem para aproveitar este recurso.

Porém, prevê-se que por volta de 2015 haja uma melhor visão de quais os conceitos que devem avançar para a fase de industrialização e demonstração comercial, esperando-se que esta esteja completa até 2020. Após esta data espera-se assistir à exploração comercial desta fonte de energia renovável, com custos de produção de energia a convergirem gradualmente para os custos de produção das restantes (Sarmento, 2012).

Como foi referido anteriormente, a humanidade tem ao seu dispor diversas fontes de energia renovável. De entre a panóplia de fontes referidas, a exploração da energia hídrica, eólica, da biomassa e solar já atingiu, em Portugal, uma maturidade tal, que permite que estas sejam comercialmente competitivas (Cruz e Sarmento, 2004).

Por outro lado, existem fontes de energia que ainda estão atualmente pouco exploradas, nomeadamente a energia dos oceanos, e em especial a energia das ondas marítimas. Importa frisar que Portugal apresenta boas condições para o aproveitamento desta fonte de energia: uma costa exposta a agitação marítima energética, uma plataforma continental estreita (*i.e.*, águas profundas próximo da costa), consumo e rede elétrica concentrados junto à costa continental.

O presente trabalho enquadra-se no âmbito do estudo do aproveitamento da energia renovável das ondas, e visa analisar a viabilidade e o funcionamento de um dispositivo inovador para a conversão da energia das ondas, o CECO.

Os objetivos prenderam-se, assim, com a construção de um modelo físico à escala desse dispositivo de aproveitamento da energia das ondas e com o estudo da sua viabilidade e características de funcionamento, através da realização de um variado conjunto de testes experimentais no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, do Departamento de Engenharia Civil da FEUP, utilizando técnicas de medição e experimentação avançadas.

2. Dispositivo em Estudo

O Conversor da Energia Cinética das Ondas (CECO) é um novo conceito de dispositivo de aproveitamento da energia das ondas.

A invenção encontra-se depositada no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) com o registo de Patente Nacional Nº 105015 (18 de dezembro de 2012). De acordo com o autor da patente, este dispositivo destina-se a converter a energia cinética do movimento longitudinal das ondas em energia elétrica.

No início deste trabalho, o dispositivo CECO encontrava-se numa fase muito embrionária (fase de conceito), não tendo sido ainda efetuado nenhum estudo, em modelo físico ou numérico, visando a validação do conceito, a caracterização do comportamento do dispositivo ou a avaliação da sua viabilidade.

2.1. Constituição

De acordo com o registo atual da patente, prevê-se que o dispositivo CECO tenha a estrutura apresentada na Figura 1, sendo composto por diversos componentes, de entre os quais se destacam:

- Dois módulos laterais móveis (MLM);
- Mecanismo cremalheira-engrenagem;
- Gerador;
- Tirantes;
- Elemento anelar estrutural;
- Corpo central fixo;
- Bóia (de sustentação vertical).

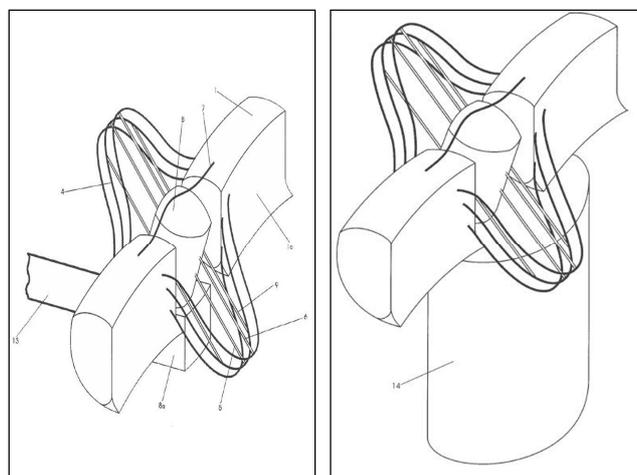


Figura 1. Estrutura do dispositivo CECO para fixação horizontal (esquerda) e vertical (direita).

2.2. Conceito

O CECO visa transformar o movimento longitudinal das ondas marítimas num movimento mecânico oblíquo que converte em eletricidade, fazendo deslocar os dois MLM na mesma direção da propagação destas e ligeiramente para cima. A transferência da energia incidente sobre os MLM para o corpo fixo é feita por um tirante, perfeitamente solidarizado com estes e em posição oblíqua.

Dentro do corpo rígido, o movimento de translação linear oblíquo, ascendente e descendente, do tirante, é convertido em rotativo através de um mecanismo cremalheira-engrenagem, que irá acionar um gerador fixo que produzirá energia elétrica.

2.3. Funcionamento

A onda, durante a sua propagação, incide sobre a superfície frontal de impacto dos MLM. As solicitações resultantes da interação da onda com esses elementos flutuantes originam forças de impulsão, arrastamento e inércia que, atuando sobre os mesmos, os fazem deslocar segundo uma direção oblíqua ascendente.

Quando a onda deixa de solicitar os MLM, estes tendem a retomar a sua posição inicial. Esta recuperação da posição primitiva é garantida pelo princípio de conservação da energia, a partir da energia potencial, garantida pela altura relativa entre os MLM e a posição em que eles se encontram quando em repouso.

Os MLM estão solidarizados a tirantes que atravessam o corpo central fixo, sendo que um deles, o tirante central, será responsável pela transferência do movimento linear oblíquo ao sistema cremalheira-engrenagem. Este tirante terá um sistema de cremalheira, que pode ser constituído por dentes inclinados, ao longo da sua superfície, que quando acoplado a uma engrenagem, constituída por uma roda dentada helicoidal, transforma o movimento linear oblíquo em movimento rotativo.

Assim, o movimento ascendente e descendente do tirante central, imposto pelas deslocções dos MLM, faz girar a engrenagem. Contudo, a velocidade de rotação desta pode não ser suficiente para ativar o gerador. Por esse motivo, a engrenagem poderá ter de estar em contacto com rodas desmultiplicadoras, ou seja, a amplificação do movimento rotativo será realizada por um conjunto mecânico elevador da velocidade de rotação, constituído por rodas dentadas helicoidais de redução do diâmetro de rotação original.

Assim, através de um pinhão, o gerador será ativado com uma velocidade de rotação superior à da engrenagem, de forma a produzir eletricidade.

3. Construção do Modelo Físico

3.1. Definição da escala geométrica

O modelo físico estudado é uma representação à escala do protótipo idealizado para o dispositivo CECO. No entanto, uma vez que à data de realização do estudo o protótipo não estava ainda completamente definido¹, a escala geométrica do modelo foi definida de forma a ser possível extrapolar com segurança os resultados obtidos para a escala real.

A primeira abordagem na definição da escala consistiu na definição de um plano de testes adequado ao estudo que se pretendia realizar, Quadro 1, tendo como variáveis², a altura de onda, H o período de onda, T , e o grau de inclinação do dispositivo, i .

As alturas de onda e os períodos de onda adotados referem-se a condições de agitação típicas da costa oeste Portuguesa.

Quadro 1. Condições de teste.

	i (°)	H (m)	T (s)
REGULAR	20	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0	8; 10; 12; 16
	30	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0	8; 10; 12; 16
	45	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0	8; 10; 12; 16
IRREGULAR	20	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0	8; 10; 12; 16
	30	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0	8; 10; 12; 16
	40	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0	8; 10; 12; 16
	40	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0	8; 10; 12; 16

Para a definição dessas condições de agitação utilizaram-se, como base, os registos da bóia ondógrafo instalada ao largo do porto de Leixões, para o período compreendido entre 1993 e 2003, Coelho (2005), que analisou as distribuições das alturas de onda significativas e dos respetivos períodos de onda médios (i.e., média dos períodos das ondas que foram consideradas no cálculo da altura de onda significativa).

Analisando essas distribuições, Figuras 2 e 3, concluiu-se que a classe de alturas de onda mais frequente engloba as alturas de 0,5 a 1,5 m e que os períodos de onda médios mais frequentes se situam entre 6 e 12 s.

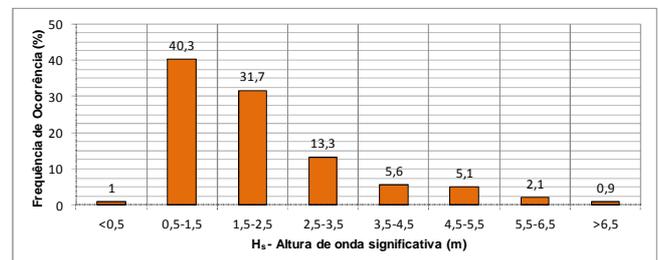


Figura 2. Distribuição das alturas de onda significativas (dados do IH para a bóia de Leixões, registados entre 1981 e 2003).

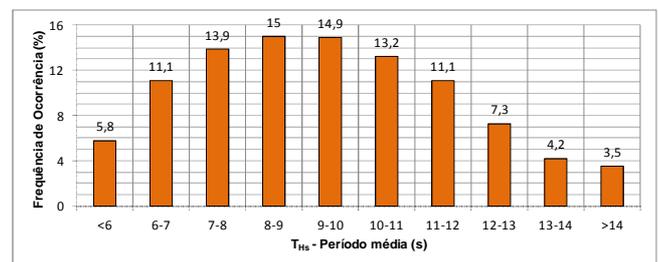


Figura 3. Distribuição do período de onda médio (dados do IH para a bóia de Leixões, registados entre 1981 e 2003).

No estudo do desempenho de dispositivos de conversão da energia das ondas é essencial avaliar a energia produzida, e os rendimentos associados, para diferentes condições de funcionamento.

¹ Um dos objetivos principais deste trabalho consistia em utilizar os resultados experimentais para ajudar na definição das dimensões do dispositivo CECO e na sua otimização, tendo em vista sempre a sua construção à escala do protótipo e uma futura instalação em mar aberto.

² No caso da agitação irregular a altura de onda é a significativa e o período é o de pico.

Para o efeito é necessário medir, direta ou indiretamente, a potência instantânea, que potencialmente poderá ser convertida em energia. Como, de acordo com a semelhança de *Froude*, o fator de escala da grandeza potência é igual a $\gamma\lambda_l^{3.5}$ por metro, quanto menor for o fator de escala geométrico adotado, λ_l , menor será a potência produzida no modelo físico (em que γ representa o quociente entre a massa volúmica da água no modelo e no protótipo).

Assim, para alguns fatores de escala, a potência no modelo poderá ser muito pequena, o que dificultaria a sua medição rigorosa e aumentaria a probabilidade de erros de medição.

Foi também necessário compatibilizar a escala do modelo com as dimensões da instalação experimental (e.g. altura de água no tanque de ondas), o plano de testes previsto e os limites do sistema de geração de ondas.

Após a ponderação das várias condicionantes existentes, o modelo foi construído à escala geométrica 1/20 e instalado no tanque de ondas com uma altura de água de 0,8 m.

3.2. Construção do modelo físico

A construção do modelo físico do dispositivo CECO foi baseada, naturalmente, e sempre que tal era possível, em informações registadas na patente, principalmente no que concerne ao conceito de funcionamento. Contudo, grande parte do dimensionamento e construção foram realizados com base em conhecimentos no domínio dos trabalhos marítimos.

O modelo físico do CECO apresenta uma complexidade apreciável, pelo que o processo de construção foi moroso e apresentou diversos problemas, que foram resolvidos com diferentes soluções, que foram testadas experimentalmente. O resultado final da construção do dispositivo CECO é apresentado na Figura 4.



Figura 4. Modelo físico do dispositivo CECO.

4. Instalação Experimental

Apesar de um modelo ser uma reprodução simplificada da realidade (protótipo), a modelação física é uma importante ferramenta de estudo, análise comportamental e otimização de conversores de energia das ondas. Contudo, para além do modelo, é necessário dispor de instalações experimentais e equipamentos que permitam a realização do estudo.

Neste trabalho assumem especial relevo o tanque de ondas, o sistema de geração de ondas, o sistema de aquisição dos dados da agitação, o sistema de medição de movimentos e a simulação do sistema de extração (PTO).

O modelo físico do dispositivo foi ensaiado no tanque de ondas de Laboratório de Hidráulica da SHRHA/DEC da FEUP. A aquisição dos dados da agitação marítima foi realizada com uma sonda de níveis hidrodinâmicos enquanto a medição dos movimentos do modelo foi feita com o sistema *Qualisys - Motion Capture System*.

Este último sistema utiliza duas câmara de infravermelhos e marcas refletoras que foram dispostas estrategicamente no modelo físico (Figuras 5 e 6), para medir os seus movimentos, que eram processados por um *software* próprio.

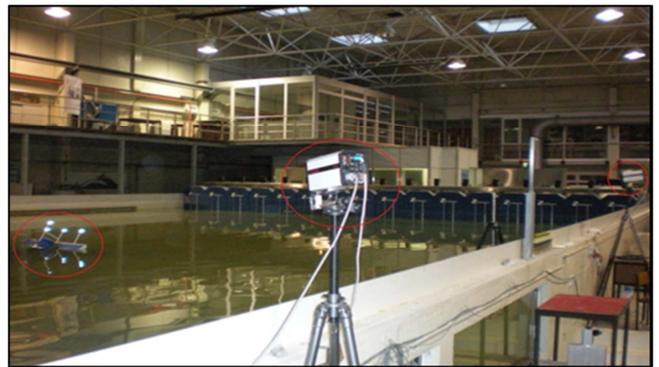


Figura 5. Posicionamento das câmaras do sistema Qualisys em relação ao modelo físico do CECO.



Figura 6. Disposição das marcas refletoras do sistema Qualisys no dispositivo CECO.

5. Sistema de Reprodução do PTO

5.1. Introdução

A definição do sistema de reprodução do PTO (*Power Take Off*) no modelo físico não é uma tarefa simples e linear. As tecnologias adequadas para uma utilização em protótipo, normalmente, não podem ser aplicadas no modelo à escala. No presente trabalho, a utilização de um dínamo poderia constituir uma boa opção para a reprodução do sistema PTO no modelo físico. Para representar o amortecimento introduzido pelo PTO, a força aplicada pelo dínamo deveria ser configurada de forma a ser proporcional à velocidade de deslocação dos elementos móveis do dispositivo e contrária a esta (Payne, 2008).

É recomendável a realização de testes experimentais com o sistema de reprodução do PTO, para as mesmas condições de agitação do estudo, com a finalidade de o otimizar.

Usualmente os sistemas de reprodução do PTO, aplicados a dispositivos de conversão da energia das ondas, dividem-se em cinco classes (Nielsen, 2003):

- Sistemas mecânicos lineares (Mechanical power);
- Sistemas hidráulicos (Fluid power);
- Sistemas OWC (Air power);
- Sistemas de galgamento (Water power);
- Sistemas mecânicos de rotação (Shaft power).

Neste estudo, a solução utilizada para a reprodução do PTO de forma simplificada foi a aplicação de um motor elétrico, que permitia a introdução de diferentes amortecimentos no deslocamento do dispositivo. Deste modo, foi necessário caracterizar o funcionamento desse sistema de reprodução do PTO para os diferentes amortecimentos introduzidos.

5.2. Caracterização do sistema de reprodução do PTO

O comportamento do motor utilizado não era conhecido à partida, tendo sido por isso necessário caracterizar a força de amortecimento introduzida por este elemento, para várias velocidades de rotação e condições de funcionamento (i.e., resistência introduzida).

Nesta fase foram realizados testes apenas com o motor em circuito aberto (amortecimento mínimo) e com o motor em circuito fechado (amortecimento máximo). A força de amortecimento introduzida pelo motor pretende reproduzir o amortecimento gerado durante a produção de energia elétrica com o dispositivo CECO em funcionamento. Assim, em primeiro lugar, foi necessário caracterizar o motor por uma curva de desempenho que relaciona a velocidade com que o modelo se desloca e a força de amortecimento gerada pelo motor. Para a determinação da curva de desempenho do motor foi idealizado um procedimento experimental que consiste, basicamente, na utilização de um fio enrolado em torno da polia do motor, com um peso fixo na extremidade do fio. Esse peso (de valor variável) experimenta um movimento vertical descendente devido, apenas, à ação da gravidade. A medição da velocidade e da aceleração que o peso adquiria no movimento descendente foi realizada com o sistema de medição *Qualisys*.

As Figuras 7 e 8 apresentam a instalação experimental que permitiu a caracterização do sistema de reprodução do PTO utilizado.

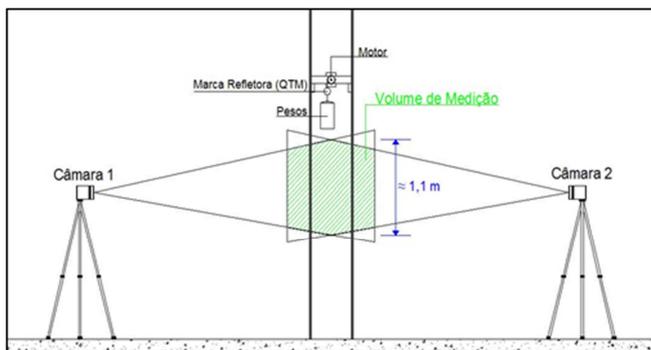


Figura 7. Esquema da instalação experimental para a caracterização do sistema de reprodução do PTO.

Para a determinação da curva de funcionamento do motor foi necessário calcular o seu coeficiente de amortecimento para vários valores de força aplicada (i.e., pesos).

Nos testes realizados pode constatar-se que o movimento descendente vertical do peso não era sempre uniforme. Com efeito, inicialmente o movimento é acelerado até que, quando a resultante de todas as forças em causa se anula, o movimento passa a ser uniforme.



Figura 8. Vista global da instalação.

Desta forma, analisando a Figura 7, pode-se verificar que o movimento vertical descendente se inicia fora da zona de medição, para que, quando o peso estiver dentro desta, o movimento seja praticamente uniforme. A análise posterior dos resultados da velocidade e da aceleração, determinados pelo sistema *Qualisys*, mostrou que o peso apenas tinha um movimento uniforme no último terço da zona de medição.

Para cada força aplicada foram realizados três ensaios, e analisadas as velocidades e as acelerações do último terço da zona de medição. Seguidamente, foi feita uma média dos resultados desses três ensaios e determinado o coeficiente de amortecimento produzido pelo motor, expressão (2).

$$m \cdot g = m \cdot \ddot{x} + c_a \cdot \dot{x} \quad [1]$$

$$c_a = \frac{m \cdot g - m \cdot \ddot{x}}{\dot{x}} \quad [2]$$

$$F_a = c_a \cdot \dot{x} \quad [3]$$

em que m representa a massa do peso em kg, g a aceleração da gravidade em m/s^2 , \ddot{x} a aceleração do peso segundo x , em m/s^2 , \dot{x} a velocidade do peso segundo x , em m/s , c_a o coeficiente de amortecimento do motor em $N/(m/s)$ e F_a a força de amortecimento produzido pelo motor em N.

O coeficiente de amortecimento do motor, bem como a força de amortecimento que lhe está associada, foram analisados para cada valor da força aplicada, tendo-se ajustado uma regressão, tendo-se ajustado uma regressão potencial do tipo:

$$F_a = a \times x^b \quad [4]$$

em que a e b são os parâmetros da regressão.

Desta análise resultou uma expressão que caracteriza a força de amortecimento introduzida pelo motor (PTO) em função da velocidade de deslocação do dispositivo CECO.

6. Estudo Experimental

6.1. Introdução

O trabalho experimental englobou a realização de ensaios para várias condições: agitação regular ou irregular; vários graus de inclinação do dispositivo CECO; consideração do dispositivo livre ou com um sistema de reprodução do PTO simplificado.

O objetivo final do trabalho era, como já foi referido, a análise do comportamento do dispositivo CECO e a realização de uma estimativa da energia produzida no modelo físico para diferentes condições de agitação. Os valores obtidos serão posteriormente extrapolados para o protótipo, utilizando os fatores de escala que resultam da aplicação dos critérios de semelhança.

6.2. Condições de teste

No estudo experimental foram definidas várias condições de teste para, posteriormente, ser feita a análise comparativa do funcionamento do dispositivo CECO para essas mesmas condições.

Os parâmetros comparativos considerados foram: o tipo de condições de agitação marítima, o período de onda, a altura de onda, o grau de inclinação do dispositivo CECO e o nível de amortecimento introduzido pelo sistema de reprodução do PTO.

O plano de testes inicial, Quadro 1, foi adaptado, para que os testes considerados fossem os mais adequados ao estudo de conversores de energia das ondas, tendo sido analisada a bibliografia da especialidade (e.g. Payne, 2008; Holmes e Nielsen, 2010).

Na realização dos testes com ondas regulares foram usadas, aproximadamente, 150 ondas, enquanto nos testes com ondas irregulares foi utilizada uma sequência temporal 2^{11} , que corresponde sensivelmente a 280 - 300 ondas.

Assim, garantiu-se que os ensaios tinham uma duração suficiente, para se conseguir a correta reprodução do comportamento do dispositivo e, ao mesmo tempo, garantir que os estados de agitação irregular eram reproduzidos com suficiente rigor.

6.3. Procedimento experimental

O sistema de aquisição de movimentos *Qualysis* e a sonda de níveis hidrodinâmicos foram calibrados antes de cada uma das séries de testes, para assegurar a fiabilidade dos resultados obtidos.

A calibração da sonda era realizada em segundo lugar, e requeria que a água no interior do tanque de ondas estivesse parada. Por fim, era necessário ativar o sistema de absorção ativa de reflexões, parte constituinte do sistema de geração de ondas.

A absorção ativa das reflexões tem como objetivo evitar que as ondas refletidas pelo modelo físico, ou pelas paredes do tanque de ondas, e que se propagam em direção ao sistema de geração, sejam de novo refletidas, criando fenómenos de re-reflexão das ondas originalmente geradas (Rosa Santos, 2010).

Os testes apenas eram iniciados após os procedimentos de calibração descritos anteriormente. O sistema de geração de ondas era o primeiro sistema a ser posto em funcionamento, para garantir que no momento inicial das medições, quer de níveis hidrodinâmicos, quer dos movimentos do modelo, as condições de agitação pretendidas já estavam bem definidas no interior do tanque. Assim, os testes eram iniciados 20 s após o início de funcionamento desse sistema.

6.4. Análise dos resultados

Após os ensaios experimentais, os resultados obtidos foram analisados para melhor compreender o funcionamento do dispositivo CECO, para as diferentes condições estudadas. Pretendeu-se, também, testar a sua viabilidade e identificar possíveis problemas e anomalias, e a eventual necessidade de realizar um estudo mais profundo de algumas questões importantes. Para tal, foram realizadas análises das séries temporais dos movimentos, velocidades e acelerações experimentados pelo dispositivo CECO, a análise espectral da resposta desse dispositivo, o cálculo da potência absorvida e da energia produzida.

Importa também identificar e clarificar alguma linguagem utilizada neste capítulo, para a sua correta compreensão. As designações habitualmente dadas aos seis movimentos que o dispositivo pode apresentar, referidas a um referencial local, são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2. Designação dos movimentos do dispositivo segundo os seus 6 graus de liberdade.

Movimento	Direção	Designação
Deslocamento	x	Avanço (surge)
	y	Deriva (sway)
	z	Arfagem (heave)
Rotação	x	Balanço (roll)
	y	Cabeceio (pitch)
	z	Guinada (yaw)

6.5. Análise dos movimentos do dispositivo

A primeira análise efetuada visou as séries temporais dos movimentos experimentados pelo dispositivo de conversão da energia das ondas durante os vários ensaios realizados no estudo.

Nas Figuras 9 e 10, a título de exemplo, é apresentado um trecho das séries temporais dos movimentos do dispositivo CECO, segundo os seus 6 graus de liberdade, para um dos ensaios experimentais realizados.

A partir deste tipo de resultados é possível compreender o comportamento do dispositivo CECO e comprovar, como seria de esperar, que a direção que apresenta deslocamentos de maior amplitude é a que está associada à produção de energia, ou seja, a direção x (avanço).

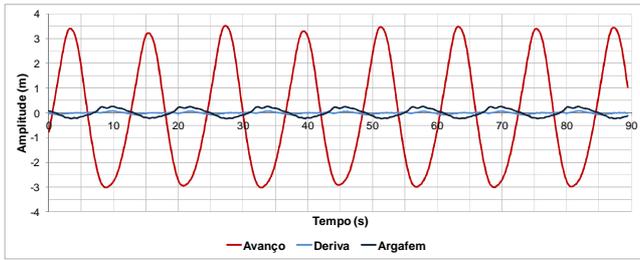


Figura 9. Trecho da série temporal dos movimentos (valores no protótipo): agitação regular; sem sistema de reprodução do PTO; $i = 30^\circ$; $H = 1,5$ m; $T = 12$ s. Movimentos de translação.

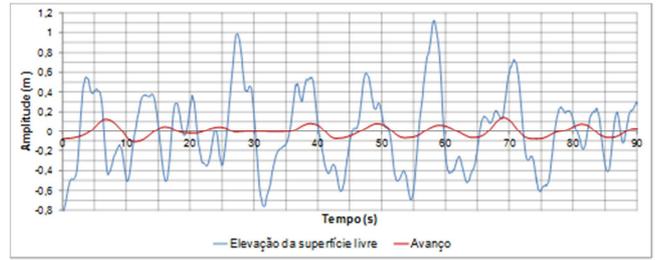


Figura 13. Elevação da superfície livre da água versus movimento de avanço do dispositivo: agitação irregular; sistema de reprodução do PTO com resistência mínima; $i = 45^\circ$; $H_s = 1,5$ m; $T_p = 10$ s.

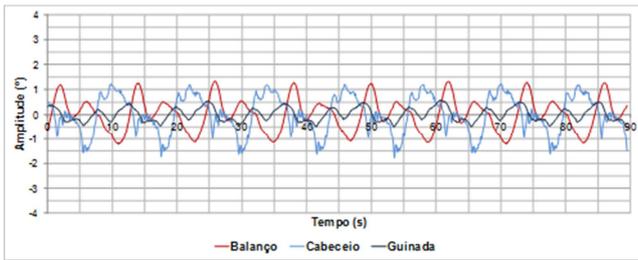


Figura 10. Trecho da série temporal dos movimentos (valores no protótipo): agitação regular; sem sistema de reprodução do PTO; $i = 30^\circ$; $H = 1,5$ m; $T = 12$ s. Movimentos de rotação.

A influência do amortecimento introduzido pelo sistema de reprodução do PTO na amplitude do movimento de avanço é apresentada na Figura 11. Verifica-se que a amplitude do movimento de avanço diminui, como era expectável, com o aumento do amortecimento introduzido pelo sistema de reprodução do PTO. Este resultado deve-se ao facto deste sistema reproduzir o amortecimento que está associado à produção de energia, que provoca uma conseqüente diminuição da energia cinética do dispositivo.

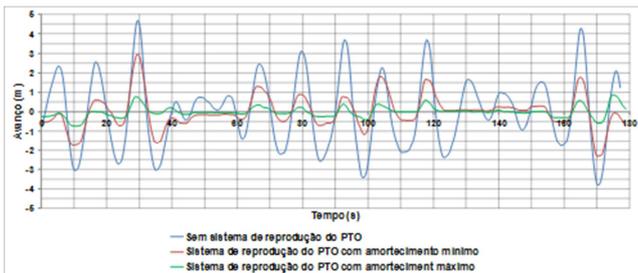


Figura 11. Amplitude do avanço para os 3 níveis de amortecimento considerados: agitação irregular; $i = 30^\circ$; $H_s = 1,5$ m; $T_p = 12$ s.

6.6. Análise comparativa da elevação da superfície livre e do movimento de avanço

A influência da variação da elevação da superfície livre da água, no movimento de avanço do dispositivo CECO, pode ser analisada com base nos resultados das Figuras 12 e 13.

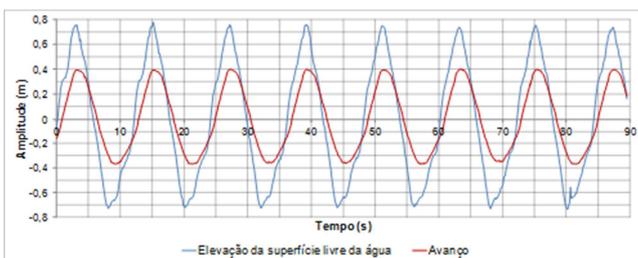


Figura 12. Elevação da superfície livre da água versus movimento de avanço do dispositivo: agitação regular; sistema de reprodução do PTO com resistência mínima; $i = 30^\circ$; $H = 1,5$ m; $T = 12$ s.

Nos ensaios com agitação regular, o movimento de avanço do dispositivo está diretamente relacionado com a elevação da superfície livre, Figura 12. Por outro lado, nos ensaios com agitação irregular tal não se verifica, Figura 13. Isto poderá ser justificado pelo facto de num estado de agitação irregular existirem ondas com diferentes alturas e períodos de onda. Quando os MLM são solicitados por ondas com períodos curtos, se o tempo necessário para retomarem a sua posição inicial, por gravidade, for superior ao período de onda, eles não conseguem retomar, experimentando uma menor amplitude de avanço.

6.7. Operador da amplitude da resposta

O operador da amplitude de resposta, Response Amplitude Operator (RAO), é uma estatística ou um conjunto de estatísticas, normalmente utilizada na conceção de navios, mas também aplicada no campo da conceção de estruturas flutuantes, permitindo estimar o comportamento provável das mesmas.

Apesar do dispositivo de conversão de energia das ondas em estudo não ser completamente flutuante, está provido de dois módulos laterais que o são. Desta forma, interessa investigar se é possível aplicar esta estatística para tentar prever o comportamento deste dispositivo quando instalado no mar.

Os RAO são, assim, funções de transferência usadas para determinar o efeito que um estado de agitação marítima irá ter sobre os movimentos de uma estrutura flutuante. No estudo do dispositivo CECO, a aplicação de um RAO poderia permitir, através da análise dos ensaios realizados, prever o comportamento do dispositivo para estados de agitação não considerados. O RAO pode ser determinado, para agitação regular, através da seguinte expressão:

$$RAO(f) = \frac{A_{avanço}}{H} \quad [5]$$

em que $A_{avanço}$ representa a amplitude média da oscilação de avanço dos MLM em m, e H a altura de onda do estado de agitação considerado.

A determinação do Response Amplitude Operator, para um estado de agitação irregular, pode ser realizada através da seguinte expressão (Chakrabarti, 2007):

$$RAO(f)^2 = \frac{S_{avanço}(f)}{S_{onda}(f)} \quad [6]$$

em que $S_{avanço}(f)$ representa o espectro de variância relativo à oscilação de avanço do dispositivo e $S_{onda}(f)$ o espectro de variância da agitação marítima.

Contudo, concluiu-se que o dispositivo não apresentava um comportamento linear para nenhuma das condições de teste estudadas, pelo que não se afigura como viável a aplicação de RAO, para um determinado conjunto de frequências, de forma a prever o comportamento do dispositivo CECO para outras condições de teste.

6.8. Análise da potência absorvida e da energia produzida

A análise realizada envolveu o estudo da potência teórica de um estado de agitação marítima, a análise da evolução temporal da potência absorvida pelo dispositivo CECO e da energia produzido pelo dispositivo nos vários ensaios.

Em primeiro lugar foi calculada a potência teórica da onda e, posteriormente, a potência absorvida pelo dispositivo, de forma a quantificar a sua eficiência. Assim, para determinar a potência teórica da onda no local de implantação do dispositivo, foi necessário classificar a profundidade relativa de água em que este ficará instalado, de forma a selecionar a metodologia de cálculo da potência da onda mais adequada.

O critério de classificação utilizado foi a relação d/L , tendo-se então concluído que profundidades de instalação de 16 m (valores no protótipo) correspondem a profundidades de água intermédias. Importa frisar que a profundidade de água utilizada no estudo em modelo físico poderá não corresponder à profundidade de instalação do dispositivo em mar aberto (i.e., no protótipo). De facto, essa profundidade foi selecionada tendo em conta as diferentes condicionantes existentes e os objetivos do presente estudo.

Porém, numa primeira abordagem foi calculada da potência da onda para grandes profundidades.

Analisando a bibliografia da especialidade, e as expressões apresentadas pelos seus autores, conclui-se que existem expressões diferentes, apesar de semelhantes, para este cálculo. Assim, para o cálculo da potência disponível numa onda por metro de desenvolvimento da crista de um estado de agitação marítima regular foi utilizada a expressão [7], Falnes (2007), e para um estado de agitação irregular a expressão [8], Payne (2008) e Pontes e Candelária (2009).

$$P = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T \quad [7]$$

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m0}^2 T_E \quad [8]$$

em que ρ representa a massa volúmica da água salgada em kg/m^3 , g a aceleração da gravidade em m/s^2 , H a altura de onda em m, H_{m0} a altura de onda significativa estimada pela análise em frequência em m, T o período de onda em s e T_E o período de energia em s.

O cálculo, tanto da potência teórica disponível num estado de agitação marítima, como da potência absorvida e a energia produzida pelo dispositivo CECO é feito para o intervalo de tempo associado à duração de cada ensaio.

Numa segunda fase foi calculada a potência da onda para a profundidade de água no local de instalação do dispositivo CECO, que assume uma maior complexidade. Por exemplo, para um estado de agitação irregular, Falnes (2007) propõe:

$$P = \rho g \int_0^\infty C_g(f) \cdot S(f) df \quad [9]$$

A última análise dos resultados experimentais prendeu-se com o cálculo da potência absorvida e da energia produzida tendo em vista a avaliação da influência do amortecimento introduzido pelo sistema de reprodução do PTO.

As Figuras 14 e 15 apresentam séries temporais da potência absorvida em alguns dos ensaios realizados, com o sistema de reprodução do PTO a produzir amortecimento máximo e mínimo.

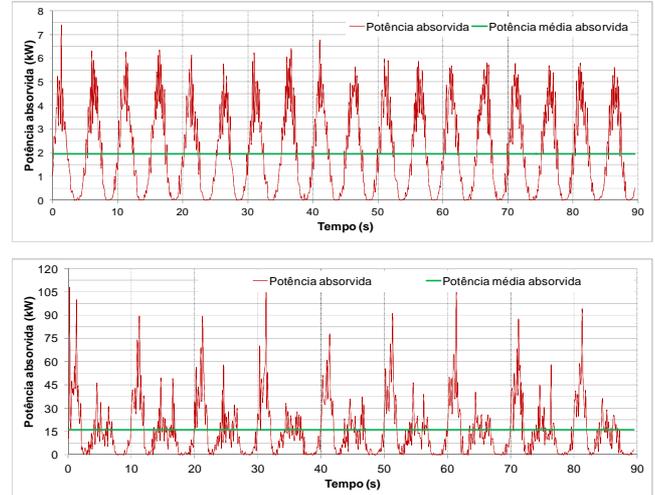


Figura 14. Potência absorvida pelo dispositivo em testes realizados com o PTO a produzir amortecimento mínimo (superior) e máximo (inferior). Agitação regular; $i = 30^\circ$; $H = 1,5$ m; $T = 10$ s.

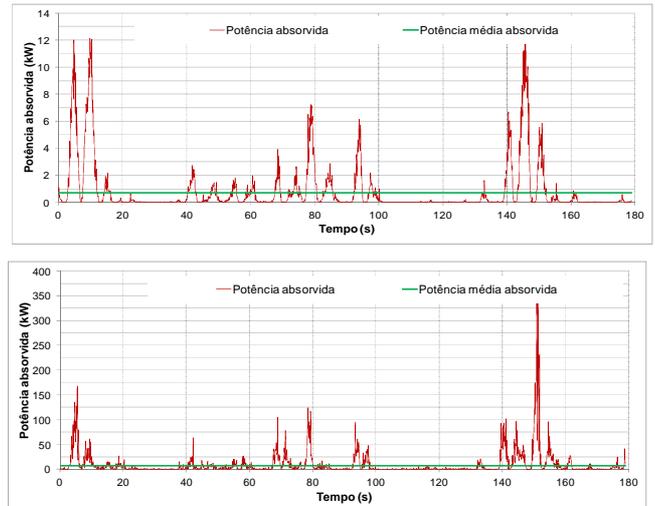


Figura 15. Potência absorvida pelo dispositivo em testes realizados com o PTO a produzir amortecimento mínimo (superior) e máximo (inferior). Agitação irregular; $i = 30^\circ$; $H_S = 1,5$ m; $T_P = 12$ s.

6.9. Análise de efeitos de escala e de laboratório

Os efeitos de escala resultam de não se conseguir garantir que todas as forças relevantes que atuam no protótipo são representadas corretamente no modelo físico. De facto, em laboratório é muito difícil a obtenção de uma semelhança completa.

O critério de semelhança adotado foi o de *Froude*. Por esse motivo, podem ocorrer efeitos de escala que resultam da incorreta reprodução das forças de tensão superficial e das forças viscosas, entre outras.

A incorreta representação das forças viscosas, ou seja, a não consideração do critério de semelhança de *Reynolds* pode ser controlada garantindo-se um número de *Reynolds* suficientemente elevado de forma a garantir que o escoamento é turbulento no modelo. Da não consideração deste critério advém que o amortecimento viscoso no modelo poderá assumir valores maiores do que no protótipo.

Os efeitos de laboratório resultam, porém, da incapacidade de representar corretamente, em laboratório, todas as forças exteriores e condições fronteira do protótipo, sendo por isso independentes da escala do modelo. Uma vez que os MLM do CECO não se encontram totalmente submersos, no seu movimento, podem sofrer, por exemplo, a influência da força do vento, diminuindo ou aumentando a velocidade do seu deslocamento. Porém, tais condições são difíceis de reproduzir em laboratório.

No que diz respeito aos efeitos de laboratório relacionados com a incorreta representação das condições de fronteira, salienta-se a fronteira refletora criada pelas pás do sistema de geração de ondas. Na realidade a agitação é refletida na costa e propaga-se livremente para o largo. Um outro efeito a considerar é a encurvadura dos tirantes e a torção do elemento estrutural anelar. De facto, os tirantes apresentam uma ligeira encurvadura devido à ação do peso próprio do MLM. A encurvadura dos tirantes e a torção do elemento estrutural anelar não são facilmente extrapoladas para o protótipo. Assim, a solução do protótipo pode não se comportar como a do modelo podendo resultar assim num efeito de laboratório.

7. Conclusões e Estudos Futuros

A construção do modelo físico baseou-se, naturalmente, e sempre que possível, em informações registadas na patente do dispositivo, principalmente no que concerne ao conceito de funcionamento. Contudo, grande parte da construção e do dimensionamento do modelo foram realizados com base em conhecimentos no domínio dos trabalhos marítimos. Importa frisar que o modelo físico do CECO apresenta uma complexidade apreciável e que o processo de construção foi moroso e apresentou várias dificuldades e problemas, que foram ultrapassados com diferentes soluções.

Porém, as dificuldades encontradas permitiram identificar um conjunto de aspetos sensíveis do modelo que deverão ser convenientemente acautelados aquando da (eventual) passagem para fases mais avançadas de desenvolvimento do dispositivo e, naturalmente, no dimensionamento do dispositivo tendo em vista a sua aplicação no mar.

Apesar de no modelo físico estas questões terem sido resolvidas, é importante realçar que, no protótipo, podem ser muito mais difíceis de resolver. Em suma, a análise dos ensaios realizados permitiu validar o conceito de funcionamento do dispositivo CECO, uma comparação entre os diversos modos de funcionamento e a análise e compreensão de aspetos sensíveis que deverão ser analisados com mais rigor em estudos posteriores.

Com efeito, na opinião dos autores do presente artigo, considera-se que o dispositivo apresenta condições para avançar para novas fases de desenvolvimento, mas com a consciência de que ainda necessita de um intenso estudo, para reunir as condições necessárias para chegar à fase de protótipo.

No trabalho realizado foram identificados alguns pontos de especial interesse para o desenvolvimento do modelo físico do dispositivo CECO, os quais deverão ser abordados nos estudos futuros.

Desses pontos salienta-se: o estudo mais aprofundado de diversas hipóteses para os guiamentos dos tirantes, de forma a garantirem atrito e folgas mínimos; e o estudo de diferentes sistemas para a reprodução do PTO. É também essencial realizar testes para uma gama mais vasta de condições, incluindo ensaios de sobrevivência, ensaios para estados de agitação marítima de crista curta e ensaios para estados de agitação irregular com base no espectro de *Pierson-Moskowitz*, entre outros.

Referências

- Chakrabarti, S. K. (2007). *Statistics of Wave and Structure Response*. Dynamics of Floating Structures and Model Testing. WESEX INSTITUTE.
- Coelho, C. (2005). *Riscos de Exposição Ambiental de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira*. Tese de Doutoramento, Secção Autónoma de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Cruz, J., Sarmento, A. (2004). *Energia das Ondas: Introdução aos Aspetos Tecnológicos, Económicos e Ambientais*. Instituto do Ambiente, Alfragide.
- Falnes, J. (2007). *A Review of Wave-Energy Extraction*. Marine Structures 20, pp 185-201, Trondheim, Norway.
- Holmes, B., Nielsen, K. (2010). *Guidelines for the Development & Testing of Wave Energy Systems*. Final Technical Report, OES-IA, Annex II, Task 2.1.
- Nielsen, K. (2003). *Implementing Agreement on Ocean Energy Systems*. ANNEX II REPORT 2003, IEA - OCEAN ENERGY SYSTEMS, Denmark.
- Payne, G. (2008). *Guidance for the Experimental Tank Testing of Wave Energy Converters*. SuperGenMarine, Edinburgh.
- Pontes, T. e Candelária, A. (2009). *Wave Data Catalogue for Resource Assessment of IEA-OES Member Countries*. Report from INETI for the IEA-OES.
- Rosa Santos, P. (2010). *Análise da Interação de Navios com Dispositivos de Acostagem e Amarração. Estudo em Modelo Físico do Posto "A" do Terminal de Petroleiros do Porto de Leixões*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil - Hidráulica, FEUP, Porto.
- Sarmento, A. (2012). *A Engenharia e a Tecnologia nas Energias renováveis Offshore*. INGENIUM, ii série, nº131, Outubro 2012, pp. 34-35, Ingenium Edições, Lda., Portugal.
- [1] <http://www.minerva.uevora.pt/odimeteosol/energias.htm#intro>