

# ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA O APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS Optimization Study of a Wave Energy Converter

JOÃO MARINHEIRO <sup>(1)</sup>, PAULO ROSA-SANTOS <sup>(2)</sup>, FRANCISCO TAVEIRA PINTO <sup>(3)</sup> e JOSÉ PINHO RIBEIRO <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Mestre em Engenharia Civil, FEUP,  
Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, joao.manuel.marinheiro@gmail.com

<sup>(2)</sup> Professor Auxiliar Convocado, FEUP,  
Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, pjrsantos@fe.up.pt

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

<sup>(4)</sup> Engenheiro Eletrotécnico, PT – Portugal Telecom,  
Rua de Felizardo de Lima, nº43, 2º, 4100-283 Porto, jpinhoribeiro@sapo.pt

## Resumo

Ao longo dos anos têm sido desenvolvidas tecnologias que permitem explorar fontes de energia renovável que anteriormente não eram aproveitadas, possibilitando, cada vez mais, a redução do consumo de recursos energéticos não renováveis, como o petróleo, o carvão, o gás natural, entre outros. Neste contexto foi idealizado um novo dispositivo, o CECO – Conversor da Energia Cinética das Ondas, que visa converter a energia cinética e potencial das ondas em energia elétrica. O presente artigo apresenta o estudo de otimização do dispositivo CECO, que surge na continuidade do trabalho realizado por Teixeira (2012), no qual foram estudadas, pela primeira vez, as características de funcionamento e a viabilidade deste novo dispositivo. Para o efeito foi necessário construir um novo modelo do dispositivo à escala geométrica 1/20, que incluiu várias alterações e melhoramentos em relação ao modelo anterior, designadamente ao nível da geometria dos elementos flutuantes, do guiamento dos tirantes, da secção do corpo central fixo, da estrutura anelar e dos tirantes.

No estudo experimental foram utilizadas várias ferramentas e técnicas avançadas de medição e de análise de resultados, que permitiram o estudo da resposta do dispositivo para diferentes condições de agitação marítima e modos de funcionamento, nomeadamente: inclinações do dispositivo, níveis de amortecimento introduzido pelo *Power Take Off* (PTO), graus de submersão dos módulos flutuantes e posições do centro de gravidade desses elementos. Foi ainda definido e caracterizado o sistema de reprodução do PTO. Na determinação da potência absorvida, salienta-se a utilização de duas metodologias alternativas, uma baseada na medição direta da diferença de potencial produzida pelo PTO utilizado e a outra, indireta, baseada na medição da resposta do dispositivo com o sistema *Qualisys* e na aplicação de curvas de desempenho do PTO (previamente definidas). As larguras de captura determinadas mostram que o conceito de funcionamento associado ao CECO é promissor, justificando a realização de estudos complementares de otimização.

**Palavras-chave:** Energias renováveis, modelação física, *Power Take Off*, energia cinética, potência absorvida.

## Abstract

Over the years, new technologies to exploit renewable energy sources (not exploited previously) were developed, allowing reducing the consumption of non-renewable energy resources such as oil, coal, natural gas, among others. In this sense, a new device was idealized, the CECO - Wave Kinetic Energy Converter, which aims at converting the kinetic and potential energy of the waves into electrical energy. This paper presents the optimization study of the CECO wave energy converter and gives continuity to the work carried out by Teixeira (2012) that studied, for the first time, the performance and the feasibility of this new device. For that, a new physical model of CECO was constructed on a geometric scale of 1/20, which included several changes and improvements in relation to the previous model, especially in what concerns the geometry of the floating elements, guiding of central rods, structural bars and cross-section of the central body.

In the experimental study, several tools and advanced measurement and data analysis techniques were used, which allowed studying the behavior of the device for different wave conditions and modes of operation, namely: damping levels introduced by *Power Take Off* (PTO), slope of the device, submersion levels of the floating elements and positions of the center gravity of those elements. The PTO system was also defined and characterized. Two different techniques were used to evaluate the power absorbed, one based on the direct measurement of the difference of potential produced by the PTO, and the other one, indirectly, based on the measurement of the device's response with a motion capture system and the PTO performance curves (previously determined). The calculated capture widths showed that the CECO concept is promising, thus justifying further optimization studies.

**Keywords:** Renewable energies, physical modeling, *Power Take Off*, kinetic energy, absorbed power.

## 1. Introdução

A necessidade de se adotarem políticas que assegurem um desenvolvimento sustentável ganha mais expressão e importância, no domínio da energia. As constantes exigências para encontrar alternativas às tradicionais fontes de energia elétrica (diretivas comunitárias e protocolo de Quioto), fazem despertar a ciência para o desenvolvimento de fontes energéticas “amigas” do ambiente.

De entre as diferentes fontes de energia renovável, que se caracterizam por serem inesgotáveis, podem destacar-se a energia hídrica, eólica, solar, geotérmica, da biomassa, das ondas e das marés. Estas duas últimas fontes de energia são aquelas que, em Portugal, estão menos desenvolvidas. No entanto, têm vindo a ser efetuados vários estudos para o desenvolvimento e a implementação de dispositivos para a conversão da energia proveniente dessas fontes em energia elétrica.

Portugal possui boas condições naturais para a exploração da energia das ondas, as quais, aliadas aos conhecimentos técnico-científicos existentes, colocam o país numa posição privilegiada no mercado internacional de exploração desta fonte energética (Cunha *et al.*, 2008). Com efeito, tendo em conta o recurso energético médio-alto (cerca de 40 kW por metro de frente de onda), uma plataforma continental estreita (*i.e.*, águas profundas próximo da costa), consumo e rede elétrica concentrados junto à costa e, ainda, cerca de 250 km de costa disponíveis para a instalação de potenciais parques ao largo, torna-se bastante promissor o desenvolvimento deste tipo de conversores para futura implementação ao longo da costa portuguesa. De resto, dadas as condições já referidas do território nacional para a obtenção de energia elétrica a partir de fontes de energia renováveis, o governo português tem vindo a criar uma série de incentivos para a promoção das mesmas (Cunha *et al.*, 2008 e APREN, 2010). Neste contexto, o presente artigo apresenta o trabalho que foi desenvolvido tendo em vista a otimização de um novo dispositivo para a conversão da energia das ondas, o CECO - Conversor da Energia Cinética das Ondas, registado com a patente nº105015. Este dispositivo procura converter, quer a energia cinética, quer a energia potencial das ondas, em energia elétrica. O modo de funcionamento e a viabilidade do dispositivo CECO foram analisados, pela primeira vez, por Teixeira (2012), que testou um modelo simplificado do dispositivo, construído à escala geométrica 1/20 com base nas especificações do registo de patente.

Para este trabalho foi desenvolvido e construído um novo modelo físico, que integra um conjunto de melhoramentos, sobretudo no que concerne aos aspetos que condicionaram os resultados do estudo anterior. Deste modo, e através de um extenso conjunto de testes experimentais, realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), pretendeu-se confirmar a viabilidade do dispositivo, analisar a influência de algumas variáveis de projeto no seu desempenho, e apresentar contributos para trabalhos a desenvolver tendo em vista a sua otimização.

Sempre que tal é possível, as conclusões obtidas são comparadas com as apresentadas por Teixeira (2012).

## 2. Dispositivo em Estudo - CECO

### 2.1. Constituição

De acordo com o registo de patente, o dispositivo CECO é composto por vários componentes, Figura 1, entre os quais se podem destacar:

- (1) Dois módulos laterais móveis (MLM);
- (2) Mecanismo cremalheira-engrenagem;
- (3) Gerador (instalado dentro do corpo central);
- (4) Tirantes;
- (5) Elemento anelar estrutural;
- (6) Corpo central fixo;
- (7) Boia de sustentação vertical.

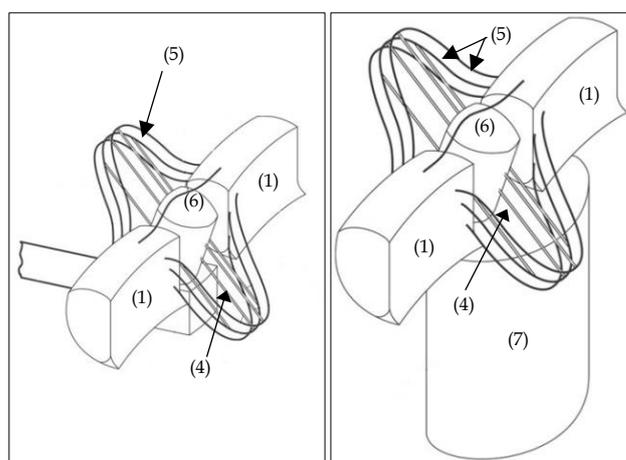


Figura 1. Perspetiva para fixação horizontal (à esquerda) e vertical (à direita) do dispositivo.

### 2.2. Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do dispositivo CECO consiste no movimento linear oblíquo dos seus elementos móveis, em relação a um corpo central fixo, por ação das ondas que com ele interagem. Com efeito, a onda, durante a sua propagação, incide sobre a superfície frontal de impacto dos MLM. Na interação das ondas com esses elementos flutuantes originam-se forças de impulso, arrastamento e inércia que os deslocam segundo uma direção oblíqua ascendente. A Figura 2 permite uma melhor perceção do funcionamento descrito.

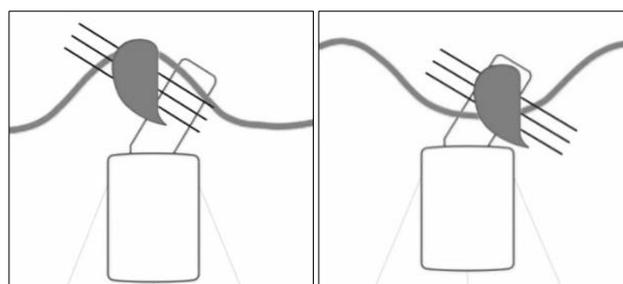


Figura 2. Esquematização do funcionamento do CECO: movimento ascendente - crista da onda a passar pelos MLM (à esquerda); movimento descendente - cava da onda a passar pelos MLM (à direita)

Quando a crista da onda deixa de solicitar os MLM, estes tendem a retomar a sua posição inicial. Esta recuperação da posição primitiva é garantida pelo princípio da conservação da energia, a partir da energia potencial, que é assegurada pela diferença de cotas entre os MLM e a posição em que eles se encontravam quando em repouso. O ciclo repete-se com a chegada duma nova onda.

Os elementos flutuantes estão solidarizados a tirantes, em posição oblíqua, que atravessam o corpo central fixo. Um dos tirantes, numa posição mais central, será o responsável pela transferência do movimento linear oblíquo ao sistema cremalheira-engrenagem.

Este tirante está portanto munido de uma cremalheira, possivelmente com dentes inclinados, ao longo da sua superfície, e, quando em contacto com uma engrenagem, constituída por uma roda dentada helicoidal, transforma o movimento linear oblíquo em rotativo.

O movimento ascendente e descendente do tirante central, devido ao movimento dos MLM, faz girar a engrenagem. Contudo, a velocidade de rotação deste elemento pode não ser suficiente para ativar o gerador.

Por isso, a engrenagem poderá ter de estar em contacto com um conjunto de rodas desmultiplicadoras. Assim, a amplificação do movimento de rotação é feita por um sistema mecânico “elevador” da velocidade de rotação inicial, composto por rodas dentadas helicoidais para a redução do diâmetro de rotação original.

Deste modo, e através de um pinhão, o gerador é ativado com uma velocidade de rotação superior à da engrenagem, produzindo electricidade.

### 3. Construção do Modelo Físico

O registo de patente indica, como referência, 4,5 m e 7,5 m para a altura e a largura dos MLM, respetivamente, e ainda um comprimento de 7 m para os tirantes.

Para a construção do modelo físico, Teixeira (2012) considerou as dimensões indicadas para os MLM e um comprimento de 20 m para os tirantes, pois o comprimento indicado iria, provavelmente, condicionar o funcionamento do dispositivo nos testes realizados para as ondas de alturas mais elevadas.

No presente trabalho, considerou-se relevante minimizar os esforços de flexão aplicados no elemento superior que liga os dois MLM, e estudar uma geometria desses módulos que permitisse absorver mais energia, em profundidade, *i.e.*, na coluna de água, e não apenas na proximidade da superfície livre.

Assim, alteraram-se as dimensões dos MLM para 8 m de altura e 4,5 m de largura (valores no protótipo), Figura 3. Para o comprimento dos tirantes foi considerado o valor de 20 m, tal como no estudo anterior.

De forma a aumentar a robustez do modelo físico, a secção do corpo central fixo passou de 16 para 20 cm e a dos tirantes e estrutura anelar de 1.0 para 1.6 cm (valores no modelo).

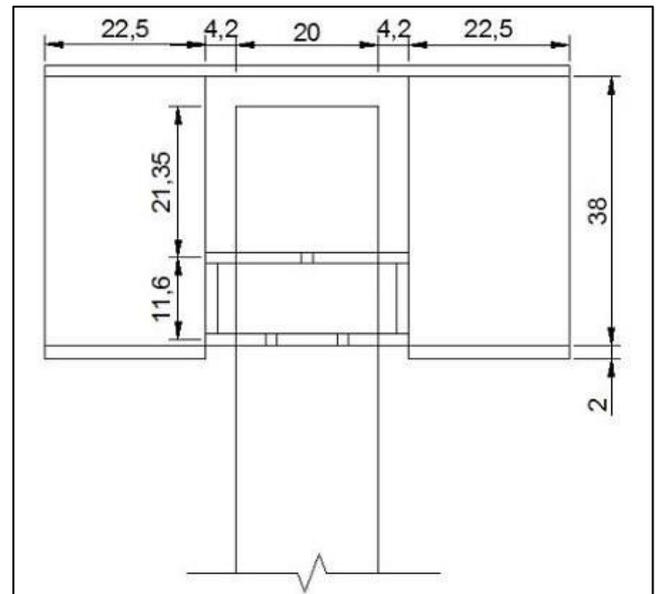


Figura 3. Dimensões do modelo físico (medidas em cm).

A posição dos MLM (em repouso) foi definida de forma a minimizar os esforços aplicados nos elementos estruturais do dispositivo e retirar o máximo rendimento das forças atuantes nos elementos flutuantes. Assim, procurou-se que o centro de gravidade desses módulos flutuantes estivesse o mais próximo possível do tirante central, visto ser este que transmite o movimento oblíquo ao sistema de reprodução do PTO. Refere-se, também, que as alterações realizadas no modelo físico permitiram a variação de alguns parâmetros, por forma a estudar a melhor configuração do dispositivo, destacando-se a possibilidade de utilizar diferentes: graus de submersão dos MLM, inclinações do dispositivo, níveis de amortecimento introduzidos pelo sistema de reprodução do PTO e posições do centro de gravidade (CG) dos MLM.

O grau de submersão dos MLM pode ser alterado através da colocação de material de lastro (areia) no interior desses módulos, nos quais foram construídas duas divisórias (uma superior e outra inferior). Assim, tornou-se possível, não só modificar o grau de submersão, como também a posição do CG, conforme o compartimento onde era colocada a areia.

O modelo físico construído é o apresentado na Figura 4.



Figura 4. Vista frontal (à esquerda) e lateral (à direita) do modelo físico do dispositivo CECO.

#### 4. Instalação Experimental

O desenvolvimento de um dispositivo conversor da energia das ondas compreende várias fases, desde a validação inicial do conceito até à aplicação de um protótipo no mar.

Na fase de desenvolvimento em que o CECO se encontra atualmente seria completamente inviável realizar testes com agitação marítima real. É importante fazer avanços progressivos, no que concerne às dimensões e à complexidade do modelo físico, realizando, em cada fase, e para cada modelo, um conjunto de testes experimentais. As conclusões retiradas a partir da análise de cada conjunto de testes permitem definir as modificações que é necessário implementar no modelo físico para colmatar os problemas encontrados.

Para a realização deste estudo experimental foi necessário dispor de instalações e de um conjunto de equipamentos para a reprodução do problema em estudo e a medição das variáveis pretendidas, nomeadamente um tanque de ondas, um sistema de geração de ondas, um sistema de aquisição de dados da agitação marítima, um sistema de medição de movimentos e um sistema de simulação do PTO.

Neste trabalho foi usado o tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA da FEUP. Para a aquisição de dados de agitação marítima foram usadas sondas de níveis hidrodinâmicos e o *software* HR WaveData. A medição dos movimentos do dispositivo foi feita com o sistema *Qualisys - Motion Capture System*, que se baseia na utilização de duas câmaras de infravermelhos, para captar, em cada instante, a posição das marcas refletoras colocadas no modelo físico, Figura 5. Foi também desenvolvida uma ferramenta que permitiu a medição direta das diferenças de potencial (ddp) geradas pelo PTO durante os testes experimentais.



Figura 5. Posicionamento das câmaras de infravermelhos em relação ao CECO e marcas refletoras nele instaladas.

#### 5. Sistema de Reprodução do PTO

A definição do sistema de reprodução do PTO, no modelo físico, não é uma tarefa simples, uma vez que as tecnologias utilizadas no protótipo (escala real) não podem, geralmente, ser aplicadas no modelo à escala. No trabalho realizado foi utilizado um motor elétrico, capaz de introduzir no sistema diferentes níveis de amortecimento, que simulam diferentes condições de extração de energia, através da “regulação” de uma resistência externa.

O sistema PTO adotado pertence à classe de sistemas mecânicos de rotação (Nielsen, 2003). No modelo físico, o motor elétrico (gerador), ao ser acionado pelo movimento ascendente ou descendente dos MLM, pode rodar em sentidos contrários. A alteração desta característica, colocando o motor a rodar sempre no mesmo sentido, eliminaria os pontos de velocidade nula relativos à inversão do sentido do movimento, e poderia resultar numa melhoria do rendimento médio do dispositivo CECO.

Uma vez que o comportamento do motor, para as condições de funcionamento testadas, não era conhecido à partida, foi necessário realizar um conjunto de testes para caracterizar a força de amortecimento que este introduz no sistema, para várias velocidades de rotação e graus de amortecimento. A força aplicada pelo motor no tirante central visa, portanto, simular o amortecimento associado à produção de energia elétrica. Desta forma, foi necessário caracterizar a curva de desempenho do motor, relacionando a velocidade a que o dispositivo CECO se move com a força aplicada pelo motor.

Para o efeito, foi idealizado um procedimento experimental que consistia na colocação do motor numa posição elevada, com um fio enrolado em torno da polia. Na extremidade, o fio estava ligado a um recipiente, utilizado para a colocação de blocos de diferentes pesos. Com a colocação de pesos no recipiente, por ação da gravidade, o conjunto adquiria um movimento vertical descendente, que seria mais rápido, ou mais lento, consoante o peso total colocado.

O movimento do conjunto foi captado pelo sistema *Qualisys* e, simultaneamente, foi efetuada a medição da ddp gerada pelo motor, durante o movimento descendente dos pesos, com a ferramenta de monitorização do PTO. Desta forma, pretendia-se comparar, numa fase posterior, os valores da potência absorvida pelo dispositivo CECO estimados por aplicação de duas metodologias alternativas, uma baseada na medição direta da diferença de potencial produzida pelo PTO e a outra, indireta, baseada na medição da resposta do dispositivo com o sistema *Qualisys* e na aplicação das curvas de desempenho do PTO previamente definidas. A Figura 6 apresenta a instalação experimental.

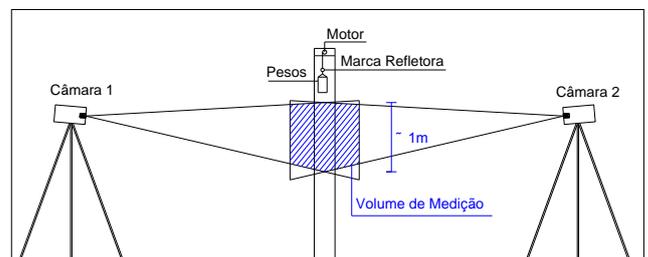


Figura 6. Esquema da instalação experimental desenvolvida para a caracterização do sistema de reprodução do PTO (sem escala).

O volume útil de medição compreende apenas a parte final do percurso, pois, inicialmente, o movimento descendente dos pesos é acelerado.

De facto, apenas quando a resultante das forças atuantes no sistema é nula, o movimento passa a uniforme, com uma velocidade constante e uma aceleração nula (aproximadamente).

Para a determinação da curva de desempenho do sistema de reprodução do PTO foi necessário calcular o seu coeficiente de amortecimento para diferentes valores de força aplicada (pesos).

Importa ainda frisar que o grau de amortecimento que é introduzido pelo sistema de reprodução do PTO está associado, não apenas à resistência externa aplicada, mas também à resistência interna do motor e do cabo que fazia a ligação entre este e o sistema de análise.

**5.1. Determinação da potência pelo método indireto**

O coeficiente de amortecimento e a força de amortecimento produzidos pelo sistema utilizado na reprodução do PTO (motor elétrico) foram estimados com base nas expressões [2] e [3], respetivamente,

$$mg = m\ddot{x} + c_a \dot{x} \tag{1}$$

$$c_a = \frac{mg - m\ddot{x}}{\dot{x}} \tag{2}$$

$$F_a = c_a \dot{x} \tag{3}$$

em que m representa a massa do conjunto de pesos utilizados em cada teste, em kg, g a aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>,  $\dot{x}$  a velocidade da massa, segundo x, em m/s,  $\ddot{x}$  a aceleração da massa, também segundo x, em m/s<sup>2</sup>, c<sub>a</sub> o coeficiente de amortecimento, em N/(m/s), e F<sub>a</sub> a força de amortecimento produzida pelo sistema de monitorização do PTO, em N.

A curva de desempenho do sistema de reprodução do PTO, para as diferentes condições de teste (valores de resistência externa utilizada), foi determinada com base no ajuste de curvas de regressão aos pontos obtidos experimentalmente.

Uma vez que o sistema de aquisição de movimentos regista os movimentos do dispositivo e o sistema de monitorização do PTO os valores das ddp geradas pelo motor, é necessário converter cada um desses conjuntos de registos para valores de potência absorvida pelo dispositivo, para que se possam comparar os resultados obtidos pelos dois métodos.

Assim, e depois de determinadas as curvas de regressão que melhor traduzem a variação da força de amortecimento introduzida pelo PTO com a velocidade do dispositivo, é possível fazer o cálculo da potência instantânea absorvida através da expressão [4].

$$P = F_a * v \tag{4}$$

em que P representa a potência e v a velocidade média do movimento segundo a direção x.

**5.2. Determinação da potência pelo método direto**

Para a determinação da potência absorvida pelo dispositivo com base nos registos da ddp medida (pelo método direto), é necessário calcular a potência útil e a potência dissipada, através das expressões [5] e [7], respetivamente.

$$P_u = \frac{V^2}{R} \tag{5}$$

$$I = \frac{V}{R} \tag{6}$$

$$P_{dissipada} = (R_{interna} + R_{cabo}) * I^2 \tag{7}$$

$$P_{total} = P_u + P_{dissipada} \tag{8}$$

em que V representa a ddp, em Volts, R a resistência de carga, em Ohms, I a intensidade da corrente, em Amperes, R<sub>interna</sub> e R<sub>cabo</sub> representam a resistência interna do motor elétrico e do cabo de ligação que lhe está associado, em Ohms. Neste trabalho foram utilizadas as seguintes resistências de carga (resistências externas): 1, 5.6, 10, 22 e 100 Ohms.

Como seria de esperar, os valores obtidos a partir das ddp foram diferentes dos obtidos a partir do cálculo da força de amortecimento aplicada pelo motor.

No decorrer do trabalho verificou-se que a estanquidade do motor não foi assegurada por completo.

Por esse motivo, foram realizados testes adicionais com o intuito de analisar a influência da humidade na resistência interna do motor, para uma dada gama de valores de intensidade de corrente elétrica.

Esses testes consistiram na utilização de uma fonte de alimentação externa, que fornecia ao motor os valores de intensidade de corrente elétrica pretendidos. Com o veio do motor elétrico bloqueado, era realizada a leitura das ddp produzidas.

Depois de compreendida a variação da resistência interna do motor com a intensidade de corrente, foi possível fazer o cálculo da potência total para cada um dos testes realizados para a caracterização do sistema de reprodução do PTO, e comparar esses valores com os obtidos a partir dos registos do sistema de aquisição de movimentos *Qualisys* (método direto).

Ao compará-los, conclui-se que a diferença entre os dois métodos não era sempre constante, nem a sua evolução com o aumento da velocidade. Os resultados obtidos com as resistências externas de 22 e 1 Ohms são apresentados na Figura 7.

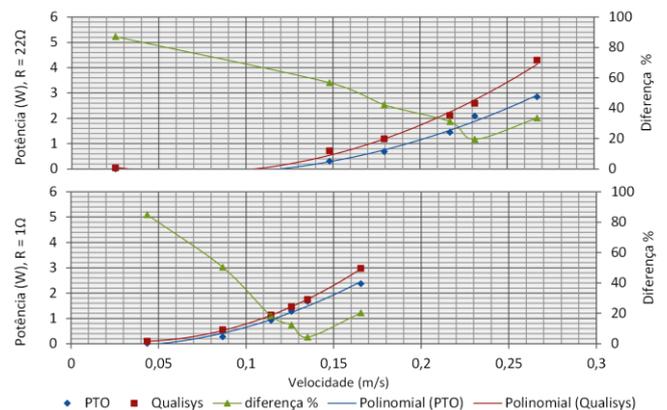


Figura 7. Valores da potência total estimada a partir dos dois métodos utilizados, em Watts, e a diferença entre eles, em %.

A análise da Figura 7 revela que parece existir um ponto de funcionamento ótimo para cada grau de amortecimento, e que o mesmo está associado a uma determinada velocidade de rotação do veio do motor. O motor utilizado possui uma caixa de desmultiplicação, a qual viabilizou a sua utilização para velocidades de rotação da polia baixas, que resultam das pequenas velocidades de translação dos MLM.

Esta caixa desmultiplicadora permitiu que o ponto ótimo de funcionamento desse motor estivesse próximo das velocidades experimentadas pelo dispositivo nos testes experimentais. No entanto, como não existia uma caixa de velocidades para possibilitar a adaptação do fator de desmultiplicação à velocidade de rotação da polia (*i.e.*, à velocidades de translação dos MLM), pode concluir-se que o motor elétrico usado não funcionou em condições ótimas em alguns dos testes experimentais realizados. Isto poderá explicar a existência de maiores diferenças, entre os valores de potência estimados pelos dois métodos, em alguns testes (Marinheiro, 2013). Há também que ter em consideração as perdas que ocorrem nas transmissões/transformações do movimento linear em movimento oblíquo, na conversão de energia mecânica em energia elétrica, entre outros.

## 6. Estudo Experimental

### 6.1. Condições de teste

A componente experimental foi subdividida em duas fases. A primeira consistiu num estudo preliminar para avaliar, fundamentalmente, se o modelo físico construído permitia realizar ensaios para as condições e parâmetros desejados.

Na segunda fase, e após algumas modificações do modelo, foi possível realizar uma vasta gama de testes, com vista à análise da resposta do dispositivo CECO, para os diferentes estados de agitação marítima e condições de funcionamento selecionadas, designadamente: inclinações do dispositivo, níveis de amortecimento introduzido pelo PTO, graus de submersão dos MLM e posições do centro de gravidade dos MLM.

Para o presente trabalho foram selecionadas condições de agitação marítima características da costa portuguesa, em particular a costa oeste.

Assim, o plano de testes foi definido tendo por base os registos da boia ondógrafo instalada ao largo do Porto de Leixões, para o período de tempo compreendido entre 1993 e 2007, tratados estatisticamente por Silva *et al.* (2008), Figura 8.

Foi ainda tida em conta a relação entre a altura de onda significativa e os respetivos períodos (Coelho, 2005), bem como os limites da instalação experimental.

Uma vez que, na realidade, os estados de agitação marítima apresentam, usualmente, ondas irregulares de crista curta, com períodos, comprimentos e direções variáveis (no tempo e no espaço), foram consideradas, nos testes experimentais, não só ondas regulares, mas também ondas irregulares de crista longa (C.L.) e crista curta (C.C.).

Assim, o plano de testes para a segunda fase do estudo, que foi o mais abrangente, é o apresentado no Quadro 1, onde GS representa o grau de submersão dos MLM, em %,  $i$  o ângulo de inclinação do dispositivo, em graus, H a altura de onda nos testes com ondas regulares e a altura de onda significativa nos testes com ondas irregulares, em metros, T o período de onda nos testes com ondas regulares e o período de onda de pico nos testes com ondas irregulares, em segundos, e  $\Omega$  as resistências externas utilizadas para simular os diferentes níveis de amortecimento, em Ohms.

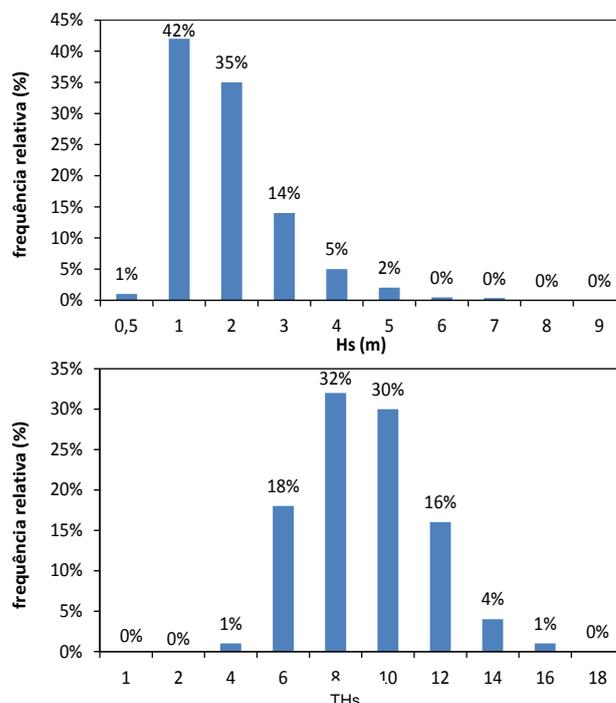


Figura 8. Distribuição em frequência da altura de onda significativa (em cima) e do período associado à altura de onda significativa (por exemplo, média dos períodos associados às ondas utilizadas na determinação de  $H_s$ ), para o conjunto de dados recolhidos pela estação ondógrafo de Leixões entre 1993 e 2007 (Silva *et al.*, 2008)<sup>1</sup>.

Quadro 1. Plano de testes da segunda fase experimental.

GS	Agitação	$\Omega$	$i$ (°)	H (m)	T (s)
≈ 80%	Regular Irregular C.L.	100	45	1	8
				2	8; 10; 12
				3	10; 12
≈ 60%	Regular Irregular C.L.	10	30	1	8
				2	8; 10; 12
≈ 60%	Regular Irregular C.L.	22 5,6 1	45	1	8
				2	8; 10; 12
				3	12
≈ 60%	Regular Irregular C.L.	10	45	1	8
				2	8; 10; 12
				3	10; 12; 14
				4	12; 14
≈ 60%	Irregular C.C.	10	45	1	8
				2	8; 10; 12
				3	10

### 6.2. Procedimento experimental

No início de cada fase de testes experimentais foi verificado o nível da água no tanque de ondas e colocado o modelo físico do dispositivo CECO no local previamente definido. De seguida, era feita a calibração dos vários equipamentos utilizados: sistema de aquisição de movimentos *Qualisys* e sistema de aquisição da agitação marítima *HR WaveData*.

<sup>1</sup> Excluindo os anos de 1993, 1995 e 2001, com menos de 40% de registos válidos no Inverno.

Para o efeito era fundamental que a superfície livre da água estivesse em repouso. Após esta fase era necessário ativar o sistema de absorção ativa de reflexões do sistema e geração de ondas.

O sistema de absorção ativa de reflexões tem como objetivo evitar que as ondas refletidas pela praia dissipadora, pelo modelo físico e pelas paredes do tanque, e que se propagam em direção ao sistema de geração, sejam refletidas, de novo, nas pás desse sistema, originando a re-reflexão das ondas geradas inicialmente.

Na fase de testes experimentais, o sistema de monitorização do PTO era o primeiro a ser colocado em funcionamento, seguindo-se o sistema de geração de agitação marítima e, cerca de 20 s mais tarde, para que as condições de agitação pretendidas estivessem já bem definidas, eram ativados, em simultâneo, os sistemas de aquisição de agitação marítima e de aquisição de movimentos do dispositivo.

### 6.3. Análise de resultados

#### 6.3.1. Introdução

A análise que se apresenta nos pontos seguintes tem como objetivo estudar a influência de um conjunto de parâmetros no funcionamento do dispositivo, por forma a compreender as consequências das modificações introduzidas no modelo físico do dispositivo CECO.

Por último, a análise global dos resultados obtidos permitirá identificar problemas e alguns pormenores que merecem estudos mais aprofundados. Para o efeito, é efetuada uma análise das séries temporais dos movimentos, velocidades e acelerações do dispositivo, em cada teste experimental.

Foi realizada ainda a análise da resposta do dispositivo CECO no domínio da frequência e o cálculo da potência absorvida, da potência dissipada e da energia produzida. No presente artigo dá-se especial ênfase ao deslocamento de translação na direção  $x$ , o avanço (ou *surge*), pois é o movimento principal do dispositivo.

#### 6.3.2. Caracterização da resposta segundo o modo de avanço

Numa primeira fase é importante entender de que forma o dispositivo responde à variação da elevação da superfície livre da água. A Figura 9 apresenta as séries temporais da elevação da superfície livre da água, e do movimento de avanço do dispositivo, para os tipos de agitação estudados.

Em primeiro lugar, importa indicar a convenção de sentidos usada aquando da calibração do sistema *Qualisys*: sentido positivo - movimento do dispositivo “para a frente e para baixo”; sentido negativo - movimento do dispositivo “para trás e para cima”. Portanto, se com a passagem da crista da onda, o dispositivo se movimentar “para trás e para cima”, o movimento é no sentido negativo. Por outro lado, se com a passagem de uma cava, o movimento for “para a frente e para baixo”, ocorre no sentido positivo.

A análise da Figura 9 mostra que o dispositivo CECO, nos testes realizados com ondas regulares, acompanha de perto a variação da elevação da superfície livre da água. Pode-se também concluir que o período desse movimento é igual ao período da onda.

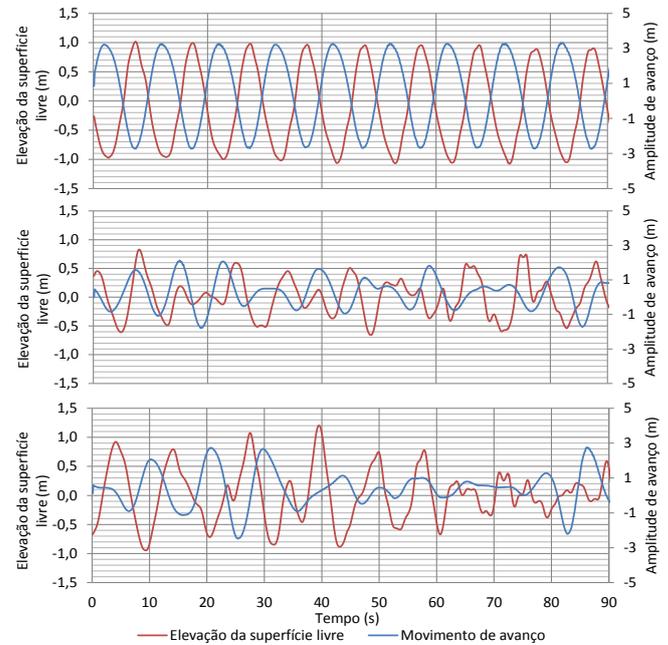


Figura 9. Séries temporais da elevação da superfície livre da água e do movimento de avanço do dispositivo (valores no protótipo): agitação regular (em cima), agitação irregular C.L. (ao centro) e agitação irregular C.C. (em baixo).  $H = 2$  m,  $T = 10$  s,  $i = 45^\circ$ ,  $R = 100 \Omega$ ,  $G_s = 60\%$ .

Nos testes realizados com ondas irregulares podem ocorrer duas situações distintas. Quando, numa série temporal de elevação da superfície livre da água, ocorrem ondas com alturas e períodos de onda pequenos, o dispositivo parece não ter capacidade para responder com a rapidez necessária à passagem dessas ondas. No entanto, quando, nessa série temporal, o dispositivo é excitado por ondas de alturas e períodos mais elevados, o seu comportamento é semelhante ao descrito nos testes com ondas regulares.

A influência do grau de amortecimento introduzido pelo sistema de reprodução do PTO, na resposta do dispositivo CECO, foi estudada para 5 valores da resistência de carga. A Figura 10 compara os resultados obtidos, em função da altura e do período de onda.

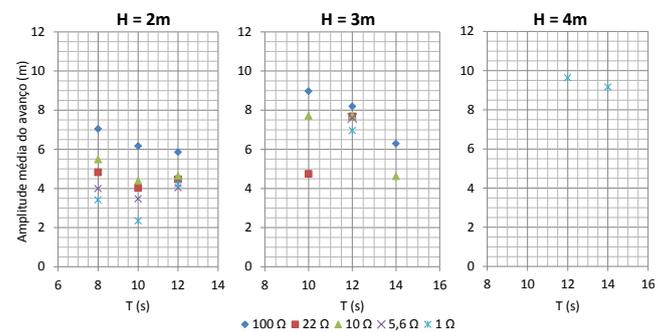


Figura 10. Comparação da amplitude significativa do movimento de avanço: agitação regular;  $i = 45^\circ$ ;  $G_s = 60\%$ .

Regra geral, a amplitude do movimento de avanço decresce com o aumento do período da onda, mas aumenta com a altura de onda. Relativamente ao grau de amortecimento, pode verificar-se que, em geral, quanto menor for o grau de amortecimento, ou seja, quanto maior for a resistência de carga aplicada (resistência externa), maior será a amplitude do movimento de avanço.

Refere-se ainda que, quanto maior era a resistência de carga (resistência externa) aplicada no sistema, menor era o nível de amortecimento introduzido, uma vez que, dessa forma, o motor funcionava mais afastado do “curto-circuito”. Ao invés, pode afirmar-se que, quanto menor era a resistência de carga, maior era o grau de amortecimento, pois o motor estava mais próximo de trabalhar em “curto-circuito”.

No presente estudo procurou-se também verificar se existia linearidade no comportamento do dispositivo CECO, no que diz respeito ao nível de amortecimento, à amplitude de avanço e à altura de onda. Para esse efeito foi utilizado o quociente entre a amplitude do movimento de avanço e a altura de onda (altura de onda significativa no caso de ondas irregulares). Esta análise permitiu concluir que não existe linearidade no funcionamento do dispositivo testado, o que corrobora as conclusões já obtidas por Teixeira (2012). Portanto, não se considera viável estimar o comportamento do dispositivo, para condições muito diferentes das estudadas, em termos de alturas de onda e de graus de amortecimento, utilizando *Response Amplitude Operators* – RAO. Outro aspeto analisado com detalhe foi a influência do grau de submersão dos MLM no funcionamento do dispositivo, Figura 11. A variação da amplitude média do avanço com o período de onda apresenta tendências contrárias para os dois graus de submersão considerados qualquer que seja o tipo de agitação e a altura de onda.

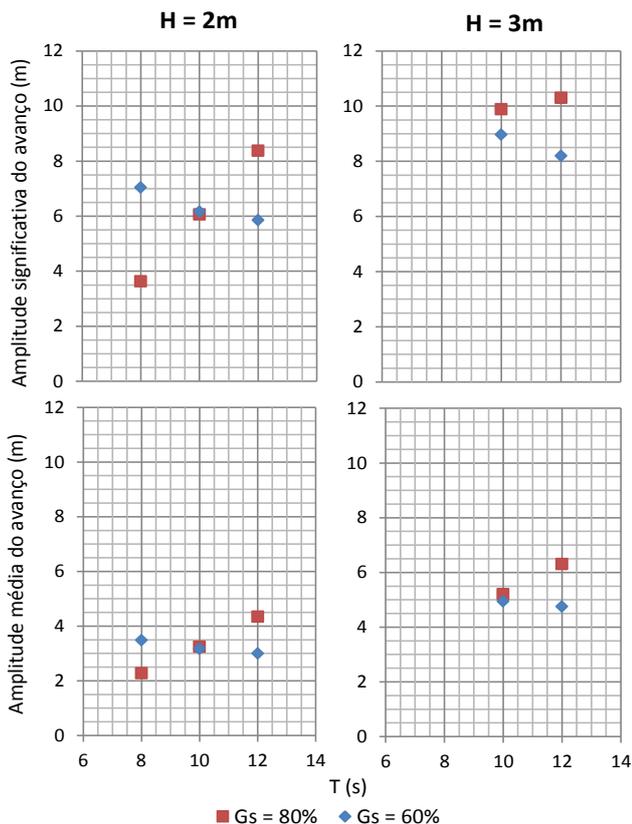


Figura 11. Amplitude do movimento de avanço em função do grau de submersão dos MLM: agitação regular (em cima) e agitação irregular CL (em baixo).  $i = 45^\circ$ ;  $R = 100 \Omega$ .

Assim, para os períodos mais pequenos, o Gs de 60% parece ser o mais vantajoso, enquanto para os períodos mais elevados, as amplitudes do avanço são maiores quando o dispositivo apresenta um Gs de cerca de 80%.

Esta constatação pode resultar de, para os períodos de onda mais pequenos, os MLM com mais peso (massa), terem maior dificuldade em acompanhar a onda e a estar em fase com ela. Importa, também, analisar a influência da inclinação do dispositivo CECO no seu funcionamento, Figura 12.

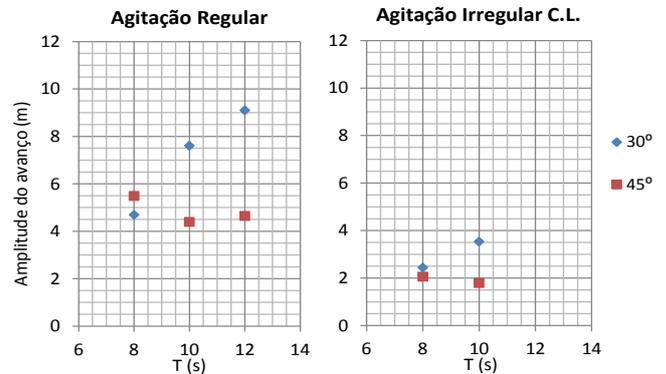


Figura 12. Amplitude do movimento de avanço em função da inclinação do dispositivo:  $G_s = 60\%$ ;  $R = 10 \Omega$ ;  $H = 2 \text{ m}$ .

A inclinação de  $30^\circ$  (relativamente a um plano horizontal) torna-se progressivamente mais vantajosa com o aumento do período de onda. Este facto pode ser justificado, pelo menos em parte, pela relação existente entre a altura e o comprimento de onda (declividade,  $\delta = H/L$ ), compreendendo-se, assim, a vantagem da inclinação de  $30^\circ$  face à inclinação de  $45^\circ$  para períodos mais elevados, uma vez que nos testes analisados se manteve constante a altura de onda. A influência do tipo de agitação no comportamento do dispositivo pode ser analisada com base na Figura 13.

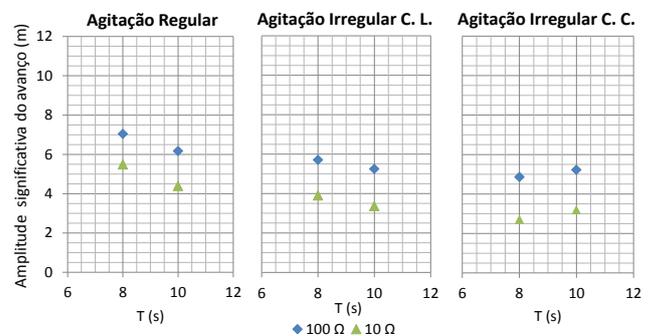


Figura 13. Amplitude significativa do movimento de avanço para os diferentes tipos de agitação considerados e para dois níveis de amortecimento diferentes:  $H = 2 \text{ m}$ ;  $G_s = 60\%$ ;  $i = 45^\circ$ .

Verifica-se que a amplitude significativa do movimento de avanço é maior nos testes realizados com ondas regulares. Contudo, importa referir que as alturas de onda registadas nos testes com ondas regulares ( $H$ ), não são bem equivalentes às alturas de onda registadas nos testes com ondas irregulares ( $H_s$ ). Neste caso,  $H_s$  representa a média do terço superior das alturas de onda registadas durante o ensaio. Os resultados para ondas irregulares de crista curta apresentam uma variação, com o período de onda, diferente da que foi descrita anteriormente, e que pode ser justificada pelo facto de, para estados de agitação 3D (*i.e.*, crista curta) e para períodos de onda baixos, o dispositivo experimentar oscilações noutras direções que não a do avanço, resultando numa diminuição da amplitude desse movimento.

Para períodos de onda mais elevados, as oscilações nas outras direções também se verificam, no entanto, a solicitação da onda incidente é já suficiente para mover significativamente o dispositivo segundo a sua direção de funcionamento.

6.3.2. Potência absorvida, energia produzida e eficiência

Um dos objetivos deste trabalho consistia na determinação da potência absorvida, da energia produzida e da eficiência do dispositivo CECO, utilizando dois métodos diferentes, um baseado na medição, direta, da diferença de potencial produzida pelo PTO e o outro, indireto, baseado na medição dos movimentos do dispositivo com o sistema *Qualisys* e na aplicação das curvas de desempenho do PTO.

Para determinar a eficiência (largura de captura relativa) do dispositivo CECO foi necessário calcular a potência teórica da onda, tendo por base a classificação da profundidade de água no local de implantação do dispositivo, *d*. O critério de classificação utilizado foi a relação entre a profundidade de água no local de instalação e o comprimento de onda, ou seja, *d/L*. O comprimento de onda foi determinado, para cada um dos períodos de onda estudados, usando a relação de dispersão,

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad [9]$$

em que *L* representa o comprimento de onda, em metros, *g* a aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>, *T* o período da onda, em segundos e *d* a profundidade da água no local, em metros. A profundidade de água considerada nos testes foi de 16 m (valores no protótipo), pelo que o dispositivo foi estudado em profundidades intermédias. A potência teórica da onda, por metro de comprimento da crista, para ondas regulares, foi determinada pela seguinte expressão (Dermibilek e Linwood, 2008),

$$P = \frac{\rho g H^2}{8} C_g \quad [10]$$

em que  $\rho$  representa a massa volúmica da água salgada, em kg/m<sup>3</sup>, *H* a altura de onda, em metros, e *C<sub>g</sub>* a velocidade de grupo de ondas, em m/s.

Nos estados de agitação irregular, foi utilizada a expressão apresentada por Falnes (2007), [11].

$$P = \rho g \int_0^\infty C_g(f) \cdot S(f) df \quad [11]$$

em que *S(f)* representa a densidade de energia da onda para a frequência, *f*.

Neste trabalho foram aplicados dois métodos alternativos para determinar a potência absorvida e a energia produzida pelo dispositivo CECO. A aplicação de qualquer um desses métodos apresenta pormenores que podem traduzir-se em resultados que não refletem, exatamente, a realidade. Uma vez que a análise baseada no método direto (ddp) mostrou ser a mais conservativa, pois está já a “jusante” das perdas que ocorreram na conversão da energia mecânica, associada ao movimento do dispositivo CECO, em energia elétrica, os resultados que se apresentam a seguir são os obtidos com base nesse método.

Uma vez que, num protótipo, a potência dissipada no *Power Take Off* deverá ser bastante inferior àquela que se verificou ocorrer nos testes experimentais realizados (uma vez que a resistência interna do PTO não foi reproduzida à escala), considerou-se que 80% da potência dissipada no sistema de reprodução do PTO poderia ser aproveitada no protótipo.

A influência do nível de amortecimento introduzido pelo sistema de reprodução do PTO no valor da potência total absorvida pelo dispositivo CECO, em função do período e da altura de onda, pode ser analisada a partir da Figura 15.

Apesar da existência de algumas oscilações, concluiu-se que a potência média absorvida nos testes com ondas regulares aumentava com a altura de onda e diminuía com o período, Figura 14. Apesar do já referido, para alturas de onda de 4 m, além de se observar uma evolução da potência absorvida diferente, pois esta parece aumentar com o período, os valores globais são inferiores aos registados para alturas de onda de 3 m, o que não seria de esperar à partida.

Esta situação poderá ser explicada pelo afastamento das condições de funcionamento do sistema de reprodução do PTO em relação ao seu ponto ótimo.

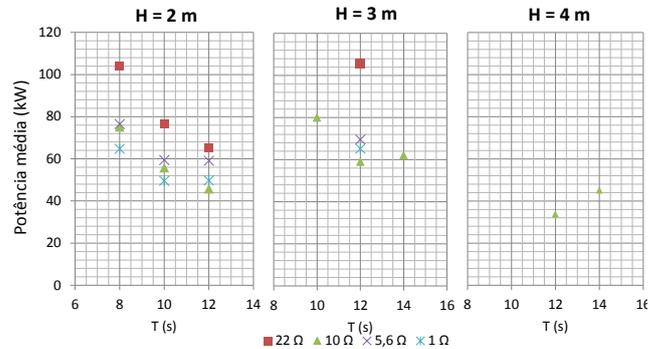


Figura 14. Potência média absorvida pelo dispositivo: agitação regular; *i* = 45°; *G<sub>s</sub>* = 60% (valores no protótipo).

A inclinação do dispositivo mais vantajosa (i.e., aquela que apresenta potências absorvidas mais elevadas) foi a de 45°, Figura 15. Contudo, as diferenças entre os resultados obtidos para as duas configurações consideradas diminuem com o aumento do período de onda, sendo por isso de esperar que a inclinação de 30° se torne mais apropriada para períodos de onda elevados. Importa ainda frisar que, como a altura de onda se manteve fixa em 2 m, o aumento do período de onda resulta numa diminuição da declividade da onda.

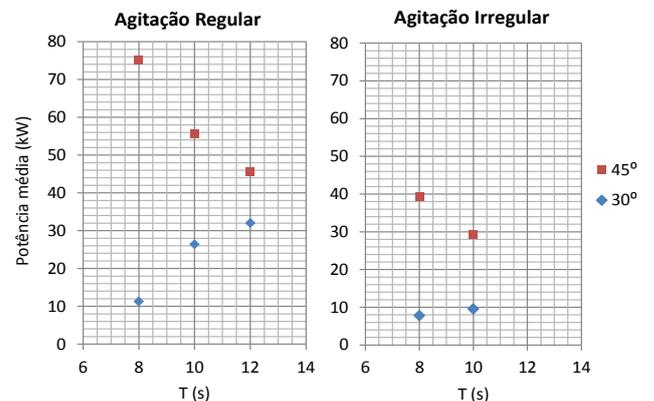


Figura 15. Potência média absorvida para diferentes inclinações: *H* = 2 m; *G<sub>s</sub>* = 60%; *R* = 10 Ω.

A análise da eficiência do dispositivo foi realizada com base na largura de captura relativa,  $L_{cap}$ , determinada a partir do quociente entre a potência média absorvida por unidade de comprimento dos componentes do dispositivo destinados à absorção da energia da onda (neste caso a largura dos dois MLM) e a potência média da onda incidente por unidade de comprimento da crista. Os resultados obtidos permitiram concluir que, em geral, a  $L_{cap}$  apresenta uma variação, para os parâmetros estudados, idêntica à descrita para a potência média absorvida. Pode referir-se que nos testes realizados a largura de captura relativa variou entre 2 e 31%.

#### 6.4. Efeitos de escala e de laboratório

Os efeitos de escala resultam da impossibilidade de garantir que todas as forças atuantes e relevantes no protótipo estão representadas corretamente no modelo físico.

O critério de semelhança utilizado neste estudo foi o de *Froude*, pelo que podem ter ocorrido efeitos de escala associados à incorreta reprodução das forças de tensão superficial e viscosas, entre outras. Os efeitos da não consideração da semelhança de *Reynolds* podem ser minoradas garantindo que o número de *Reynolds* é suficientemente elevado, para que o escoamento possa ser considerado turbulento.

Os efeitos de laboratório estão associados à incapacidade de representar corretamente, no laboratório, todas as condições fronteira e forças exteriores que atuam no protótipo, sendo independentes da escala utilizada na construção do modelo físico. Numa aplicação real do CECO (no protótipo), os dois MLM poderão estar sujeitos à ação do vento, a qual poderá influenciar significativamente o seu funcionamento.

Relativamente à representação das condições fronteira pode destacar-se a fronteira refletora criada pelas pás do sistema de geração de ondas. No protótipo, as ondas propagam-se em direção à costa, sendo refletidas e voltando para o largo. Importa ainda referir os efeitos provenientes da incorreta construção do modelo físico devido à sua complexidade.

## 7. Conclusões e Estudos Futuros

Este trabalho tinha como objetivo principal a otimização do funcionamento do dispositivo CECO. Para atingir esse fim foi necessário conceber e construir um novo modelo físico do dispositivo à escala geométrica 1/20, tendo por base o modelo construído por Teixeira (2012), mas incorporando um conjunto de modificações e de melhorias. O modelo físico construído apresenta maior robustez, sendo ainda de salientar as modificações efetuadas ao nível da geometria dos MLM, que visaram aumentar a eficiência do dispositivo (largura de captura relativa).

No estudo do comportamento e da eficiência do dispositivo foram utilizados dois métodos alternativos: um baseado na medição, direta, da diferença de potencial produzida pelo PTO (i.e., medida nos polos do gerador) e na sua conversão para valores instantâneos da potência absorvida e o outro, indireto, baseado nas séries temporais dos movimentos do dispositivo registadas pelo sistema *Qualisys* e na aplicação das curvas de desempenho do PTO.

A análise dos resultados experimentais permitiu estabelecer comparações entre o modelo físico atual e o anterior, assim como aprofundar aspetos importantes, como a influência do grau de submersão e da inclinação do dispositivo CECO no seu comportamento.

Os valores da potência absorvida e da eficiência estimados pelo método direto são, regra geral, mais conservativos e, à partida, mais realistas, uma vez que já têm em conta as perdas de energia que ocorrem na transformação da energia mecânica associada ao movimento do dispositivo CECO em energia elétrica.

Esses resultados são também penalizados pelo facto de o sistema de reprodução do PTO apresentar um ponto ótimo de funcionamento (velocidade de rotação). Com o afastamento desse ponto ótimo aumentam as perdas de energia e a eficiência associada à conversão de energia mecânica em energia elétrica.

A potência média absorvida pelo dispositivo variou entre 3 e 106 kW, e os valores da largura de captura relativa entre 2 e 31%. A potência instantânea máxima registada variou entre 28 e 720 kW (valores no protótipo, obtidos a partir da medição da potência absorvida).

Com o novo modelo físico verificou-se, ainda, que os valores mais elevados da largura de captura ocorriam para condições de agitação marítima frequentes na costa oeste portuguesa: períodos de onda da ordem dos 8 a 10 s e alturas de onda de cerca de 2 m.

Foram ainda identificados alguns aspetos importantes que deverão ser tidos em conta em trabalhos futuros. Entre eles destacam-se: estudo de um mecanismo que permita o ajuste automático do dispositivo à direção da agitação, bem como a adaptação ao nível da maré; o estudo detalhado do sistema de reprodução do PTO, para melhorar a eficiência do processo de conversão da energia mecânica em energia elétrica; a consideração de uma caixa de velocidades que permita que o PTO funcione sempre na proximidade do seu ponto ótimo; a melhoria do sistema de monitorização do PTO; a realização de uma maior gama de testes com estados de agitação irregular de crista curta; a utilização da modelação numérica para o estudo e a otimização da geometria dos flutuadores e de outros componentes do dispositivo; e, ainda, o estudo de um sistema de amarração do CECO eficaz para aplicações em águas profundas, capaz de garantir a sua estabilidade.

## Agradecimentos

Ao Prof. António Paulo Moreira, e à sua equipa, pela ajuda nos assuntos relacionados com o sistema de reprodução do Power Take Off (PTO) e com o sistema de monitorização do mesmo.

## Referências

APREN (2010). *Roteiro Nacional de Energias Renováveis, Aplicação da Diretiva 2009/28/CE*. Renewable Energy Policy Action Paving the Way Towards 2020.

- 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, 404p.
- Cunha, J. F. e Onofrei, R. (2008). *Energia Oceânica*. Instituto Nacional de Propriedade Industrial, Lisboa.
- Demirbilek, Z. e Linwood, V. (2008). *Water Wave Mechanics*. Chapter 1, Part II, Coastal Engineering Manual, EM 1110-2-1100, USACE, Washington, DC.
- Falnes, J. (2007). *A review of wave-energy extraction*. Marine Structures 20, pp 185-201, Trondheim, Norway.
- Marinheiro, J. (2013). *Estudo de Otimização de um Dispositivo Inovador para o Aproveitamento da Energia das Ondas*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Feup, Porto.
- Nielsen, K. (2003). IEA | *Ocean Energy Systems ANNEX II Report 2003, Implementing Agreement on Ocean Energy Systems - Development of recommended practices for testing and evaluating ocean energy systems, Subtask II. 1.*
- Silva, R., Coelho, C., Veloso-Gomes, F. e Taveira-Pinto, F. (2008). *A Importância de Alguns Parâmetros Hidromorfológicos em Estudos de Modelação das Zonas Costeiras*. Atas das 3as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP (ed. F. Taveira Pinto). ISBN: 989-978-9557-2-3.
- Teixeira, L. (2012). *Estudo Experimental de um Novo Dispositivo de Aproveitamento da Energia das Ondas*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Feup, Porto.