

ESTUDO E ANÁLISE DA VIABILIDADE E DO FUNCIONAMENTO DE UM NOVO DISPOSITIVO CONVERSOR DA ENERGIA DAS ONDAS – CECO

Luís Teixeira ⁽¹⁾, Paulo Rosa-Santos ⁽²⁾, Francisco Taveira-Pinto ⁽²⁾, José P. Ribeiro ⁽³⁾

⁽¹⁾ Águas do Porto, E.M.

Rua Barão Nova Sintra, 285, 4300-367 Porto, Portugal

⁽²⁾ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal

⁽³⁾ PT - Portugal Telecom

Rua de Felizardo de Lima, nº 43, 2º, 4100-283, Porto, Portugal

luismesquitateixeira@gmail.com, pjrsantos@fe.up.pt, fpinto@fe.up.pt, jpinhoribeiro@sapo.pt

RESUMO

Com o crescente desenvolvimento e evolução tecnológica, a energia elétrica tem assumido um papel muito relevante para a sustentabilidade da sociedade e dos setores de atividade a ela associados. No entanto, essa sustentabilidade tem sido suportada, sobretudo, pelo consumo de recursos energéticos não renováveis (e.g., petróleo, carvão, gás natural). A consciencialização, por parte do Homem, da esgotabilidade destes recursos energéticos e dos problemas ambientais associados à sua utilização, conduziu à procura de fontes energéticas renováveis. De entre estas destacam-se a energia solar, eólica, geotérmica, das marés, hídrica, da biomassa e das ondas.

O presente trabalho enquadra-se no âmbito da última fonte de energia renovável referida, a energia das ondas, e visou o estudo e a análise da viabilidade e do funcionamento de um novo dispositivo conversor da energia das ondas, o CECO – Conversor da Energia Cinética das Ondas, registado no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) com o N.º PT 105015.

O estudo experimental foi dividido em três fases: na primeira fase foi construído um modelo físico à escala do dispositivo de acordo com as especificações descritas no registo de patente, enquanto na segunda fase foi escolhido, analisado e caracterizado o comportamento do sistema de reprodução do *Power Take Off* (PTO). Por fim, na terceira fase, o modelo físico foi testado no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, para diversas condições de agitação marítima, níveis de amortecimento do sistema de reprodução do PTO e modo de funcionamento do dispositivo.

Este estudo envolveu a utilização de técnicas de medição e de experimentação avançadas, e permitiu a análise do comportamento do dispositivo CECO para diferentes condições de teste e compreender o seu modo de funcionamento. Os resultados experimentais obtidos permitiram efetuar a análise dos movimentos do dispositivo segundo os seus seis graus de liberdade, a comparação das séries temporais do movimento principal do dispositivo com a da elevação da superfície livre da água no mesmo intervalo de tempo, uma análise espectral visando o estudo da influência do amortecimento introduzido pelo sistema de reprodução do PTO na resposta do dispositivo e a estimativa da potência absorvida e da energia produzida.

Apesar de se tratar da primeira fase de estudo do dispositivo CECO, os resultados obtidos permitiram concluir que o conceito que lhe está associado é globalmente funcional, tendo sido obtidas larguras de captura relativamente elevadas. Foi ainda possível apontar um conjunto de questões que necessitam de um estudo mais aprofundado em fases subsequentes, de forma a otimizar o rendimento do dispositivo.

Palavras-chave: energias renováveis, *power take off*, largura de captura, potência absorvida, energia cinética.

1. INTRODUÇÃO

Os oceanos são uma fonte inesgotável de energia e, no caso de Portugal, constituem uma importante oportunidade de desenvolvimento no domínio energético, que já está pontualmente explorada, tanto a nível experimental, como a nível de produção de energia, porém ainda numa fase pré-comercial. A energia contida nos oceanos tem diferentes origens, logo, diferentes classificações, de entre as quais se destacam a energia das marés, a energia térmica dos oceanos, a energia das correntes marítimas e a energia das ondas. Esta última representa uma fatia considerável de toda a energia disponível, assumindo assim um papel preponderante para a exploração do recurso energético dos oceanos.

As tecnologias para o aproveitamento da energia das ondas encontram-se ainda em fase de desenvolvimento, com muitas soluções numa fase concetual ou a necessitarem de validação em protótipo, sendo por isso necessário realizar investimentos importantes até que a viabilidade económica das mesmas seja conseguida e o preço unitário de produção seja competitivo, em comparação com o das outras fontes renováveis de energia. Porém, parece existir interesse por parte da indústria neste sector, uma vez que outros mercados, principalmente o da energia eólica e o da energia solar, se aproximam de um estágio mais maduro, não se prevendo que venham a ocorrer avanços significativos. Atualmente, a energia das ondas é considerada uma das melhores soluções para a obtenção de energia “limpa”, surgindo, assim, cada vez mais conceitos para a aproveitar (CRES, 2002).

No entanto, como em qualquer outra tecnologia neste domínio, existem obstáculos ao seu desenvolvimento, dos quais se destacam (CRES, 2002):

- A irregularidade da amplitude, fase e direção das ondas torna difícil a maximização da eficiência do dispositivo em todo o intervalo de frequências de excitação;
- A segurança da estrutura em situação de tempestade, pois torna-se economicamente inviável o seu dimensionamento para as situações de máxima solicitação;
- Conflito de interesses, uma vez que as áreas de implantação podem ter outros usos, nomeadamente a pesca, lazer, ser parte integrante de rotas marítimas, entre outros;
- Financiamento até a viabilidade económica ser conseguida;
- A complexidade e a agressividade do meio marítimo.

O presente trabalho enquadra-se no estudo do aproveitamento da energia das ondas, e visa analisar a viabilidade e o funcionamento de um novo dispositivo desenvolvido para esse fim, o CECO. Para o efeito foi construído um modelo físico do dispositivo, à escala geométrica 1/20, e estudada a sua viabilidade e características de funcionamento através de um vasto 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, utilizando técnicas de medição e de experimentação avançadas.

2. O CONVERSOR DA ENERGIA CINÉTICA DAS ONDAS

2.1. INTRODUÇÃO

O Conversor de Energia Cinética das Ondas (CECO) é um novo conceito de dispositivo para o aproveitamento da energia das ondas, cuja invenção se encontra depositada no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) com a Patente nº 105015.

À data de realização do trabalho, o dispositivo CECO encontrava-se numa fase embrionária (fase de conceito), não tendo ainda sido efetuado nenhum estudo experimental ou numérico visando a validação do conceito associado, a caracterização do comportamento do dispositivo ou a avaliação da sua viabilidade. Assim, o objetivo deste trabalho consistia na realização de um estudo experimental que permitisse colmatar essas lacunas.

Tendo por base os níveis de preparação tecnológica, aplicados ao desenvolvimento de um dispositivo para o aproveitamento da energia das ondas (e.g., Heller, 2012; Holmes e Nielsen, 2010), pretende-se posicionar o estudo experimental do dispositivo CECO, entre as fases 1 e

2. Este dispositivo, devido às suas características geométricas e de funcionamento, é difícil de enquadrar numa das categorias existentes para a classificação deste tipo de dispositivos.

2.2. CONSTITUIÇÃO E INSTALAÇÃO

O dispositivo CECO apresenta a estrutura apresentada na Figura 1, sendo composto por diversos componentes, de entre os quais se destacam: dois módulos laterais móveis (MLM's), um mecanismo cremalheira-engrenagem, um gerador, tirantes centrais, elemento anelar estrutural e corpo central fixo.

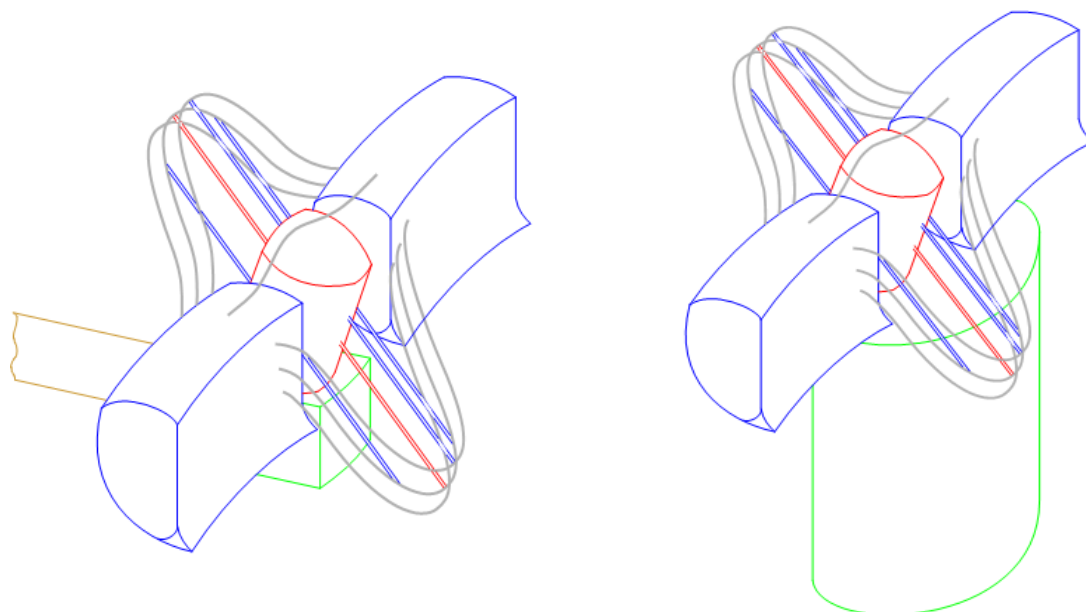


Figura 1 - Estrutura do dispositivo para fixação horizontal (esquerda) e sustentação vertical (direita).

Prevê-se que o dispositivo CECO possa ser instalado junto à costa, em molhes ou outros pontos rígidos de fixação, bem como em locais de mar profundo. Nas instalações junto à costa, o CECO pode ser amarrado através de fixadores horizontais, Figura 1 (esquerda), colocados entre o corpo central fixo e os pontos rígidos de amarração, auxiliados ainda pela capacidade flutuante da câmara com lastro do corpo central fixo. Estes fixadores devem permitir pequenos movimentos circulares horizontais para se efetuar um reajuste automático da posição do CECO a pequenas variações da direção de incidência da onda, aproveitando-se deste modo todo o seu impacto.

No caso das instalações em grandes profundidades, deverá executar-se uma sustentação vertical através de uma grande bóia posicionada na parte inferior do corpo central fixo, Figura 1 (direita). Esta poderá ser equipada com um sistema de bombagem de água para, com o seu enchimento, fazer submergir o CECO para manutenção em eventuais situações de tempestade extrema. A bóia estará ancorada ao fundo do mar.

2.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O dispositivo CECO visa transformar o movimento longitudinal das ondas num movimento mecânico oblíquo que converte em eletricidade, usando o movimento das ondas para deslocar os dois MLM's na mesma direção da propagação destas e de forma transversal através do corpo central fixo. A transferência da energia incidente sobre os MLM's para o corpo fixo é feita por um tirante, perfeitamente solidarizado com estes e em posição oblíqua. Dentro do corpo central rígido, o movimento de translação linear oblíquo, ascendente e descendente, do tirante, é convertido em movimento rotativo através de um mecanismo cremalheira-engrenagem, que irá acionar um gerador fixo que produzirá energia elétrica.

A Figura 2 apresenta um esquema simples, mas ilustrativo, do modo de funcionamento do dispositivo CECO, aquando da passagem da crista (movimento ascendente) e da cava da onda (movimento descendente) pelos módulos laterais móveis.

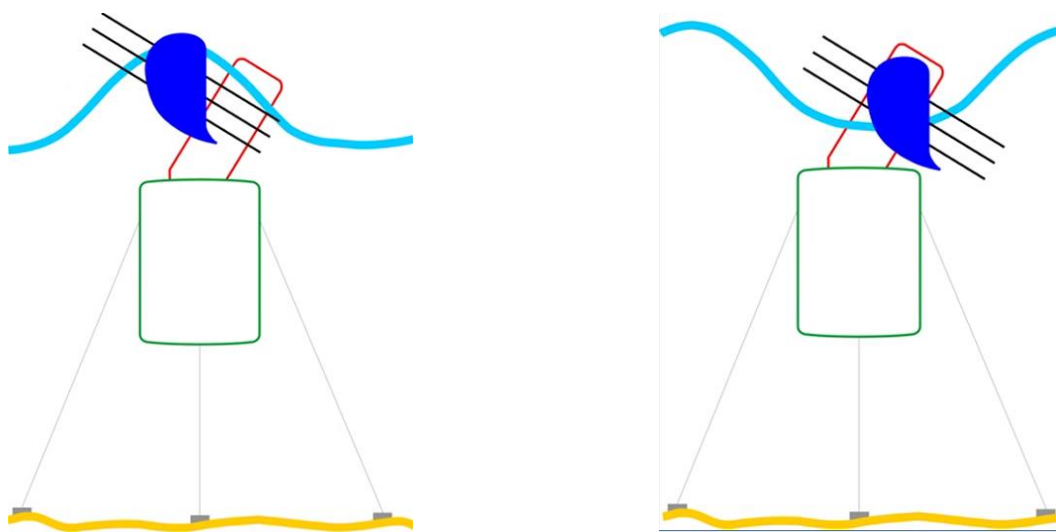


Figura 2 – Esquemática do funcionamento do CECO: movimento ascendente – a crista da onda passa pelos MLM's (esquerda), movimento descendente – a cava da onda passa pelos mím's (direita).

2.4. FUNCIONAMENTO

A onda, durante a sua propagação, incide sobre a superfície frontal de impacto dos MLM's. As solicitações resultantes da interação das ondas com esses elementos flutuantes originam forças de impulso, arrastamento e inércia que os fazem deslocar segundo uma direção oblíqua ascendente. Quando a onda deixa de solicitar os MLM's, estes retomam a sua posição inicial. Esta recuperação da posição primitiva é garantida pelo princípio da conservação da energia, a partir da energia potencial, garantida pela altura relativa entre os MLM's e a posição em que eles se encontram quando em repouso.

Os MLM's 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 poderá 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 pelo movimento dos MLM's, fazem girar a engrenagem. Contudo, a velocidade de rotação desta poderá não ser suficiente para ativar o gerador. Por isso, a engrenagem poderá ter de estar em contacto com rodas desmultiplicadores, isto é, neste caso, a amplificação do movimento rotativo é feita por um sistema mecânico elevador da velocidade de rotação, composto por rodas dentadas helicoidais de redução do diâmetro de rotação original. Assim, através de um pinhão, o gerador é ativado com uma velocidade de rotação superior à da engrenagem, produzindo eletricidade.

3. MODELO FÍSICO DO DISPOSITIVO

3.1. DEFINIÇÃO DA ESCALA

O modelo físico estudado é uma representação, à escala, do protótipo idealizado para o dispositivo CECO. Contrariamente a outros estudos no domínio da hidráulica marítima, neste caso, o protótipo não está completamente definido, pelo que a escala foi fixada de forma a ser possível extrapolar com segurança os valores obtidos no modelo para a escala real.

Na definição da escala do modelo foram tidas em conta as condições de teste consideradas essenciais ao estudo que se pretendia realizar, nomeadamente no que concerne às variáveis altura de onda, H , período de onda, T , e grau de inclinação do dispositivo, i . As alturas de onda e os períodos de onda adotados tiveram como base as condições de agitação marítima típicas da costa oeste Portuguesa, tendo em conta os registos existentes. Consideraram-se ainda as seguintes inclinações do dispositivo: 20° , 30° e 45° .

Apesar de no âmbito deste trabalho não se terem analisado os registos de todos os locais da costa oeste portuguesa, utilizaram-se como base os registos da bóia ondógrafo instalada ao largo do porto de Leixões, para o período compreendido entre 1993 e 2003, depois de tratados estatisticamente por Coelho, 2005, Figura 3.

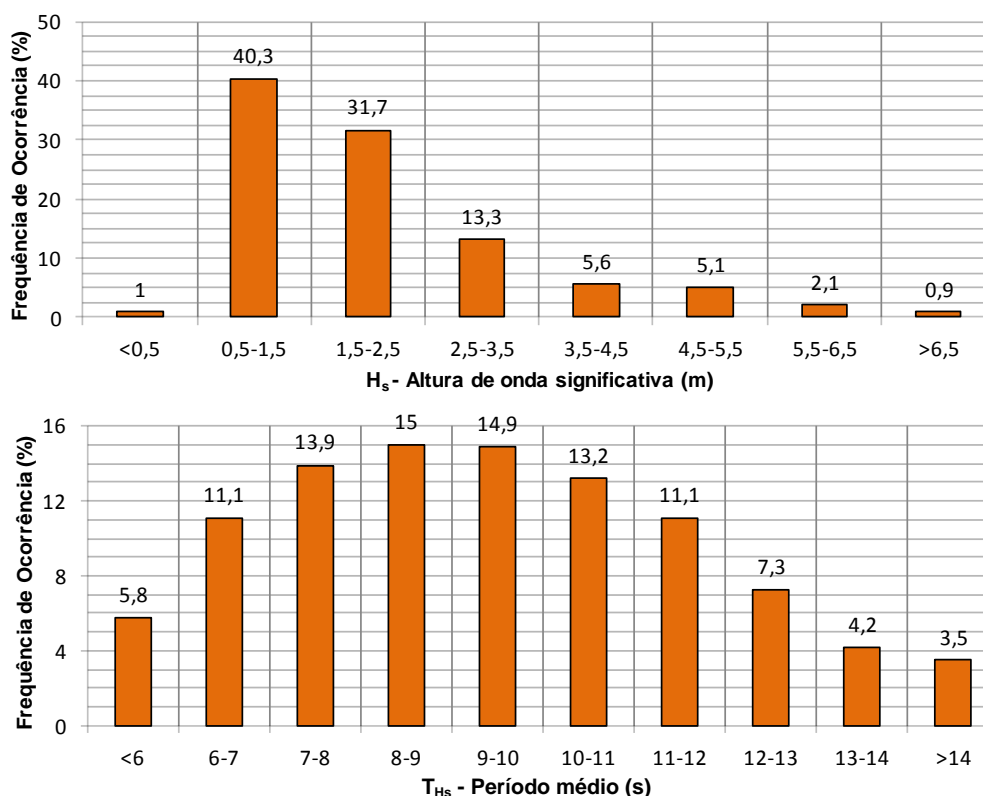


Figura 3 - Dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões no período de 1981 a 2003: distribuição da altura de onda significativa (superior) e do período de onda médio (inferior), Coelho, 2005 (adaptado).

Pode então concluir-se que a classe de alturas de onda significativa 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 3

No estudo do desempenho de um dispositivo para o aproveitamento da energia das ondas, é fundamental a avaliação da energia produzida, para diferentes condições de funcionamento, e dos rendimentos associados. Para tal é necessário medir, direta ou indiretamente, a potência instantânea, que potencialmente poderá ser convertida em energia elétrica. Como, de acordo com o critério de semelhança de *Froude*, o fator de escala da potência é $\lambda_V \lambda_l^{3,5}$ (em que λ_V representa o quociente entre a massa volúmica da água doce e da água salgada e λ_l o fator de escala geométrico) quanto menor for a escala, menor será a potência a medir no modelo físico, dificultando a sua medição rigorosa e aumentando a probabilidade de erros de medição.

Desta forma foi definido que o modelo seria construído à escala 1/20 e instalado no tanque de ondas com uma altura de água de 0,8 m, que corresponderia à instalação, no protótipo, num local com 16 m de profundidade de água.

3.2. CONSTRUÇÃO

O modelo do dispositivo CECO apresenta uma complexidade apreciável, sendo que todo o processo de construção foi moroso e apresentou vários problemas que foram contornados com soluções engenhosas, destacando-se o guiamento dos tirantes, crucial para o funcionamento do dispositivo. A Figura 4 apresenta o modelo depois de construído.



Figura 4 – Modelo físico à escala do dispositivo CECO.

3.3. SISTEMA DE REPRODUÇÃO DO PTO

3.3.1. Introdução

A reprodução do PTO (*Power Take Off*) no modelo físico não é uma tarefa simples e linear. As tecnologias adequadas para utilização em protótipo, normalmente, não podem ser aplicadas no modelo à escala.

No presente trabalho, um dínamo poderia constituir uma boa opção para a reprodução do sistema de PTO no modelo. Para representar o amortecimento introduzido por esse elemento, 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).

Para a reprodução do PTO foram idealizadas três soluções. A primeira dessas soluções consistia na utilização de um dínamo de bicicleta e a segunda na aplicação de amortecedores hidráulicos ou pneumáticos (e.g., Bailey, 2009). O dínamo apresentava o inconveniente de não permitir a aplicação de diferentes níveis de amortecimento de uma forma expedita, fato que era importante para a análise do dispositivo. A terceira solução, que foi a implementada, consistia na aplicação de um motor elétrico e não apresentava esse inconveniente.

3.3.2. Caracterização do sistema de reprodução do PTO

O comportamento do motor utilizado na reprodução do PTO não era conhecido à partida, tendo sido necessário caracterizar a força de amortecimento introduzida por este elemento, para várias velocidades de rotação e condições de funcionamento (resistência introduzida). Nesta fase foram realizados testes com o motor em circuito aberto (condição de amortecimento mínimo) e com o motor em circuito fechado (condição de 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 relacionasse a velocidade com que os MLM's do modelo CECO se deslocam e a força de

amortecimento gerada pelo motor. Para a obtenção dessa curva foi pensado um procedimento experimental simples que consiste, basicamente, na utilização de um fio enrolado em torno da polia do motor com um peso (de valor variável) acoplado na extremidade, que experimenta um movimento vertical descendente devido à influência da gravidade sobre esse mesmo peso.

Nessas experiências foi medida a velocidade e a aceleração que o peso adquiria durante o movimento descendente, com recurso ao sistema *Qualisys*. A Figura 5 apresenta o esquema da instalação experimental que possibilitou a caracterização do sistema de reprodução do PTO. Para a determinação da curva de funcionamento do motor foi necessário calcular o coeficiente de amortecimento do motor para diferentes valores de força aplicada (pesos).

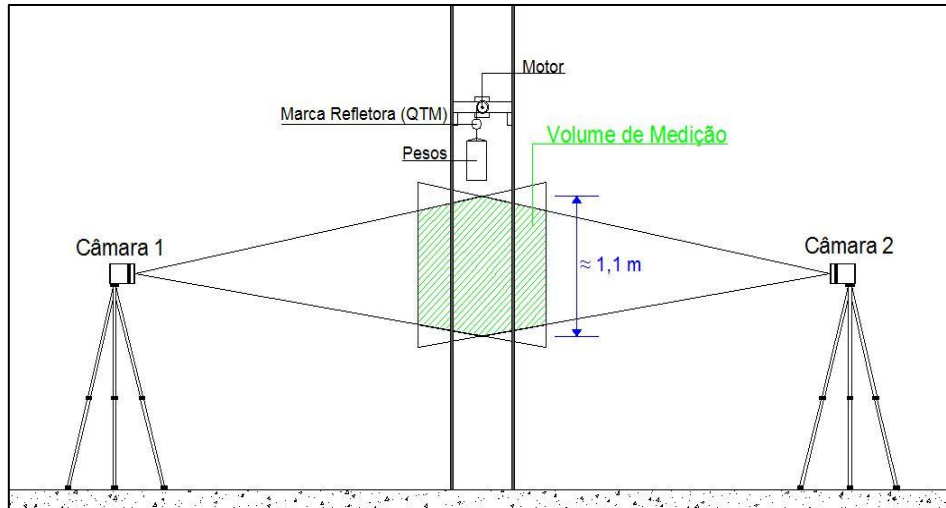


Figura 5 – Instalação experimental para a caracterização do sistema de reprodução do PTO.

A partir das medições do sistema *Qualisys* foram analisadas as velocidades e acelerações do movimento descendente do peso e determinado o coeficiente de amortecimento produzido pelo motor, com base em,

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

$$F_a = c_a \cdot \dot{x} \quad [2]$$

em que m representa a massa do(s) peso(s) em kg, g a aceleração da gravidade em m/s^2 , \ddot{x} a aceleração do(s) peso(s) em m/s^2 , \dot{x} a velocidade do(s) peso(s) 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 e, conseqüentemente, a força de amortecimento provocada pelo motor, foram analisados para cada valor da força aplicada, tendo sido ajustada uma curva de regressão aos pontos de funcionamento obtidos.

Dessa análise resulta a expressão que caracteriza a força de amortecimento introduzida pelo sistema de reprodução do PTO em função da velocidade do movimento. Para os dois tipos de amortecimento considerados, mínimo e máximo, foram obtidas as expressões que caracterizam o funcionamento do motor, respetivamente,

$$F_a = 5,2155 \dot{x}^{1,3107} \quad [3]$$

$$F_a = 240,9 \dot{x}^{0,9475} \quad [4]$$

4. ESTUDO EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

O estudo experimental englobou a realização de ensaios para diferentes condições: tipos de agitação marítima (regular e irregular de crista longa), inclinação do dispositivo; dispositivo livre ou com um sistema de reprodução do PTO, podendo neste caso introduzir amortecimento mínimo ou máximo. O objetivo principal do presente estudo é, como já foi referido, a análise do comportamento do dispositivo CECO e a apresentação de estimativas da energia produzida no modelo, para as diferentes condições de teste analisadas, extrapolando, posteriormente, esses resultados para o protótipo, usando os fatores de escala que resultam da aplicação de critérios de semelhança. Pretendia-se, também, validar o conceito de funcionamento do dispositivo.

4.2. CONDIÇÕES DE TESTE

No estudo experimental foram consideradas várias condições de teste para, posteriormente, ser feita uma análise comparativa do funcionamento do dispositivo CECO para essas mesmas condições. O Quadro 1 apresenta o plano de testes considerado.

Quadro 1 – Quadro síntese das condições de teste consideradas.

Agitação	Inclinação (°)	Altura de onda (m)	Período de onda (s)
Regular	30	1,0	8
		1,5	8; 10; 12
		2,5	10; 12
	45	1,0	8
		1,5	8; 10; 12
		2,5	10; 12
Irregular	30	1	8
		1,5	8; 10; 12
		2,5	10; 12
	45	1,0	8
		1,5	8; 10; 12
		2,5	10; 12

Nota: no caso da agitação irregular os valores apresentados referem-se à altura de onda significativa e ao período de onda de pico.

Nos testes com ondas regulares foram usadas, aproximadamente, 150 ondas, enquanto nos testes com ondas irregulares foi usada uma sequência aleatória com um comprimento de 2^{11} , que corresponde, sensivelmente, a 280 a 300 ondas. Deste modo, procurou-se garantir que os testes tinham uma duração suficientemente longa, para ser possível a correta representação da resposta do dispositivo e, simultaneamente, garantir que os estados de agitação irregular eram reproduzidos com suficiente rigor.

4.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.3.1. Introdução

Os resultados experimentais foram analisados de forma a compreender o funcionamento do dispositivo, avaliar a sua viabilidade, identificar possíveis problemas, assim como equacionar a eventual necessidade de realizar estudos mais aprofundados. Para tal, foi realizada a análise das séries temporais dos movimentos, velocidades e acelerações do dispositivo CECO, da sua resposta no domínio das frequências e o cálculo da potência absorvida e da energia produzida. As designações dos seis tipos de movimentos do dispositivo são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Movimentos do dispositivo segundo os seus 6 graus de liberdade.

MOVIMENTO	DIREÇÃO	DESIGNAÇÃO
Deslocamento	x	Avanço (Surge)
	y	Deriva (Sway)
	z	Arfagem (Heave)
Rotação	em torno de x	Balanço (Roll)
	em torno de y	Cabeceio (Pitch)
	em torno de z	Guinada (Yaw)

4.3.2. Análise comparativa dos movimentos do dispositivo

Para compreender o funcionamento do dispositivo CECO, e comprovar que a direção com deslocamentos de maior amplitude é aquela que corresponde à direção associada à produção de energia, isto é, à direção x (avanço), foram analisadas as séries temporais dos movimentos experimentados pelo dispositivo durante os testes experimentais.

Em primeiro lugar, foi feita a análise comparativa dos movimentos do dispositivo segundo os seus seis graus de liberdade, tendo como variável o tipo de agitação. Nos testes com agitação regular é expectável que o movimento de avanço apresente um comportamento sinusoidal, tal como a elevação da superfície livre da água, enquanto para a agitação irregular, é expectável que o comportamento seja irregular. Como exemplo, as Figuras 6 e 7 apresentam as séries temporais dos movimentos de translação do dispositivo, para ensaios realizados com agitação regular e irregular, respetivamente. Para além desses movimentos, o dispositivo apresenta ainda movimentos de rotação, mas com amplitudes pequenas, quase residuais, podendo por isso ser desprezados.

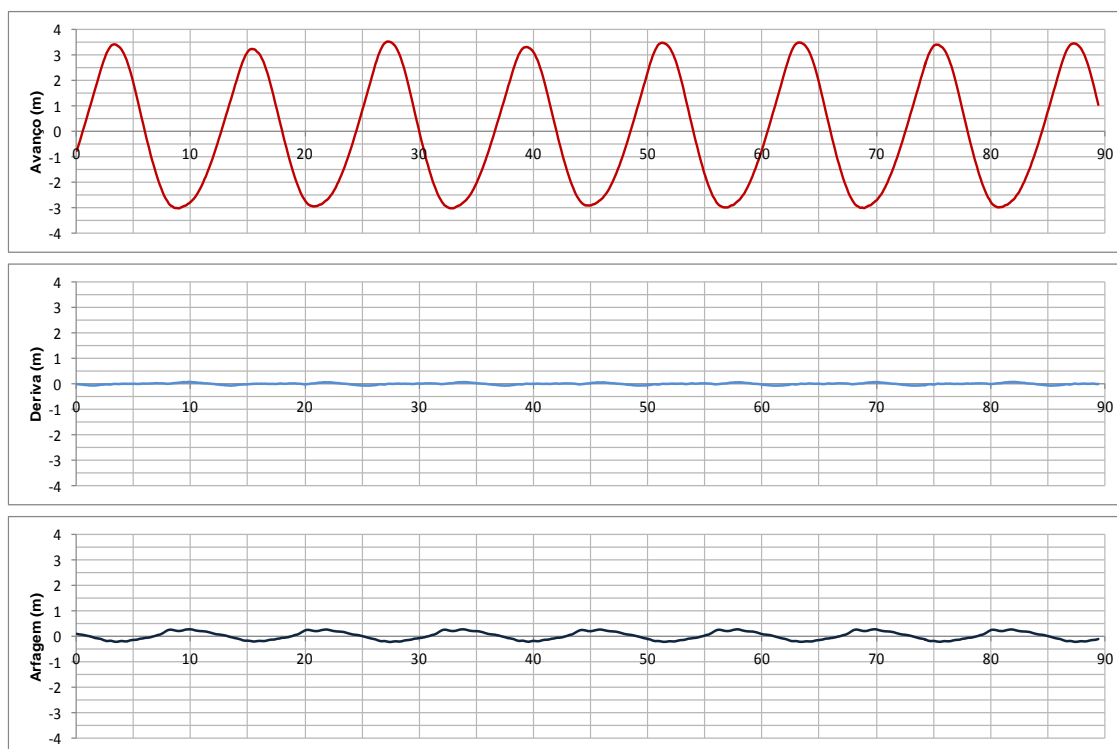


Figura 6 – Trecho da série temporal dos movimentos do dispositivo (valores no protótipo): agitação regular; sem sistema de reprodução do PTO; $i = 30^\circ$; $H = 1,5$ m; $T = 12$ s.

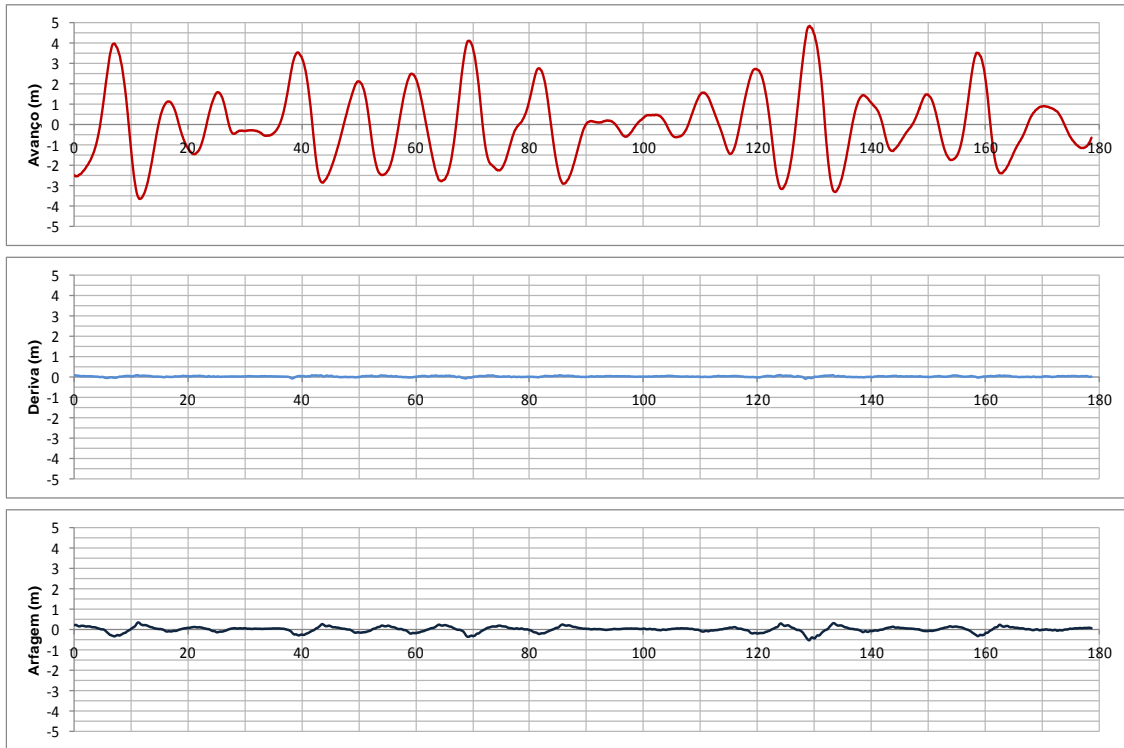


Figura 7 – Trecho da série temporal dos movimentos do dispositivo (valores no protótipo): agitação regular; sem sistema de reprodução do PTO; $i = 30^\circ$; $H_s = 1,5$ m; $T_p = 12$ s.

Analisando as Figuras 6 e 7 verifica-se que o maior deslocamento está associado ao avanço, tal como esperado. Porém, esta análise demonstra também a existência de alguns movimentos de deriva e de arfagem, contudo com amplitudes muito inferiores. Tal facto pode ser justificado pela existência de pequenas folgas no guiamento dos tirantes.

Uma vez que o movimento principal do dispositivo está associado à direção de produção de energia (movimento de avanço), a segunda análise prendeu-se com o estudo da influência do nível de amortecimento induzido pelo sistema de reprodução do PTO, na amplitude do avanço. A Figura 8 ilustra essa influência em testes realizados com agitação regular e irregular.

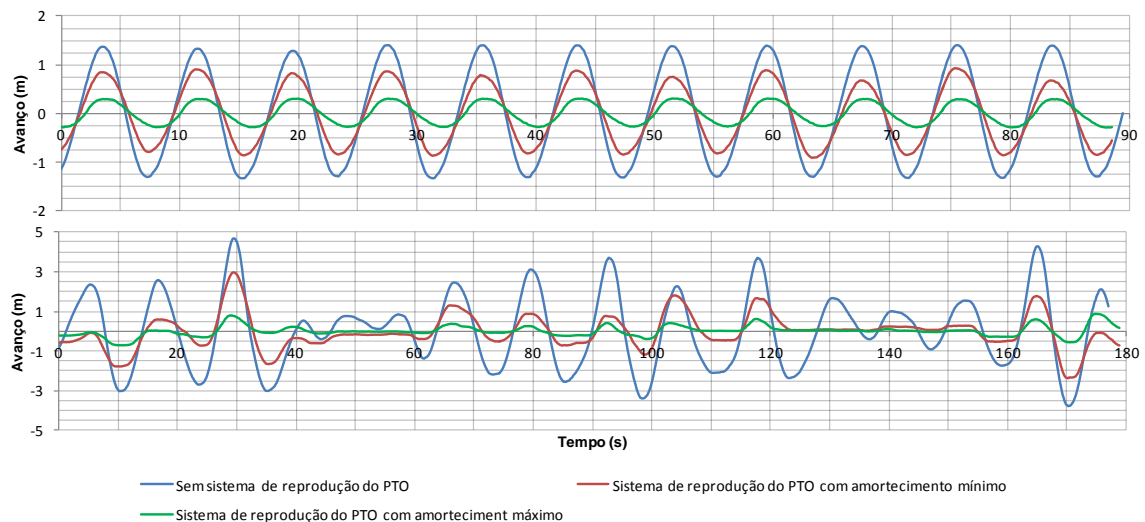


Figura 8 – Influência do amortecimento introduzido pelo PTO na amplitude do avanço: agitação regular; $i = 30^\circ$; $H = 1,5$ m; $T = 8$ s (superior) e agitação irregular, $i = 30^\circ$; $H_s = 1,5$ m; $T_p = 12$ s (inferior).

Pode verificar-se que a amplitude do movimento de avanço nas duas situações diminui com o aumento do amortecimento introduzido pelo sistema de reprodução do PTO. De facto, esse sistema procura simular o amortecimento associado à produção de energia elétrica, pelo que o aumento desse amortecimento se traduz numa maior resistência ao movimento do dispositivo.

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

Tendo por base o conceito de funcionamento do dispositivo, previa-se que o seu movimento estivesse diretamente relacionado com a elevação da superfície livre da água. Assim, nesta secção pretende-se confirmar se realmente estas duas variáveis estavam relacionadas, tanto nos testes com agitação regular como nos testes com agitação irregular, Figura 9.

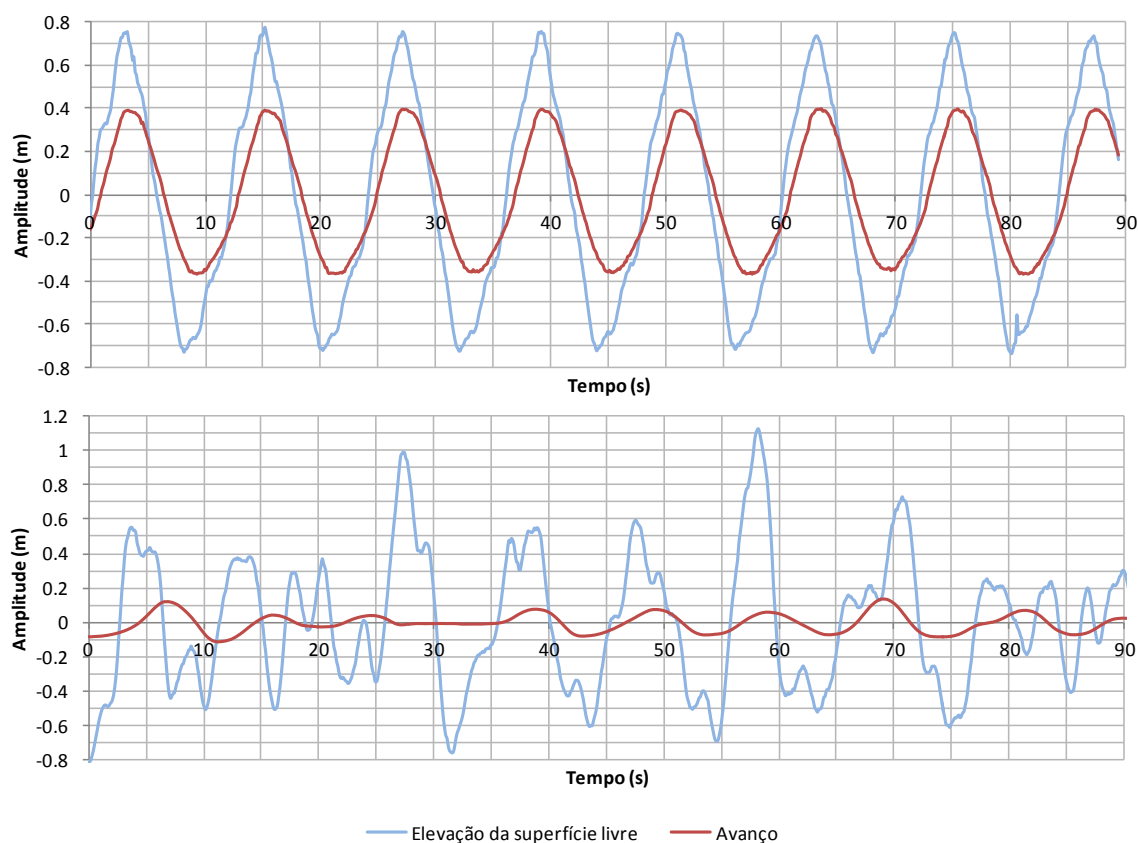


Figura 9 – Comparação da elevação da superfície livre da água com a amplitude do movimento de avanço do dispositivo em testes realizados com o sistema de reprodução do PTO a produzir resistência mínima: agitação regular, $i=30^\circ$, $H=1,5$ m; $T=12$ s (superior); agitação irregular, $i=45^\circ$, $H_s=1,5$ m; $T_p=10$ s.

Pode verificar-se que no teste com agitação regular, o movimento de avanço do dispositivo está diretamente relacionado com a elevação da superfície livre da água, Figura 9 (superior). Porém, no teste com agitação irregular tal não já acontece. Quando os MLM's são solicitados por ondas com períodos curtos, se o tempo necessário para retomarem a posição inicial, por gravidade, for superior ao período da onda, eles não a conseguem retomar, experimentando uma menor amplitude de avanço.

Analisando a Figura 9 (inferior), sensivelmente aos 20 s, o dispositivo é solicitado por ondas de pequeno período e com uma altura na ordem de 0,4 a 0,5 m, isto faz com que o dispositivo não consiga retomar, tão facilmente, a posição inicial, o que é bem evidente na série temporal da amplitude do avanço.

4.3.4. Análise comparativa do espectro de energia da agitação com o espectro de resposta do movimento de avanço do dispositivo

Com a análise comparativa do espectro de energia da agitação com o espectro de resposta do movimento de avanço do dispositivo CECO pretendia-se verificar se este respondia ou não nas frequências da agitação. Para tal, são apresentados os resultados obtidos em dois testes, um realizado com agitação regular e com o PTO introduzindo o amortecimento máximo, e o outro com agitação irregular e com o PTO introduzindo o amortecimento mínimo, Figura 10.

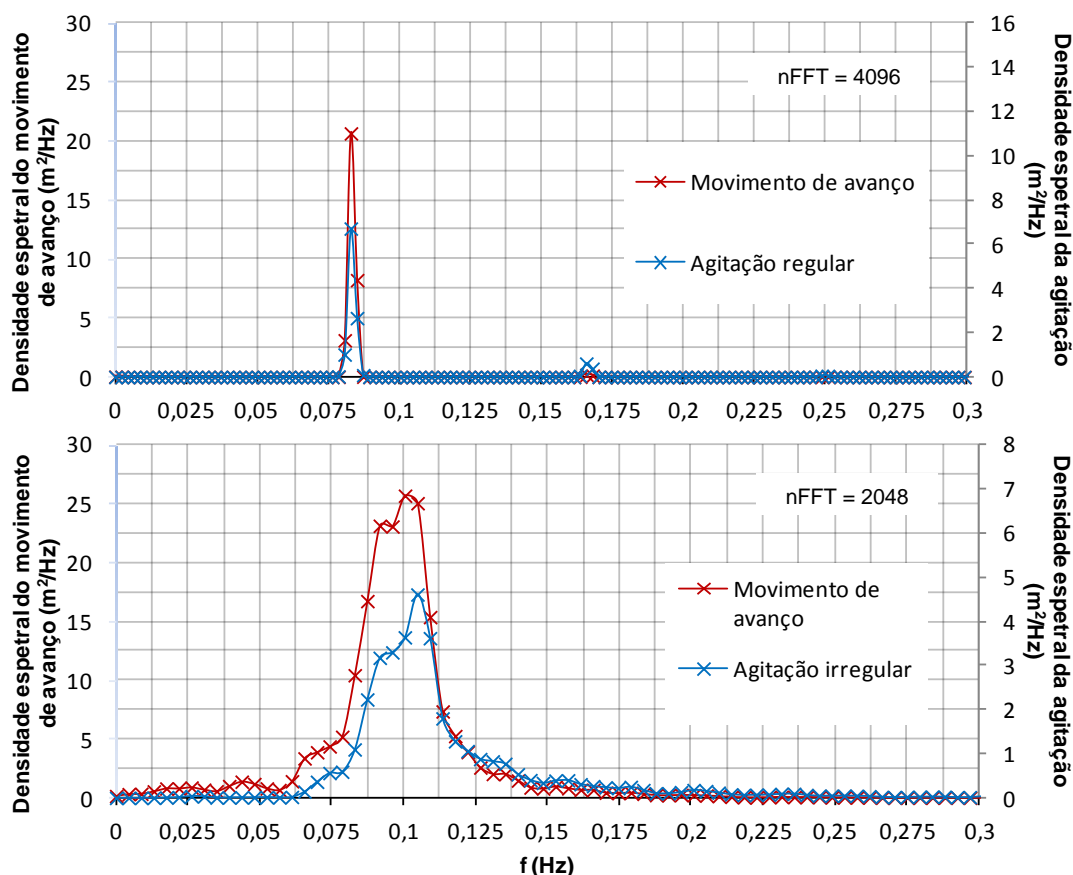


Figura 10 – Comparação do espectro de resposta do movimento de avanço do dispositivo com o espectro de energia da agitação: agitação regular, amortecimento máximo, $i=30^\circ$; $H=1,5$ m; $T=12$ s (superior); agitação irregular, amortecimento mínimo, $i=45^\circ$, $H_s=1,5$ m, $T_p=10$ s (inferior).

A Figura 10 mostra que as densidades de energia associadas ao movimento de avanço são, regra geral, superiores às da agitação. Tal é justificado pelo facto de o movimento de avanço apresentar amplitudes superiores às da elevação da superfície livre da água. No teste realizado com agitação regular verifica-se que o pico do espectro estimado para o movimento de avanço ocorre para uma frequência de 0,0833 Hz, que corresponde à frequência da onda. Por sua vez, no teste realizado com agitação irregular, o pico do espectro do movimento de avanço ocorre para uma frequência de 0,1 Hz, que corresponde também à frequência da onda.

Uma análise mais pormenorizada da Figura 10 (superior) mostra a existência de energia, no espectro da agitação, numa frequência duas vezes superior à frequência associada ao período a onda. Este facto pode ser explicado pela existência de efeitos de 2ª ordem. Durante a geração de um estado de agitação regular, podem-se formar cristas de onda secundárias, que variam a sua posição relativa em relação às cristas de ondas principais ao longo do tempo, uma vez que apresentam um período de onda igual a metade do período de onda principal que se pretende reproduzir, propagam-se assim a menor velocidade (Svendson, 1985). Desta forma se explica a existência de uma resposta espectral secundária numa frequência próxima de 0,167 Hz.

4.3.5. Operador da amplitude de resposta

Apesar do dispositivo de conversão de energia das ondas em estudo não ser uma estrutura flutuante pura, está provido de dois módulos laterais flutuantes. Por esse motivo, com base nos resultados experimentais obtidos, foram determinados os “operador da amplitude de resposta” – RAO’s associados a um conjunto de frequências. Os RAO’s são funções de transferência que depois de validadas permitem determinar o efeito de um estado de agitação marítima sobre o movimento de estruturas flutuantes.

No estudo do dispositivo CECO, os RAO’s poderiam permitir, através da análise dos testes realizados, prever o comportamento do dispositivo para estados de agitação não testados. Estes parâmetros podem ser obtidos, para agitação regular, através de,

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

em que $A_{avanço}$ representa a amplitude pico-a-pico média do movimento de avanço e H a altura de onda do estado de agitação considerado.

Nos testes realizados com estados de agitação irregular, os RAO’s podem ser determinados através de (Chakrabarti, 2007),

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

em que $S_{avanço}(f)$ e $S_{onda}(f)$ representam, para cada frequência f , a densidade de energia estimada para o movimento de avanço e para o estado de agitação associado, respetivamente.

Os resultados obtidos mostraram que para nenhuma das condições analisadas o dispositivo apresentava um comportamento linear que permitisse a aplicação dos RAO’s.

4.3.6. Análise da potência absorvida e da energia produzida

Por fim foi analisada a potência absorvida e a energia produzida pelo dispositivo CECO. Na secção 3.3.2, foi feita a caracterização do sistema de reprodução do PTO, tendo-se obtido, para as condições de amortecimento mínimo e máximo, as curvas de desempenho do sistema, que traduzem a variação da força de amortecimento, F_a , com a velocidade de avanço do CECO, v . Verificou-se ainda que o comportamento do motor utilizado era independente do seu sentido de rotação. Uma vez que não foi analisada a velocidade de rotação da polia, mas sim a velocidade do deslocamento do peso, através da curva referida e com base na velocidade do movimento de avanço do dispositivo, é possível calcular, diretamente, a força de amortecimento produzida pelo motor e, posteriormente, a potência absorvida, através de,

$$P = F_a \cdot v \quad [7]$$

$$E = P \cdot \Delta t \quad [8]$$

Os valores da potência absorvida e da energia produzida foram calculados em valores de modelo e posteriormente extrapolados para o protótipo, através das seguintes relações,

$$P_p = P_m \cdot \lambda_l^{-3,5} \cdot \lambda_\gamma^{-1} \quad [9]$$

$$E_p = E_m \cdot \lambda_l^{-4} \cdot \lambda_\gamma^{-1} \quad [10]$$

em que P_p representa a potência absorvida no protótipo em W, P_m a potência absorvida no modelo em W, E_p a energia produzida no protótipo em J, E_m a energia produzida no modelo em J, λ_l o fator de escala geométrico e λ_γ o quociente entre a massa volúmica da água doce e da água salgada.

O Quadro 3 apresenta alguns dos resultados obtidos referentes, quer à potência absorvida, quer à energia produzida, tomando especial relevo a situação de funcionamento que se revelou como sendo a mais favorável.

Quadro 3 – Valores da potência absorvida e da energia produzida.

AMORTECIMENTO	AGITAÇÃO	i (°)	H ou H_s (m)	T ou TP (s)	\bar{P}_p (kW)	ΣE_p (kWh)	L_{CAP} (%)
Mínimo	Regular	45	2,5	12	13,79	6,91	1,25
Mínimo	Irregular	30	2,5	12	3,21	2,75	0,80
Mínimo	Irregular	45	1,5	10	2,09	2,75	1,60
Máximo	Regular	45	2,5	12	137,59	68,91	12,46
Máximo	Irregular	30	2,5	12	39,06	33,54	9,74
Máximo	Irregular	45	2,5	12	76,85	65,99	19,17

Importa frisar que a análise não poderá ser feita pela energia produzida, pois esta refere-se à energia produzida na totalidade do teste e, os testes não têm todos a mesma duração. Desta forma, a análise comparativa é realizada em termos de potência média absorvida, \bar{P}_p .

Na realidade não existem estados de agitação regular, pelo que a análise da potência e da energia produzida toma mais significado nos testes realizados com agitação irregular. Assim, pela análise de todos os resultados, para agitação irregular, a situação mais favorável verifica-se para uma altura de onda significativa de 2,5 m, o período de pico de 12 s, para a inclinação de 45° do dispositivo e amortecimento máximo.

Neste tipo de trabalhos tem especial interesse a caracterização da eficiência do dispositivo a partir do parâmetro largura de captura relativa, L_{cap} , que é dado pelo quociente entre a potência média absorvida, por unidade de comprimento das componentes do dispositivo destinadas à absorção da energia da onda (comprimento do conjunto dos dois MLM's), e a potência média das ondas incidentes, por unidade de comprimento da crista.

O Quadro 3 apresenta os valores da L_{cap} referentes aos testes considerados. Pode verificar-se que a largura de captura apresenta valores muito interessantes, sendo no máximo da ordem dos 20 % para a agitação irregular. Contudo, é importante ter em atenção que estes resultados foram obtidos numa fase inicial de teste e validação do conceito de funcionamento associado ao dispositivo CECO, usando um sistema de reprodução do PTO simplificado e não otimizado.

5. CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS

O presente trabalho permitiu testar e validar o conceito de funcionamento do dispositivo de aproveitamento da energia das ondas CECO, analisar quantitativamente o seu comportamento e identificar os aspetos que devem merecer uma atenção especial no futuro.

O conjunto de testes experimentais realizados permitiu tirar várias conclusões importantes quanto ao funcionamento do dispositivo, tais como:

- A estabilidade da base do dispositivo é importante para o seu bom desempenho;
- O movimento principal do dispositivo (avanço) está associado à direção de produção de energia;
- Nos testes realizados com ondas regulares, o movimento de avanço segue a elevação da superfície livre da água, situação que nem sempre se verifica nos testes com ondas irregulares;
- Para um determinado tipo de agitação (ondas regulares ou irregulares), quanto maior é a altura de onda, maior é a amplitude do movimento de avanço;
- A resposta do dispositivo ocorre, essencialmente, na gama de frequências da agitação incidente;
- O sistema não apresenta uma resposta linear.

O guiamento dos tirantes é um aspeto importante para o desempenho do dispositivo, uma vez que este tem de ser feito, preferencialmente, sem folgas e com o menor atrito possível, de

modo a minimizar as perdas de energia. O sistema de reprodução do *Power Take Off* deverá ser otimizado no futuro atendendo às características de funcionamento do CECO.

Esse trabalho mostrou que o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas estudado se baseia num conceito de funcionamento muito promissor, e que os resultados experimentais obtidos justificam a realização de estudos complementares mais detalhados, tendo em vista a otimização das principais componentes do dispositivo, recorrendo, quer à modelação numérica, quer a ensaios em modelo físico. De entre esses estudos salienta-se a necessidade de otimizar a geometria dos módulos laterais móveis, desenvolver e testar um sistema de amarração para aplicações em águas profundas, e otimizar o sistema de reprodução do PTO.

REFERÊNCIAS

Bailey, H. (2009). *The effect of a nonlinear Power Take Off on a Wave Energy Converter*. Tese de Doutoramento, University of Edinburgh, Scotland.

Chakrabarti, S. K., 2007. *Statistics of Wave and Structure Response*. Dynamics of Floating Structures and Model Testing, Wessex Institute, United Kingdom.

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.

CRES (2002). *Wave Energy Utilization in Europe - Current Status and Perspectives*. Centre for Renewable Energy Sources. EESD, Pikermi, Greece.

Heller, V. (2012). *Technology Readiness Level approach for the development of WEC's*. 4th CoastLab Teaching School, Wave and Tidal Energy, FEUP, Porto, Portugal.

Holmes, B., Nielsen, K., (2010). *Guidelines for the Development & Testing of Wave Energy Systems*. Final Technical Report, OES-IA, Annex II, Task 2.1

Payne, G., (2008). *Guidance for the experimental tank testing of wave energy converters*. SuperGenMarine, Edinburgh, Scotland.

Svendson, I. A. (1985). *Physical modelling of water waves*. Water Waves in the Laboratory, Physical Modelling in Coastal Engineering, Chapter 2, Balkema, Rotterdam, Netherlands.