

## Avaliação do impacto de um conversor de energia das ondas integrado num quebramar portuário

Tomás Calheiros-Cabral<sup>1,2\*</sup>; Victor Ramos<sup>1,2</sup>; Gianmaria Giannini<sup>1,2</sup>; Beatriz Queirós<sup>1,2</sup>; Paulo Rosa-Santos<sup>1,2</sup>; Francisco Taveira-Pinto<sup>1,2</sup>

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

2. CIIMAR - Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental - Universidade do Porto, Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões, Avenida General Norton de Matos, s/n, 4450-208 Matosinhos, Portugal. [up201304327@up.pt](mailto:up201304327@up.pt); [jvrc@fe.up.pt](mailto:jvrc@fe.up.pt); [gianmaria@fe.up.pt](mailto:gianmaria@fe.up.pt); [up201107922@edu.fe.up.pt](mailto:up201107922@edu.fe.up.pt) [pjrsantos@fe.up.pt](mailto:pjrsantos@fe.up.pt); [fpinto@fe.up.pt](mailto:fpinto@fe.up.pt).

### Introdução

Os portos marítimos desempenham um papel fundamental na economia global, permitindo o transporte eficiente de mercadorias e a conexão entre países, promovendo assim o comércio internacional. A localização estratégica de Portugal e a sua extensa linha de costa faz com que estas infraestruturas desempenhem um papel crucial no desenvolvimento económico, constituindo importantes *clusters* de aceleração da economia do mar. Recentemente, os portos têm-se também tornado centros de produção de energia renovável, dada a necessidade crescente de reduzir as emissões de gases a efeito de estufa e de alcançar a descarbonização.

Impulsionada pelas consequências das alterações climáticas, a transição energética para fontes de energia limpa e renovável é um dos principais objetivos estratégicos das nações desenvolvidas. O oceano representa um recurso energético com um grande potencial, nomeadamente devido ao seu considerável tamanho. As estimativas deste recurso diferem, sendo também importante distinguir entre o potencial *teórico* e o potencial *técnico*, i.e., o recurso que pode efetivamente ser explorado com as tecnologias disponíveis. O recurso estima-se em 151 300 TWh/ano (Taveira-Pinto *et al.*, 2015), considerando a energia das ondas, marés, correntes oceânicas, salinidade e gradiente térmico. A energia das ondas representa 32 000 TWh/ano deste valor, embora seja reduzido para metade se for considerada a direção do fluxo de energia (Reguero *et al.*, 2015). Ramos *et al.* (2017) estimou a potência das ondas na costa Oeste da Península Ibérica entre 15 (nas regiões a Sul) e 35 kW/m (nas regiões a Norte), o que representa cerca de 300 MWh/m/ano no Norte, um recurso muito considerável. No entanto, o elevado custo da produção de energia a partir destas fontes torna-as pouco competitivas com outras fontes renováveis e não-renováveis mais desenvolvidas, tais como o gás natural, o petróleo e a energia eólica terrestre, pois estas últimas já tiveram tempo para maturar e atingir níveis de eficiência elevados. De forma a superar este desafio, têm sido exploradas diversas estratégias, tais como o estudo de novas tecnologias (Clemente *et al.*, 2020), a hibridização de conceitos previamente concebidos (Ramos *et al.*, 2022b), assim como a integração de dispositivos em estruturas de defesa portuária ou costeira (Clemente *et al.*, 2021).

### Caso de estudo

O Porto de Leixões pretende melhorar as suas condições de acessibilidade marítima, tendo dado início ao projeto de “Prolongamento do Quebra-Mar exterior e das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões” em 2020. Neste projeto está contemplado o prolongamento do quebramar exterior em 300 m, Figura 1. Este surge como a oportunidade ideal para estudar a integração de um conversor de energia das ondas (CEO). Neste contexto, foram avaliadas as tecnologias CEO existentes e escolhidas aquelas que melhor se adequam à integração num quebramar de taludes, estrutura proposta para o prolongamento em estudo. Foram escolhidas três tecnologias, o dispositivo por galgamento, a Coluna de Água Oscilante (CAO), e as membranas flexíveis. Optou-se por combinar duas dessas tecnologias num dispositivo híbrido de forma a exaltar as vantagens de cada uma e mitigar as desvantagens, tendo-se optado pela hibridização da CAO e do dispositivo por galgamento após a comparação de diversos critérios

para cada tecnologia, tais como custo-eficiência, integração na estrutura de defesa e o Nível de Maturidade Tecnológica (TRL) (Sinha *et al.*, 2019). A **Error! Reference source not found.** apresenta o dispositivo idealizado integrado na secção transversal do prolongamento do quebramar. Optou-se por estudar a integração dum dispositivo modular com 20 m de largura.

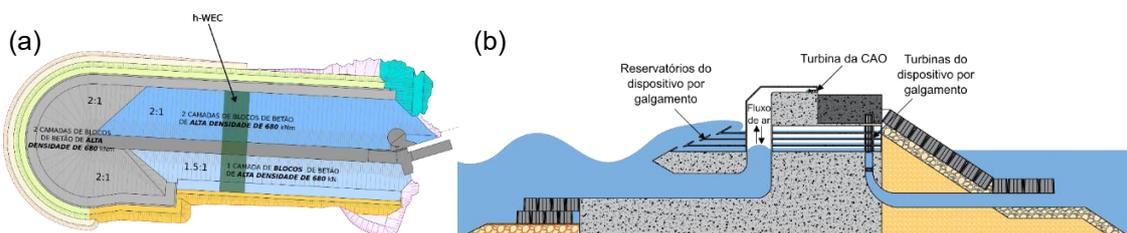


Figura 1. (a) Vista aérea e localização do dispositivo CEO no prolongamento do quebramar exterior do Porto de Leixões (fonte: APDL) e (b) secção transversal do dispositivo híbrido h-WEC e o seu modo de funcionamento.

### Ensaios experimentais

A Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) realizou um estudo em modelo físico à escala 1:50 do h-WEC em 2019. Os ensaios foram realizados num canal com 0.8 m de largura, no qual um modelo do dispositivo h-WEC, com 0.4 m de largura, foi integrado num modelo do prolongamento do quebramar. Os resultados indicaram que a hibridização permite alargar o intervalo de funcionamento do dispositivo (Calheiros-Cabral *et al.*, 2020a), permitindo assim uma produção de energia mais constante, e aumenta a eficiência global deste (Calheiros-Cabral *et al.*, 2020b). A produção de energia anual do dispositivo foi estimada em 35 MWh/m/ano. Considerando a incorporação de vinte módulos, a produção seria de mais de metade do consumo de eletricidade no porto a partir da energia das ondas. O impacto do dispositivo na estabilidade e na funcionalidade do quebramar foi avaliada e concluiu-se que o h-WEC pode levar à redução dos volumes de galgamento da estrutura, tendo, no entanto, um impacto negativo na estabilidade dos blocos da risberma (Clemente *et al.*, 2021).

Em 2022 foram realizados novos ensaios em modelo físico do dispositivo, Figura 2, à escala 1:40, num canal com 1.6 m de largura, com uma rampa de fundos móveis com cerca de 12 m de comprimento. Estes pretendem avaliar a produção de energia anual do dispositivo para as condições de agitação marítima local calculadas com recurso a um modelo numérico de alta resolução (Ramos *et al.*, 2022), e avaliar de forma mais detalhada e precisa o impacto do dispositivo na estabilidade do quebramar. Foram ainda testadas duas geometrias diferentes para a entrada da CAO, e também uma geometria com duas câmaras CAO com metade da área cada. Foi realizada a monitorização da deslocação de blocos do manto resistente e da ocorrência de erosões localizadas com o levantamento de nuvens de pontos com recurso a um *scanner* laser. Foram ainda estudadas as forças de impacto no dispositivo com recurso a oito sensores de pressão colocados em pontos críticos do h-WEC, e as pressões intersticiais na interface entre o núcleo e o primeiro filtro e entre os dois filtros do quebramar, também com recurso a sensores de pressão. O dispositivo CEO foi ainda equipado com um diafragma para simular a turbina da CAO, cuja abertura foi ajustada em tempo real de forma a testar diferentes estratégias de controlo. Três sensores de pressão do ar foram colocados à saída da CAO, assim como um anemómetro de fio quente. Foram utilizadas sondas de níveis hidrodinâmicos ao longo do canal para medir as condições de agitação geradas e incidentes, assim como a oscilação da superfície livre da água dentro da CAO, e um reservatório de ar auxiliar foi utilizado para modelar a compressibilidade do ar, conforme descrito em Falcão e Henriques (2014). Os galgamentos sobre a estrutura e para cada reservatório do dispositivo foram medidos através de um sistema de reservatórios auxiliares ligados aos reservatórios principais com a utilização de sondas de níveis hidrodinâmicos e bombas hidráulicas, conforme explicado em Calheiros-Cabral (2018).

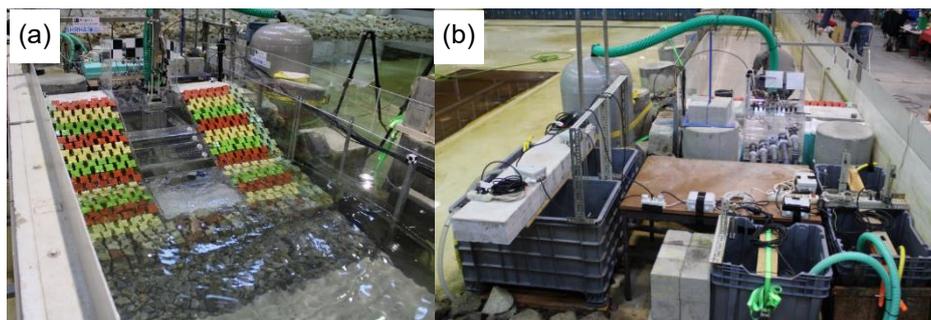


Figura 2. (a) Modelo físico do h-WEC integrado no prolongamento do quebramar exterior do Porto de Leixões e (b) sistema de medição dos galgamentos.

A definição das condições de teste contemplou a seleção de sete estados do mar característicos do local de acordo com as recomendações em Pecher e Kofoed (2017), Tabela 1, e quatro níveis de água característicos representativos do nível médio, da baixa- e preia-mar, e um quarto nível no qual o aumento do nível médio do mar estimado pelo IPCC (2019) é somado ao nível de preia-mar. Foram também testadas ondas regulares com alturas de 1, 2, 3 e 4 m e de 6 a 18 s.

Tabela 1. Estados do mar testados e respetivas características.

	$H_{m0}$ [m]	$T_p$ [s]	Energia [MWh/m/ano]	Contribuição energética [%]	Número de horas anuais [h]
<b>SS1</b>	1.28	9.1	14.8	6.0	1796 (20.5%)
<b>SS2</b>	1.74	11.0	38.1	15.5	2076 (23.7%)
<b>SS3</b>	2.06	12.9	47.0	19.1	1559 (17.8%)
<b>SS4</b>	2.20	14.9	19.0	7.7	482 (5.5%)
<b>SS5</b>	3.59	12.1	16.0	6.5	184 (2.1%)
<b>SS6</b>	3.64	14.0	37.0	15.1	359 (4.1%)
<b>SS7</b>	3.85	15.9	28.0	11.4	219 (2.5%)
			200.0	81.4	6675 (76.2%)

## Resultados

Os resultados obtidos do conjunto de testes realizados estão a ser processados aquando da escrita deste artigo, e são conseqüentemente preliminares e não definitivos, carecendo ainda de verificação e aprofundamento. Devido a limitações do sistema de medição do galgamento, cuja capacidade de escoamento nem sempre foi suficiente, os testes cujas condições conduziram aos volumes mais significativos de galgamento levavam ao extravasamento de parte deste volume para fora de alguns reservatórios. Assim, a energia produzida pela componente de galgamento está subestimada. Estes testes serão repetidos no futuro.

A energia capturada pela componente de galgamento do h-WEC deve ser multiplicada pela eficiência do reservatório (decorrente da diferença de cota entre a crista do reservatório e a altura de armazenamento da água dentro deste), 75%, da turbina, 80%, e do gerador, 95% (Calheiros-Cabral *et al.*, 2020b). A energia produzida foi estimada em 492, 472 e 492 MWh/ano para a componente de galgamento e 182, 162 e 134 MWh/ano para a componente de CAO, para as três geometrias estudadas. Assim, a produção total máxima foi de 34 MWh/m/ano para o h-WEC. O consumo de eletricidade do Porto de Leixões em 2020 foi de 14 500 MWh (APDL, 2020), sendo que doze módulos h-WEC (perfazendo 240 m) seriam capazes de fornecer mais de metade deste consumo.

Devido às limitações do sistema de medição dos galgamentos, não foram realizados os ensaios de sobrevivência, que permitiriam avaliar a estabilidade do manto resistente e a ocorrência de erosões localizadas. No entanto, foi feita uma comparação entre os perfis diante do dispositivo, Figura 3a, e a avaliação das zonas de maiores deslocamentos dos blocos do manto, Figura 3b.

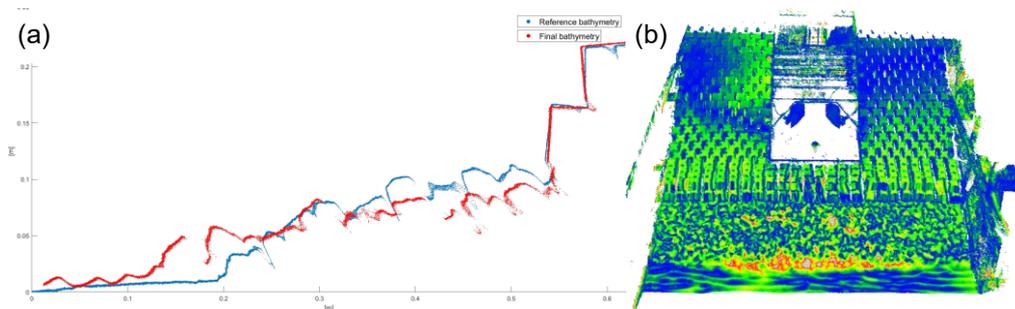


Figura 3. (a) Comparação da secção transversal diante do h-WEC antes (a azul) e depois (a vermelho) dos testes realizados e (b) identificação das zonas de erosão e deslocação de blocos.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio dos projetos PORTOS - Ports Towards Energy Self-Sufficiency (EAPA 784/2018), cofinanciado pelo Programa Interreg Espaço Atlântico através do FEDER, e WEC4Ports – A hybrid Wave Energy Converter for Ports (OCEANERA/0004/2019) financiado pela FCT. O primeiro autor agradece o financiamento de bolsa de doutoramento pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), com a referência 2021.07687.BD.

### Referências

- APDL 2020. Relatório de Sustentabilidade 2020. [Em Português]
- Calheiros-Cabral, T. 2018. *Avaliação do desempenho de um sistema híbrido de aproveitamento da energia das ondas para o quebramar Norte de Leixões*. MSc, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. [Em Português].
- Calheiros-Cabral, T., Clemente, D., Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., Morais, T., Belga, F. & Cestaro, H. 2020a. Performance Assessment of a Hybrid Wave Energy Converter Integrated into a Harbor Breakwater. *Energies*, 13, p. 236. ISSN: 1996-1073. doi: <https://doi.org/10.3390/en13010236>.
- Calheiros-Cabral, T., Clemente, D., Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., Ramos, V., Morais, T. & Cestaro, H. 2020b. Evaluation of the annual electricity production of a hybrid breakwater-integrated wave energy converter. *Energy*, 213, p. 118845. ISSN: 0360-5442. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118845>.
- Clemente, D., Calheiros-Cabral, T., Rosa-Santos, P. & Taveira-Pinto, F. 2021. Hydraulic and Structural Assessment of a Rubble-Mound Breakwater with a Hybrid Wave Energy Converter. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, p. 922. ISSN: 2077-1312.
- Falcão, A. F. O. & Henriques, J. C. C. 2014. Model-prototype similarity of oscillating-water-column wave energy converters. *International Journal of Marine Energy*, 6, pp. 18-34. ISSN: 2214-1669. doi: 10.1016/j.ijome.2014.05.002.
- IPCC 2019. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. [Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegria, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B. & Weyer, N. M. (eds.)]. Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 755. doi: 10.1017/9781009157964.
- Pecher, A. & Kofoed, J. P. 2017. *Handbook of Ocean Wave Energy*, Cham, Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-39889-1. doi: 10.1007/978-3-319-39889-1\_11.
- Ramos, V., Giannini, G., Calheiros-Cabral, T., Rosa-Santos, P. & Taveira-Pinto, F. 2022. An Integrated Approach to Assessing the Wave Potential for the Energy Supply of Ports: A Case Study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10. doi: 10.3390/jmse10121989.
- Ramos, V., López, M., Taveira-Pinto, F. & Rosa-Santos, P. 2017. Influence of the wave climate seasonality on the performance of a wave energy converter: A case study. *Energy*, 135, pp. 303-316. ISSN: 0360-5442. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.080>.
- Reguero, B. G., Losada, I. J. & Méndez, F. J. 2015. A global wave power resource and its seasonal, interannual and long-term variability. *Applied Energy*, 148, pp. 366-380. ISSN: 0306-2619. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.114>.
- Sinha, A., Mendonça, P., Belga, F., et al. Preliminary design of a hybrid wave energy converter integrated into a rubble mound breakwater. European Wave and Tidal Energy Conference. 1-6 September 2019 Naples, Italy. ISBN/ISSN: 2309-1983.
- Taveira-Pinto, F., Iglesias, G., Rosa-Santos, P. & Deng, Z. D. 2015. Preface to Special Topic: Marine Renewable Energy. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7, p. 061601. doi: 10.1063/1.4939086.