

O aproveitamento da energia das ondas

António F. O. Falcão

IDMEC, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa

antonio.falcao@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

As ondas do mar são uma das últimas grandes energias renováveis a serem aproveitadas. Isso tem requerido, nas últimas décadas, um importante esforço de inovação, em que instituições portuguesas têm tido um papel assinalável. Apresentam-se os princípios básicos e as linhas gerais desse desenvolvimento, com referências aos tipos de dispositivos e equipamentos, especialmente as tecnologias que nos últimos anos mais de aproximaram da fase de comercialização.

Introdução

A utilização da energia de fluidos em movimento (ar ou água) é muito antiga, com os moinhos de água ou de vento e a navegação à vela, e mais modernamente as turbinas eólicas e hidráulicas. Trata-se aqui de escoamento essencialmente unidireccional no vento ou num curso de água.

A energia das ondas do mar, até pelos seus efeitos destrutivos, é a mais óbvia das energias marinhas. Mas aqui o movimento da água é muito diferente. De facto, as partículas de água descrevem trajectórias aproximadamente circulares ou elípticas. Enquanto um balão se afasta arrastado pelo vento, um corpo flutuante oscila verticalmente e horizontalmente nas ondas, pouco se afastando da posição inicial. As técnicas tradicionais não se adequam ao aproveitamento da energia das ondas, o que explica em parte que apenas nas últimas décadas tenham sido desenvolvidas tecnologias para isso. Naturalmente, os efeitos fortemente destrutivos das ondas em situações extremas têm sido outro obstáculo ao desenvolvimento dessas tecnologias. As ondas são uma das últimas grandes renováveis a serem aproveitadas.

As ondas que aqui nos interessam são geradas pelo vento. É habitual distinguir dois tipos. A ondulação (em inglês *swell*) é gerada pela acção do vento sobre grandes áreas do oceano, tipicamente durante vários dias. A vaga (em inglês *wind sea*) é devida à acção do vento local, por vezes em regime diurno/nocturno. A ondulação caracteriza-se

por maiores períodos e maior comprimento de crista (como é desejado pelos surfistas). A energia das ondas na costa ocidental portuguesa e nas ilhas dos arquipélagos dos Açores e Madeira provém na sua maior parte de ondulação gerada no norte do Atlântico.

A energia das ondas tem duas componentes: uma, cinética, associada à velocidade das partículas de água nas suas trajectórias, e outra, potencial, associada à deformação da superfície livre. O conteúdo energético das ondas exprime-se normalmente como potência por unidade de comprimento de crista, ou, no sistema SI, W/m ou kW/m. Esse valor é dado (em kW/m) aproximadamente por $0,5H_s^2 T_e$, em que H_s é a altura significativa e T_e é o chamado período de energia. Em contraste com a energia eólica, que, na atmosfera, se estende em altitude por vários quilómetros, a energia das ondas concentra-se maioritariamente até uma profundidade de cerca de um terço do comprimento de onda. O valor médio anual ao largo da costa ocidental portuguesa é cerca de 30 kW /m, o que se pode considerar como um bom recurso a nível europeu e mundial.

O início do estudo da produção de energia em grande escala a partir das ondas do mar, em bases científicas adequadas, data de 1973, e foi despoletado pela crise petrolífera desse ano que levou ao recrudescimento do interesse nas energias renováveis em geral [1]. Foi nessa altura que se iniciaram os estudos sobre a energia das ondas na Europa (especialmente Reino Unido e Noruega) e nos EUA (já havia actividade anterior no Japão, mas centrada em aplicações de pequena potência, como bóias de sinalização). Os estudos no Instituto Superior Técnico (IST) começaram pouco depois, em 1976, sendo aqui de referir o nome de Agnelo Gonçalves David (1934-1991), comerciante em Almeirim e inventor nas horas vagas, que, por volta de 1975, andou pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil e pelo IST procurando apoio científico e técnico para o seu invento de aproveitamento da energia das ondas. De facto, esse invento não era novo, mas nem ele nem ninguém em Portugal sabia disso. Tratava-se do que depois se veio a designar por sistema de coluna de água oscilante (*oscillating water column* ou OWC em língua inglesa), actualmente o mais generalizado tipo de dispositivo para conversão da

energia das ondas. O interesse criado pelas vindas de Agnelo David ao IST, com o seu modelo de demonstração, levou, em 1976, ao início, no Departamento de Engenharia Mecânica, de estudos teóricos sobre a conversão da energia das ondas. Mais de quarenta anos depois, o IST é, a nível mundial, um dos mais activos centros de desenvolvimento destas tecnologias. Em águas costeiras portuguesas foram testados vários protótipos destes dispositivos.

A tecnologia das turbinas eólicas de grande potência convergiu para turbinas de eixo horizontal com três pás, sendo difícil a um não especialista distinguir as turbinas de diversos fabricantes. O mesmo não se passa com a energia das ondas. Há maneiras muito diferentes de extrair essa energia, com variadas tecnologias em competição, sem que seja consensual qual ou quais irão triunfar [1]. No que se segue, irão ser apresentadas brevemente algumas dessas tecnologias, em especial as que resultaram em protótipos ensaiados em condições de mar real e mais se aproximam da fase de comercialização.

Os leitores interessados poderão obter informações mais completas sobre o aproveitamento da energia das ondas no livro [2], de acesso gratuito na *internet* (*open source*).

Os corpos oscilantes

Um dos processos para absorção da energia das ondas é com corpos oscilantes (em geral flutuantes). É sabido que a potência se pode representar como o produto duma força e uma velocidade. Neste caso, a força e a velocidade deverão ser em relação a um referencial fixo, por exemplo o fundo do mar ou uma estrutura fixa (quebra-mar ou outra). A Fig. 1 representa esquematicamente uma bóia que pode oscilar verticalmente e que está ligada ao fundo por um sistema de amarração rígido ou tenso que compreende um dispositivo de conversão de energy (*power take-off* ou PTO em língua inglesa). Este dispositivo pode ser um gerador eléctrico especial de tipo linear (translação em vez de rotação), um sistema hidráulico de óleo ou água a alta pressão, ou um sistema mecânico mais ou menos complexo. Pode estar localizado no fundo de mar ou no interior da própria bóia. A potência absorvida pelo PTO é dada pelo produto da velocidade da bóia e da força exercida no PTO. Interessa especialmente o valor médio da potência absorvida, que será nulo se o PTO for perfeitamente rígido (não permite oscilação da bóia) ou se não exercer qualquer força (bóia oscilando livremente). A energia absorvida será máxima para um valor intermédio da rigidez do PTO.

Mas a potência média não depende apenas do PTO. Depende também da forma e dimensão da própria bóia. A modelação teórica mostra que a energia absorvida é máxima quando existe ressonância [1]. Na ausência de ondas incidentes, se a bóia for afastada da sua posição de equilíbrio e largada, ficará a oscilar (oscilações amortecidas) com uma frequência – a sua frequência própria. A capacidade de extrair energia das ondas será máxima quando a frequência própria da bóia for próxima da frequência das ondas. Dito por outras palavras, quando o sistema estiver em ressonância com as ondas. Infelizmente, nem tudo é tão simples. Por um lado, para as frequências típicas do oceano (da ordem de 0,1 Hz correspondente ao período

de 10 s), a ressonância exige bóias de grandes dimensões. Por exemplo, para a esfera semi-submersa da Fig. 1 ter frequência própria de 0,125 Hz (período de 8 s), o seu diâmetro deve ser de cerca de 34 m. Por outro lado, no oceano, as ondas reais não são caracterizadas por uma frequência única mas por um espectro. Isto dificulta ou impossibilita a ressonância.

A Fig. 1 representa um corpo que oscila verticalmente. Há sistemas em que o movimento oscilatório é de rotação em torno dum eixo horizontal localizado perto do fundo ou numa estrutura assente no fundo. Os sistemas de energia das ondas de tipo corpo oscilante envolvem problemas teóricos e práticos de controlo de grande complexidade que continuam em investigação. A Fig. 2 mostra o conversor, de oscilação essencialmente vertical, desenvolvido pela empresa sueca Corpower em que um sistema engenhoso associado ao PTO e o seu controlo permitem um bom desempenho sem que as dimensões da bóia sejam incomportavelmente grandes.

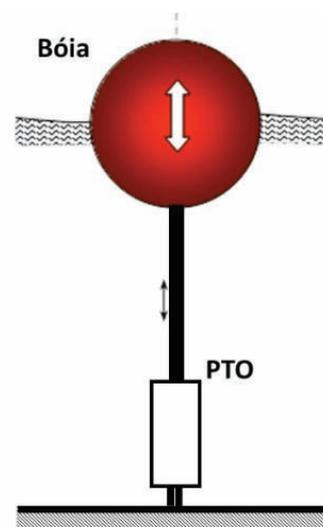


Figura 1 - Representação esquemática dum dispositivo de corpo oscilante.

A utilização de um corpo oscilante único que reage em relação ao fundo levanta problemas de engenharia se a profundidade da água for superior a cerca de dez ou quinze metros. Pode então ser preferível um dispositivo constituído por dois corpos com frequências próprias diferentes que oscilam um em relação ao outro. Neste caso, a amarração ao fundo é necessária apenas para evitar que o dispositivo entre em deriva e se afaste excessivamente da sua zona de localização. A Fig. 3 representa esquematicamente um sistema de dois corpos. O movimento relativo de um corpo em relação ao outro pode ser de translação (como na Fig. 3) ou de rotação (articulação). Tendo os dois corpos frequências de ressonância diferentes, podem cobrir, em condições próximas de ressonância, uma gama mais larga de frequências na distribuição espectral das ondas. A Fig. 4 representa

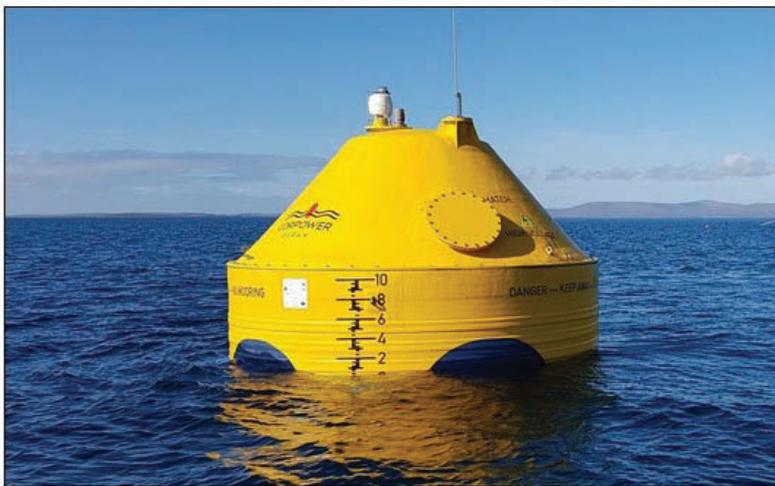


Figura 2 - Dispositivo *Resonant Wave Energy Converter* (fotografias cedidas pela empresa CorPower).

um dos dispositivos *PowerBuoy* (EUA), com potência de 40 kW, instalados em 2008 junto à costa em Santoño, no norte de Espanha.

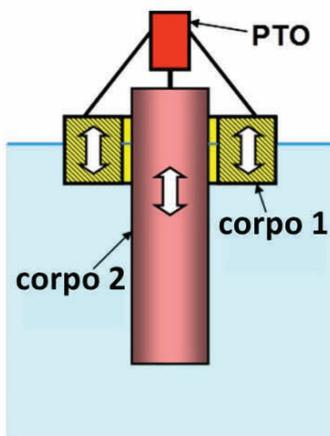


Figura 3 - Representação esquemática de um dispositivo de dois corpos oscilantes.

Dispositivos de coluna de água oscilante com estrutura fixa

A oscilação de um corpo pode ser substituída pela oscilação de uma massa de água equivalente, o que tem vantagens evidentes [3]. Naturalmente, a água tem que estar contida numa estrutura oca, com uma abertura para o mar na sua parte submersa. É esta a disposição da Fig. 5 que representa, em corte por um plano longitudinal, a central de ondas construída na ilha do Pico, Açores. Por acção das ondas, a superfície livre da água no interior da câmara oscila como se fosse um êmbolo, e alternadamente comprime e expande o ar, que é forçado a atravessar, alternadamente num e no outro sentido, uma turbina de tipo especial.

Põe-se por vezes a questão sobre se a turbina deve ser de ar, como representado na Fig. 5, ou hidráulica mergulhada na própria coluna de água. É fácil chegar a uma conclusão. Seja $p + p_{at}$ a pressão na câmara, em que p_{at} é a pressão atmosférica e p (alternadamente positivo e negativo) é a oscilação de pressão. Se esta queda de pressão p for convertida em energia cinética por unidade de massa de fluido, obtém-se uma velocidade V que é dada pela clássica equação de Bernoulli $V = \sqrt{2gp/\rho}$, em que g é a aceleração da gravidade e ρ é a massa específica do fluido. Como essa massa específica é cerca de 800 vezes menor para o ar em comparação com a água, é fácil concluir que a mesma queda de pressão p permitiria obter uma velocidade que é $\sqrt{800} = 28,3$ vezes maior no ar do que na água. Num dispositivo de coluna de água oscilante, uma turbina de ar será muito



Figura 4 - Conversor de dois corpos oscilantes *PowerBuoy* (EUA) instalado em Santoño, norte de Espanha.

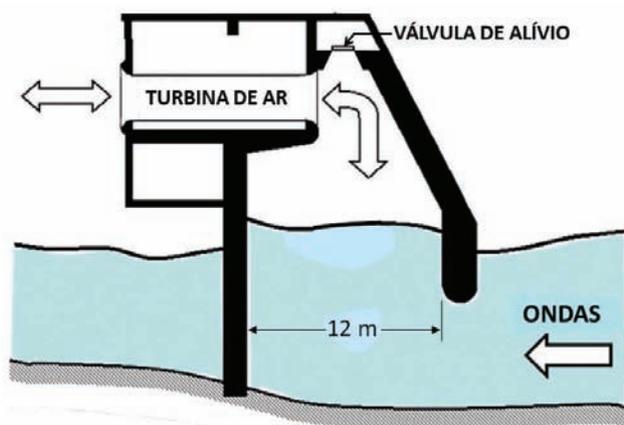


Figura 5 - Corte longitudinal da central de energia das ondas da ilha do Pico, Açores.

menor e muito mais rotativa do que uma turbina hidráulica. Na realidade, a velocidade de rotação da turbina de ar é da ordem de mil rotações por minuto, o que permite um accionamento directo dum gerador eléctrico convencional.

A Fig. 6 representa uma vista posterior da central de coluna de água oscilante construída, no âmbito dum projecto europeu, na ilha do Pico, arquipélago dos Açores. Foi, a nível mundial, a primeira central de ondas projectada e construída para abastecer permanentemente uma rede eléctrica. Embora se tratasse dum consórcio europeu, o projecto da central e respectivo equipamento foi essencialmente obra de parceiros portugueses. A central foi concluída em 1999 e funcionou até 2018, embora por vezes com longas intermitências devidas a reparações, substituições de equipamento, etc. A Fig. 7 mostra o grupo turbina de ar e gerador eléctrico de 400 kW.

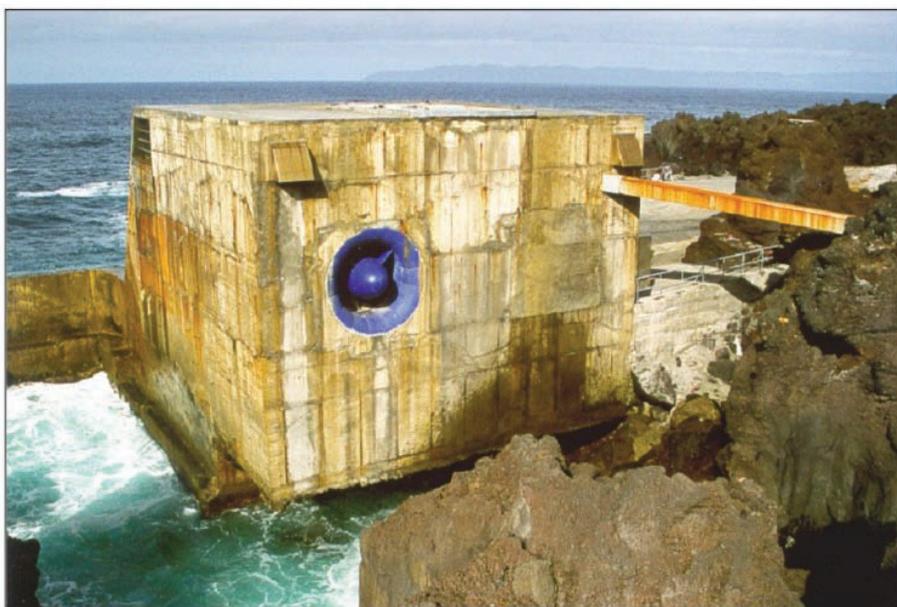


Figura 6 - Vista posterior da central de energia das ondas da ilha do Pico.



Figura 7 - Grupo turbina-gerador da central da ilha do Pico, com parte das condutas de ar removidas.

A central do Pico desempenhou um papel pioneiro importante, incluindo como infraestrutura de investigação, mas não foi um sucesso do ponto de vista económico. A estrutura de betão foi excessivamente dispendiosa, o que se explica em parte pela localização remota e o método de construção adoptado. A integração de múltiplos sistemas de coluna de água oscilante num quebra-mar de protecção dum porto é mais interessante: os custos da estrutura são partilhados, e o acesso para instalação e manutenção de equipamento é muito facilitado. Esta combinação foi adoptada na construção dum quebra-mar no porto de Mutriku, no País Basco, no qual foram integrados 16 sistemas de coluna de água oscilante equipados com turbinas de ar (os equipamentos foram instalados em 2012), Fig. 8. Esta con-

cepção foi replicada em maior escala em Itália, com 124 câmaras integradas num quebra-mar no porto de Civitavecchia (perto de Roma), Fig. 9. Embora a construção do quebra-mar tenha sido concluída em 2016, apenas um grupo turbina-gerador foi instalado até agora. Está prevista a construção de outros quebra-mares, com aproveitamento de energia das ondas, em Itália e outros países.

Dispositivos de coluna de água oscilante com estrutura flutuante

A integração de sistemas de coluna de água oscilante em quebra-mares de protecção portuária é um nicho de mercado interessante, mas é obviamente insuficiente para a produção de energia em larga escala. Para isso, será necessário recorrer à localização *offshore* de sistemas flutuantes, com a dupla vantagem do maior espaço disponível no mar e o maior nível energético do recurso (menos afectado por dissipação no fundo e rebentação). Em tais casos, a estrutura que aloja a coluna de água oscilante é flutuante.



Figura 8 - Central de ondas com 16 OWC integradas num quebra-mar do porto de Mutriku, País Basco.



Figura 9 - Quebra-mar do porto de Civitavecchia, Itália, integrando 124 OWC.

Em língua inglesa, uma *spar buoy* é uma bóia cilíndrica de (relativamente) pequeno diâmetro e grande comprimento, submersa verticalmente na sua maior parte. A estabilidade nas ondas justifica a sua utilização como bóia para medições oceanográficas, e também, com muito maiores dimensões, como suporte flutuante de turbinas eólicas *offshore*. Esta configuração é adoptada, para a energia das ondas, na OWC *spar-buoy*, representada esquemáticamente na Fig. 10, juntamente (para comparação) com um conversor de dois corpos oscilantes de forma semelhante. Na OWC *spar-buoy*, o corpo interior é substituído por uma massa de água equivalente, com óbvias vantagens práticas. Pela sua configuração, o movimento oscilatório da OWC *spar-buoy* é essencialmente vertical (em engenharia naval diz-se arfagem). Pequenas OWC *spar-buoys* foram desenvolvidas no Japão na década de 1960 para sinalização marítima abastecida por energia das ondas, e são ainda comercializadas. Este conceito, com muito maiores dimensões, foi dos primeiros a despertar a atenção de equipas de investigação interessadas na produção de energia eléctrica em grande escala. Este interesse foi reactivado em Portugal, no IST, na última década, com estudos teóricos e ensaios em

modelo reduzido, nalguns casos com apoio de projectos europeus (Fig. 11). Com base nestes estudos, a empresa espanhola OCEANTEC (actualmente IDOM) construiu um modelo grande (escala cerca de 1:3), Fig. 12, que foi ensaiado com sucesso, no âmbito do projecto europeu OPERA (2015-19), ao largo da costa do País Basco. A bóia foi equipada com uma turbina de ar de tipo especial (dita turbina biradial) patenteada e desenvolvida no IST, e construída em Portugal.

Uma outra concepção para a coluna de água de estrutura flutuante é conhecida pela designação em língua inglesa de *Backward-Bent-Duct Buoy* (sigla BBDB), Fig. 13. A BBDB foi concebida e patenteada em 1986 pelo pioneiro japonês Yoshio Masuda (1925-2009). A estrutura tem a configuração duma barça, e a conduta no interior da qual oscila a “coluna” de água tem a forma da letra L. O conversor deve estar orientado na direcção de propagação da onda incidente, como um navio que enfrenta as ondas. Contra o que seria intuitivo, o melhor desempenho verifica-se quando a abertura está virada para a costa (e não para as ondas que se aproximam), o que explica a designação em língua inglesa. A BBDB comporta-se nas ondas como uma barça, com três modos de oscilação que intervêm no seu desempenho: vertical (arfagem), horizontal (pulsação) e angular (cabeceio). A BBDB tem sido estudada em vários países da Europa, Ásia e EUA, com espeial relevo para a Irlanda. Um modelo à escala 1:4 foi testado em 2011 na baía de Galway (costa ocidental da Irlanda) no âmbito do projecto europeu CORES, tendo a turbina de ar sido projectada no IST e construída em

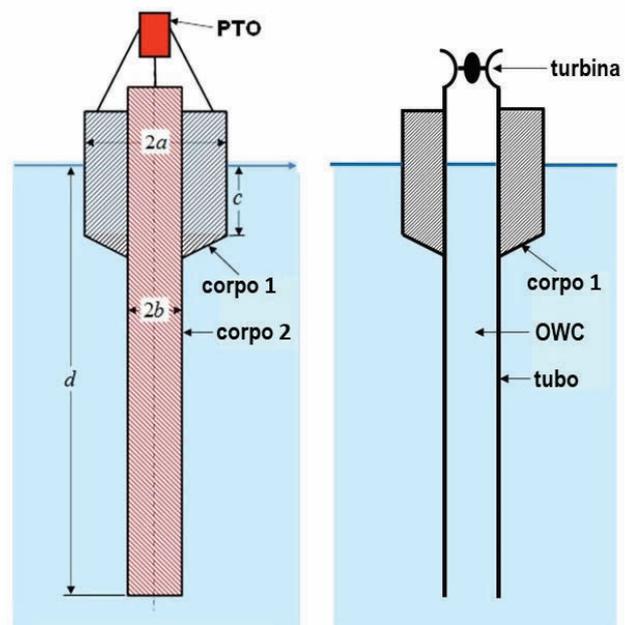


Figura 10 - Comparação entre *spar-buoy* de dois corpos oscilantes (esquerda) e OWC *spar-buoy* (direita).



Figura 11 - Ensaio, em tanque de ondas da Universidade de Plymouth, Reino Unido, de modelo à escala 1:35 de OWC *spar-buoy* desenvolvida no IST (2017).



Figura 12 - Dispositivo OWC *sparbuoy* ensaiado em 2018-19 ao largo da costa do País Basco. A turbina de ar foi desenvolvida no IST.

do sistema até aos equipamentos de conversão de energia. Muitos destes equipamentos tinham já sido desenvolvidos para outras aplicações e necessitaram apenas de adaptações. É o caso das amarrações dos sistemas flutuantes, que são também usadas em navios e em plataformas da indústria petrolífera *offshore*. É também o caso de geradores eléctricos rotativos e de sistemas hidráulicos de óleo a alta pressão. Noutros casos, foi necessário desenvolver novos tipos de equipamentos. É o caso de geradores eléctricos lineares (translação em vez de rotação) e das turbinas de ar para escoamento bidireccional que equipam os sistemas de coluna de água oscilante [3]. O IST especializou-se, desde a década de oitenta do século passado, no desenvolvimento

Portugal (Fig. 14). Um protótipo, OE35, com 826 toneladas de deslocamento e potência instalada de 1 MW, desenvolvido pela empresa irlandesa OceanEnergy, foi recentemente construído em Portland, estado de Oregon, e rebocado para a ilha de Oahu, Hawaii, onde ficará em ensaios com ligação à rede da ilha (Fig. 15). O conversor BBDB tem menor calado e não necessita de águas tão profundas como a OWC *spar-buoy*.

Equipamentos

Para que o aproveitamento da energia das ondas seja possível com viabilidade técnico-económica, tem sido necessário um importante esforço de investigação e desenvolvimento multidisciplinar e internacional, desde a concepção

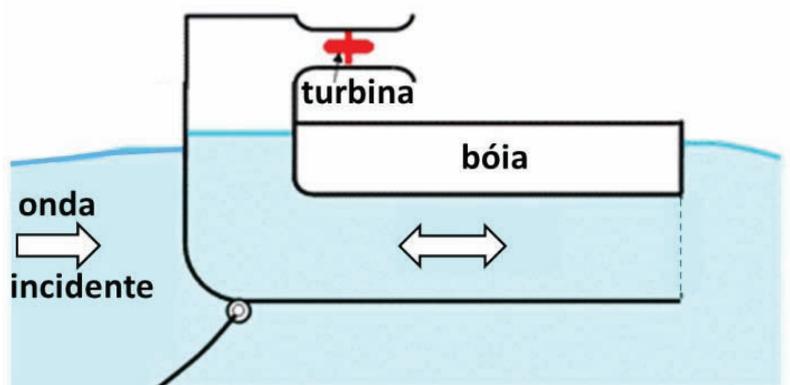


Figura 13 - Representação esquemática do dispositivo BBDB (*Backward Bent Duct Buoy*).



Figura 14 - Modelo de BBDB à escala 1:4 em ensaios ba baía de Galway, Irlanda, em 2011 (projecto europeu CORES). A turbine foi projectada no IST e fornecida por Portugal (fotografia disponibilizada por Kymaner Lda).

deste tipo de turbinas e na criação de infraestruturas laboratoriais para as ensaiar, tornando-se um parceiro desejado em muitos projectos internacionais (Figs. 12,14).

são muito pouco eficientes em mar real. A construção e ensaio dum protótipo em condições reais implica um grande investimento, da ordem de milhões de euros. Essa fase de desenvolvimento deve ser precedida de modelação teórica e de ensaios laboratoriais em modelo reduzido em canal ou tanque de ondas.

A modelação teórica de dispositivos de energia das ondas iniciou-se por volta de 1975, com base em conhecimentos existentes, desenvolvidos para o estudo de navios e estruturas flutuantes em mar ondoso. Nesse esforço participaram matemáticos aplicados, físicos teóricos e engenheiros de vários países. Isso foi feito com base na clássica teoria linear das ondas de superfície, envolvendo a introdução de coeficientes hidrodinâmicos, para cuja determinação existe, desde há cerca de trinta

anos, *software* disponível, baseado no chamado método dos elementos de fronteira (*boundary element method* ou BEM). Este corpo de teoria foi sistematizado no livro [5] da autoria dum dos pioneiros destes estudos. Mais recente-



Figura 15 - Protótipo OE35 de BBDB, com potência de 1 MW. À esquerda, no estaleiro em Portland, Oregon; à direita, à saída do estaleiro, a caminho do Hawaii [4].

Modelação

Nas últimas décadas, o desenvolvimento das turbinas eólicas de eixo horizontal processou-se primeiramente com máquinas relativamente pequenas e evoluiu gradualmente, sem grandes alterações conceptuais, até às grandes turbinas com potências que se aproximam de 10 MW e diâmetros que atingem mais de 160 m. Para a mesma velocidade do vento, a potência da turbina é aproximadamente proporcional à área circular varrida pelas pás.

Isto está longe de se verificar na tecnologia de energia das ondas. A condição de ressonância tem como consequência que, para ser eficaz, o dispositivo deve ter uma dimensão relacionada com comprimento de onda: pequenos dispositivos

mente, têm sido aplicados métodos computacionais mais realistas (conhecidos como *Computational Fluid Dynamics* ou CFD), mas de aplicação muito mais pesada.

Os resultados da modelação numérica devem ser validados por ensaios com modelo reduzido em canal ou tanque de ondas, com escalas que variam desde cerca de 1:100 (em canais de ondas relativamente pequenos) até cerca de 1:10 nos maiores tanques de ondas. Naturalmente o custo do ensaio aumenta com a escala. A Comissão Europeia estabeleceu o programa, MARINET de apoio financeiro para acesso a alguns grandes tanques de ondas na Europa, de modo a viabilizar ensaios de modelos de conversores de energia das ondas.

Conclusões

As ondas constituem um abundante recurso energético renovável cujo aproveitamento em condições de viabilidade técnica e económica se verificou ser difícil e requerer um grande esforço de inovação e investigação. Muitos têm sido os conceitos desenvolvidos nas últimas quatro décadas, uma grande parte dos quais ficaram pelo caminho, incluindo alguns que tinham atingido a fase de protótipo. Mas, como na vida, se uns morrem outros nascem, aprendendo-se muitas vezes com os erros do passado. O número de equipas, muitas das quais em universidades, que se empenham em vencer este desafio tem vindo crescer marcadamente nos últimos anos. Neste artigo, procurou-se dar uma visão das linhas de desenvolvimento das tecnologias, com referência especial a alguns conceitos e dispositivos que se afiguram mais promissores, e ao papel desempenhado por instituições portuguesas.



António Falcão, é Professor Cate-
drático Emérito do Instituto Superior
Técnico da Universidade de Lisboa,
e membro do IDMEC (Instituto de
Engenharia Mecânica). É licencia-
do em Engenharia Mecânica pelo
IST e doutorado pela Universida-
de de Cambridge. É membro da
Academia Portuguesa de Engenharia.
Foi-lhe atribuída, em 2017, pelo Ministro da Ciência,
Tecnologia e Ensino Superior, a Medalha de Mérito
Científico. É um dos pioneiros na Europa na con-
versão da energia das ondas, tendo participado em
muitos projectos nacionais e europeus.

Referências

- [1] A. F. de O. Falcão, “Wave energy utilization: a review of the technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 899-918 (2010)
- [2] A. Pecher e J. P. Kofoed (editores) “Handbook of Ocean Wave Energy”, Springer Open (2017) (<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-39889-1>)
- [3] A.F.O. Falcão e J.C.C. Henriques “Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review”, *Renewable Energy* 85, 1391-1424 (2016)
- [4] OceanEnergy (<https://oceanenergy.ie/>)
- [5] J. Falnes “Ocean Waves and Oscillating Systems. Linear Interactions Including Wave-energy Extraction”, Cambridge University Press, Cambridge (2002)