

## APROVEITAMENTO DA ENERGIA DO MAR ATRAVÉS DO ESPRAIAMENTO EM ESTRUTURAS COSTEIRAS Sea Energy Exploitation Through Coastal Structures Run-Up

PEDRO OLIVEIRA <sup>(1)</sup>, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO <sup>(2)</sup>, TIAGO MORAIS <sup>(3)</sup> e PAULO ROSA-SANTOS

<sup>(1)</sup> Mestre em Engenharia Civil, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n,4200-465 Porto, pedro.13.miguel@gmail.com

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

<sup>(3)</sup> Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Instituto de Ciência e Inovação em Eng. Mecânica e Eng. Industrial (INEGI),  
Rua do Dr. Roberto Frias, 400 4200-465 Porto, tmora@inegi.up.pt

<sup>(4)</sup> Professor Auxiliar Convidado, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n,4200-465 Porto, pjr Santos@fe.up.pt

### Resumo

A dependência humana dos combustíveis fósseis, a sua utilização excessiva e os impactos negativos que lhe estão associados são questões que devem ser analisadas para assegurar a sustentabilidade global. Para diminuir a utilização de combustíveis fósseis é necessário desenvolver novas formas de aproveitamento de fontes de energia renováveis que permitam um desenvolvimento sustentado. Assim, no presente artigo, é apresentado um dispositivo de conversão da energia das ondas a ser incorporado em estruturas de defesa costeira ou portuárias, assim como os trabalhos de investigação realizados e estudos levados a cabo para a otimização e o desenvolvimento do mesmo. O dispositivo é baseado na tecnologia SSG (Sea-wave Slot-cone Generator) desenvolvida pela empresa WAVEenergy (Stavanger, Noruega), que tem vindo a ser desenvolvida na Universidade de Aalborg, Dinamarca. A tecnologia aproveita a energia presente nos eventos de galgamento provocados pelas ondas do mar nas estruturas costeiras.

O objetivo do presente trabalho é estudar um dispositivo de conversão da energia das ondas baseado na tecnologia SSG e otimizar a sua eficiência através do estudo de "concentradores" que concentram a energia das ondas incidentes provocando um aumento do fenómeno de galgamento. O desenvolvimento do dispositivo e a sua otimização foram realizados recorrendo à modelação física, tendo sido realizados ensaios no tanque de ondas da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) da FEUP, a uma escala geométrica de 1:40, utilizando ondas regulares e irregulares.

Os resultados obtidos nas experiências realizadas permitem, por um lado, conhecer a capacidade de absorção de energia do dispositivo para condições de mar típicas da costa Oeste portuguesa e, por outro lado, a otimização da geometria da estrutura, com especial foco nas componentes idealizadas (concentradores).

**Palavras-chave:** Energia das ondas, SSG (Sea-wave Slot-cone Generator), defesa costeira, galgamento.

### Abstract

The negative impacts caused by fossil fuels over the past decades on Earth and the high dependence of the same by all mankind are issues that must be countered to ensure global sustainability. To replace fossil fuels it is necessary to develop ways of harnessing renewable energy to enable a sustainable development. Thus, this study presents a device for converting wave energy that can be incorporated into coastal defense structures as well as the research undertaken and the studies carried out for its optimization and development. The device is based on the SSG (Sea-wave Slot-cone Generator) technology developed by the company WAVEenergy (Stavanger, Norway) that has been investigated at Aalborg University, Denmark. The technology harnesses the energy present in the overtopping events caused by the waves on coastal structures.

The objective of this work is to develop a wave energy converter based on the SSG technology and to optimize its efficiency through the study of "concentrators" that concentrate the energy of the incident waves causing an increase of the overtopping phenomena. The development of the device and its optimization was carried out using physical modeling.

The experimental tests were carried out in the wave tank of the Hydraulics, Water Resources and Environment Division (SHRHA), FEUP, on a geometric scale of 1:40, using both regular and irregular waves. The results of the experiments allow, in one hand, to know the capacity of energy absorption of the device under typical sea conditions of the Portuguese west coast and, on the other hand, the optimization of the geometry of the structure, with special focus on the optimization of idealized components (concentrators).

**Keywords:** Wave energy, SSG (Sea-wave Slot-cone Generator), coastal defense, overtopping.

## 1. Introdução

A utilização excessiva dos combustíveis fósseis originou, nos últimos anos, impactos ambientais negativos como a subida da temperatura média da Terra, o aumento do nível da água do mar, o degelo dos polos e outros glaciares, deterioração da qualidade do ar, etc.

Além disso, o facto de as fontes fósseis não se renovarem à mesma velocidade a que são consumidas levanta uma questão económica negativa, que consiste na subida gradual do custo deste tipo de energia à medida que a fonte vai escasseando.

Assim, é necessário aumentar a componente de energias renováveis no total de energia elétrica produzida a nível mundial de maneira a mitigar a tendência negativa que se verifica atualmente.

A energia elétrica é uma parte essencial da vida moderna. Está presente em qualquer edifício, sendo utilizada para iluminação, aquecimento ou arrefecimento e alimentação de aparelhos. É das formas energéticas mais utilizadas pelo Homem devido à facilidade de transporte e baixo índice de perda de energia durante as conversões.

A exploração de energias renováveis para produção de eletricidade é uma preocupação mundial atual. Apesar de se esperar um aumento deste tipo de produção de energia, é de salientar que esse aumento nunca é demasiado, tendo em conta as vantagens que possui quando comparada com as energias fósseis (líderes no mercado da eletricidade).

Se forem mantidas as políticas nacionais de incentivo e sensibilização a estas formas de energia é de esperar que no ano de 2030, entre 40 a 50% da eletricidade consumida globalmente seja proveniente de fontes renováveis (Century, 2013).

Portugal possui a terceira maior Zona Económica Exclusiva, (espaço marítimo que um país detém, no qual tem direitos na utilização dos seus recursos, tanto vivos como não vivos) da União Europeia e a 11ª maior de todo o mundo. Esta representa, sensivelmente, vinte vezes o território nacional “terrestre” e pode-se revelar determinante na questão das energias renováveis em Portugal.

Tendo em conta o potencial marinho português evidenciado anteriormente e a urgente necessidade de aumentar a produção de eletricidade por meio de energias renováveis, o presente artigo apresenta como principal objetivo o estudo e otimização de um dispositivo para a conversão da energia das ondas aplicável em Portugal.

## 2. Aproveitamento da Energia das Ondas

### 2.1. Energia marinha

O oceano é um recurso inesgotável que apresenta uma grande diversidade de formas de energia renovável como as correntes oceânicas, as marés, as ondas, o vento, os gradientes de salinidade e a energia térmica.

Toda esta diversidade de formas de energia pode e deve ser explorada por forma a produzir eletricidade de uma maneira limpa e sustentável usando recursos renováveis.

As tecnologias de sistemas de aproveitamento de energias marinhas, apesar de serem, em geral, relativamente recentes, estão em constante desenvolvimento, perspetivando-se que o potencial energético do oceano seja fundamental para a sustentabilidade futura do planeta (Research & Innovation - Energy).

Os dispositivos de aproveitamento da energia marinha desenvolvidos para o efeito em questão encontram-se ainda numa fase inicial de desenvolvimento (à exceção da eólica offshore e das barragens de maré), havendo a necessidade de ultrapassar algumas barreiras, quer tecnológicas, quer financeiras, de maneira a conseguir uma maior competitividade face a outros recursos existentes.

Muitas das barreiras tecnológicas estão relacionadas com a agressividade do meio marinho para com as estruturas, o que levanta problemas como a fiabilidade, a capacidade de sobrevivência no mar ou mesmo dificuldades na realização de operações de manutenção.

Para além destes, e não menos importantes, existem obstáculos não diretamente relacionados com a tecnologia, onde se incluem a falta de incentivos financeiros, infraestruturas e logística, os impactos ambientais provocados pela adoção de certas soluções e a perceção pública. É importante que se consiga apoio suficiente de governos e grandes empresas para se passar de um estudo com resultados demonstrados para a comercialização e a implementação em grande escala deste tipo de dispositivos. A geração de ondas resulta da ação do vento sobre a superfície dos oceanos, existindo portanto uma relação entre o recurso das ondas e a intensidade do vento, que por sua vez está diretamente relacionada com o recurso solar. Sendo assim, regiões com maior intensidade de ventos apresentam maior densidade do recurso energético das ondas (Barata da Rocha, 2014).

A avaliação deste recurso é fundamental, quer para o planeamento da sua utilização, quer para o projeto de dispositivos de aproveitamento da energia das ondas. O recurso “energia das ondas” é expresso como uma unidade de potência por metro de crista da onda ou por metro de costa (kW/m), considerando-se ideal para os dispositivos de aproveitamento da energia das ondas aquele que se situe entre os 20 e os 70 kW/m (Falcão, 2010).

Valores desta ordem de grandeza podem ser encontrados em latitudes entre os 40° e os 60° em ambos os hemisférios, apesar de o recurso ser mais constante no sul do planeta, *i.e.*, enquanto no norte durante o mês de menor intensidade se registam valores de 30% da intensidade média anual, no sul, esses valores são de aproximadamente 60% da média anual.

### 2.2. Formas de aproveitamento da energia das ondas em infraestruturas costeiras

O aproveitamento da energia das ondas usando dispositivos incorporados em estruturas costeiras e portuárias pode ser feito, em geral, através de três tecnologias distintas. A primeira consiste na inserção de uma “coluna de água oscilante” no corpo da estrutura e a segunda consiste no aproveitamento da energia potencial ganha pela água no fenómeno de espraçamento/galgamento (*overtopping/run up*).

Recentemente foi avaliada a possibilidade de incluir em estruturas portuárias dispositivos que aproveitam a energia das ondas através do movimento de vários corpos flutuantes. O método da coluna de água oscilante (OWC - *oscillating water column*) consiste numa estrutura de aço ou betão parcialmente submersa, aberta abaixo da superfície livre da água, criando uma espécie de câmara. Esta contém ar no interior, que é forçado a fluir por uma turbina que movimenta um gerador elétrico, quando a superfície livre de água oscila devido à ação das ondas incidentes, Figura 1. A turbina *Wells* é aconselhada para este tipo de dispositivos porque gira sempre no mesmo sentido, independentemente do sentido do fluxo de ar.

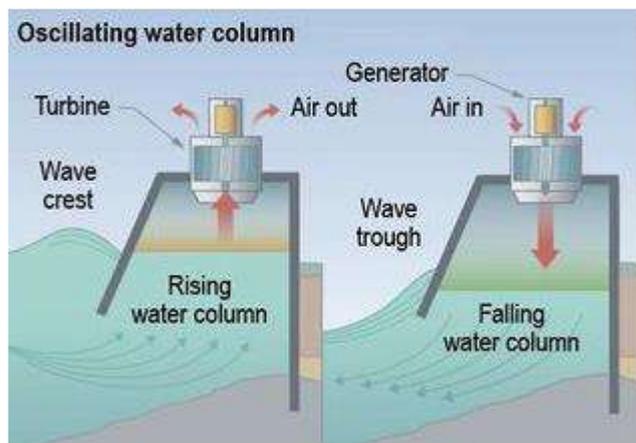


Figura 1. Esquema representativo do funcionamento da coluna de água oscilante (OWC).

O segundo método é baseado na captura em reservatórios da água que se espraia na estrutura, sendo armazenada a cotas superiores à do nível médio da superfície livre da água na envolvente, Figura 2.



Figura 2. Esquema representativo do funcionamento dos dispositivos por galgamento.

O acréscimo de energia potencial obtido através do espraimento/galgamento é transformado em energia elétrica através de turbinas hidráulicas de baixa queda aquando da devolução da água armazenada no mar (Falcão, 2010).

A produtividade deste tipo de dispositivos é muito dependente das condições locais de agitação marítima, da batimetria dos fundos na envolvente do dispositivo, do dimensionamento das componentes das estruturas onde ocorre o espraimento e do desempenho da(s) turbina(s), (Margheritini *et al.*, 2009).

Recentemente foi avaliada no Brasil a possibilidade de incluir em estruturas portuárias dispositivos que aproveitam a energia das ondas através do movimento de vários corpos flutuantes (projeto da COPPE/UFRJ). O corpo flutuante encontra-se ligado a um braço que transmite o movimento provocado pelas ondas a uma bomba hidráulica que, por sua vez, força a entrada de água numa câmara sob pressão. Quando a água se encontra a uma dada pressão, é libertada formando um jato que faz girar uma turbina acoplada a um gerador elétrico, produzindo assim eletricidade, Figura 3.

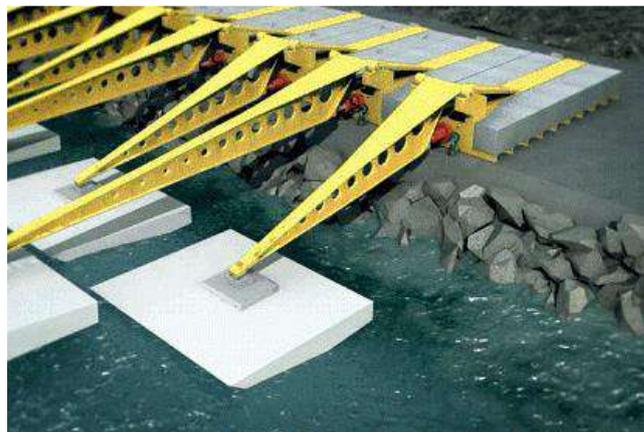


Figura 3. Esquema representativo da tecnologia baseada no movimento de vários corpos flutuantes.

### 2.3. Sistema SSG - Sea-wave Slot-cone Generator

O conceito Sea-wave Slot-cone Generator (SSG) foi desenvolvido pela empresa WAVEenergy (Stavanger, Noruega), Vicinanza *et al.* (2012). Trata-se de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas por galgamento, que utiliza reservatórios sobrepostos, onde a água é armazenada na forma de energia potencial, sendo depois utilizada para fazer operar turbinas hidráulicas. A investigação já realizada na Universidade de Aalborg (Dinamarca) focou-se maioritariamente na maximização da captação da energia das ondas incidentes e na natureza e intensidade das solicitações provocadas pelas ondas na estrutura.

Para além destes temas, foi ainda dada alguma atenção à investigação das questões técnicas e económicas relacionadas com a possibilidade da integração do SSG em estruturas tradicionais de proteção de portos (Vicinanza *et al.*, 2012). A estrutura funciona por galgamento o que significa que esta deve ser galgada pelas ondas incidentes para que, durante estes eventos, a água seja capturada a um nível superior ao da superfície do mar, Figura 4.



Figura 4. Secção transversal de um dispositivo SSG com três níveis (Margheritini *et al.*, 2009).

Para evitar que a pressão do ar dentro dos reservatórios obstrua a entrada de água devem ser previstas várias aberturas de ventilação.

A água que é armazenada nos reservatórios, antes de ser devolvida ao mar, passa por turbinas de baixa queda, do tipo *Kaplan*, reguladas por comportas, que são as únicas partes móveis de toda a estrutura (aspeto importante face ao seu funcionamento num ambiente marinho, onde as solicitações durante eventos extremos podem ser 100 vezes superiores à situação operacional normal).

A otimização do dispositivo SSG passa, essencialmente, pela definição da geometria mais favorável da estrutura para as condições no local da instalação e pela estratégia usada no dimensionamento e operação da(s) turbina(s).

Os comprimentos e inclinação das frentes dos reservatórios que conduzem a água aos vários níveis são projetados com o objetivo de otimizar a energia capturada e reduzir as ações atuantes na estrutura para as condições de projeto.

As características da agitação marítima e a batimetria do local são variáveis importantes para o dimensionamento do paramento frontal dos reservatórios, assim como a proximidade da fundação da estrutura, que pode contribuir para o aumento ou redução do fenómeno de espraiamento.

Aspetos como o aumento do volume de armazenamento podem proporcionar menores perdas por transbordamento e custos da estrutura mais elevados, enquanto o aumento da capacidade da turbina pode resultar num maior consumo de energia nos ciclos de *start/stop* da turbina (Margheritini *et al.*, 2009). Estas questões devem ser estudadas de maneira a obter uma otimização do desempenho da estrutura tendo em conta o investimento envolvido.

### 3. Caso de Estudo

#### 3.1. Instalação experimental

Os ensaios experimentais foram realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA), da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

O tanque de ondas tem 28 m de comprimento, 12 m de largura e uma altura de 1.2 m. A reprodução dos estados de agitação marítima é feita por um sistema de geração de ondas do tipo multi-elementos controlado a partir de uma sala adjacente ao tanque, onde também se encontra o sistema de aquisição de dados.

#### 3.2. Modelo

O modelo foi construído à escala geométrica 1/40 e corresponde à reprodução de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas através do galgamento, baseado na tecnologia SSG já existente. O objetivo deste trabalho experimental era o de otimizar a eficiência hidráulica do modelo construído.

O modelo consiste num caixão, similar aos caixões de betão normalmente utilizados na construção de quebra-mares verticais, onde é incorporado o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas.

A parte superior da estrutura está dividida em três secções ao longo da sua largura e o módulo destinado ao aproveitamento de energia encontra-se incorporado na secção do meio, Figura 5.

A geometria do dispositivo estudada resulta de uma conjugação de conclusões obtidas em diversos estudos sobre a tecnologia SSG.

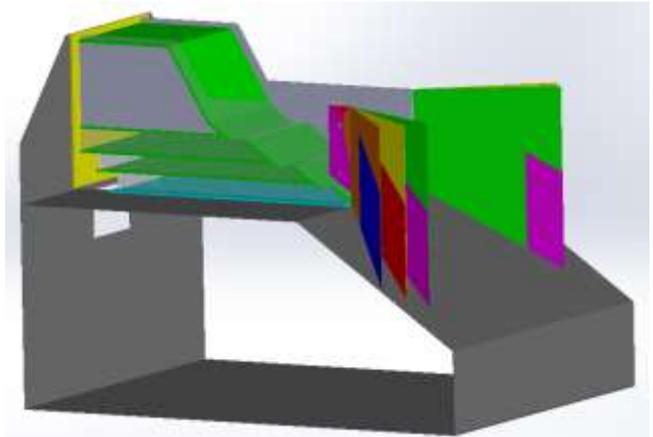


Figura 5. Estrutura do modelo construída com o software *SolidWorks*.

Com o objetivo de aumentar a eficiência do dispositivo de conversão da energia das ondas foram dimensionados “concentradores” que visam aumentar os volumes de galgamento. Consistem em paredes verticais que são um prolongamento das paredes verticais laterais do dispositivo e conduzem as ondas incidentes, de uma secção com uma maior largura frontal, à secção central do módulo de aproveitamento de energia.

Os concentradores têm 0.3 m de comprimento no modelo, o que corresponde a 12.0 m no protótipo, tendo sido desenvolvidos com três orientações diferentes (30°, 40° e 50°, Figura 5) e duas configurações, Figura 6, por forma a avaliar qual a combinação que conduz à maior eficiência hidráulica.

Na primeira configuração (C2) os concentradores mantêm ao longo do seu desenvolvimento a cota do coroamento das paredes verticais laterais, e na segunda configuração (C3) os mesmos vão reduzindo a sua cota linearmente de acordo com a inclinação da rampa de aproximação (paralelamente), Figura 6.

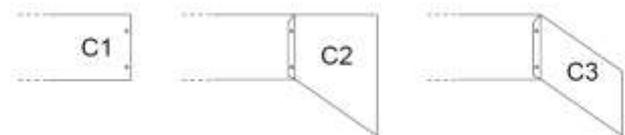


Figura 6. Perfil do modelo SGG sem e com duas configurações de concentradores.

A configuração C1 corresponde à situação em que não são aplicados concentradores. A largura de captura do dispositivo ( $w$ ), que corresponde ao comprimento da frente da estrutura na qual incidem as ondas para o aproveitamento de energia, varia com o ângulo dos concentradores. Quanto maior o ângulo, maior é a largura de captura. A Figura 7 apresenta duas fotografias do modelo físico construído.



Figura 7. Fotografias do modelo construído: à esquerda a estrutura completa; à direita o pormenor do dispositivo SSG.

### 3.3. Sistemas de medição

Para registar as variações do nível de água foram utilizadas sondas de nível do tipo resistivo. Estas sondas baseiam o seu princípio de operação na medição da corrente elétrica que passa através das duas varetas paralelas de aço inoxidável que se encontram submergidas na água.

A corrente elétrica que passa através dessas varetas é proporcional à sua profundidade de imersão, sendo convertida num valor de voltagem. Por fim, voltagem obtida é por fim transformada numa altura da superfície livre da água.

Uma vez que o volume total dos reservatórios da estrutura SSG não era suficiente para armazenar todo o volume de galgamento relativo a um determinado ensaio, foi necessário implementar um sistema de medição de caudal na parte de trás da estrutura, ao qual estava ligado cada um dos reservatórios do dispositivo. Esse sistema de medição de caudal baseia-se na medição do tempo de funcionamento de uma bomba hidráulica que retribui a água recolhida pelo dispositivo ao tanque de ondas. Admitindo que a bomba funciona com caudal constante é possível determinar um “caudal de galgamento” total para um determinado ensaio.

### 3.4. Programa de ensaios

Foi realizada uma análise do recurso que se pretende aproveitar numa zona específica da costa portuguesa e de seguida elaborado o programa de ensaios teórico com base na análise do mesmo recurso.

A zona escolhida corresponde à foz do Rio Douro para onde já esteve projetada a construção de um dispositivo de coluna de água oscilante para explorar a energia das ondas.

Os trabalhos iniciaram-se com uma série de ensaios exploratórios que serviram para avaliar o funcionamento do modelo. De seguida foram realizados ensaios com ondas regulares e por fim os ensaios com ondas irregulares utilizando o espectro JONSWAP.

No caso das ondas regulares foram realizados ensaios de 5 min, duração que, na escala real corresponde a períodos de 30 min. Nos ensaios com ondas irregulares considerou-se uma duração de 20 min que corresponde na escala do protótipo a aproximadamente 2 horas.

### 3.5. Parâmetros para avaliação do desempenho dispositivo

Conhecido o tempo de funcionamento total de cada bomba para um determinado ensaio, é possível calcular o volume total de galgamento, para esse mesmo ensaio, em cada um dos reservatórios individualmente.

Este volume pode ser calculado da seguinte forma,

$$V_{R,j} = t q_b \quad [1]$$

em que  $V_{R,j}$  representa o volume recolhido em cada um dos reservatórios (Res1, Res2 e Res3) durante um determinado ensaio,  $t$  o tempo de funcionamento das bombas hidráulicas submersas posicionadas no sistema de medição de caudal e  $q_b$  o caudal médio de funcionamento das bombas instaladas ( $q_b = 0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

O caudal médio de galgamento relativos aos diversos reservatórios pode ser obtido da seguinte forma,

$$q_{0v,j} = \frac{V_{R,j}}{t_T} \quad [2]$$

em que  $q_{0v,j}$  representa o caudal médio de galgamento obtido para cada um dos reservatórios individualmente e  $t_T$  a duração total do ensaio.

Com base nos parâmetros anteriores calcula-se a potência média à entrada de cada um dos reservatórios ( $P_{R,j}$ ), através de,

$$P_{R,j} = \rho g q_{0v,j} R_{c,n} \quad [3]$$

em que  $P_{R,j}$  representa a potência média à entrada de cada reservatório,  $\rho$  a massa volúmica da água do mar ( $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  a aceleração da gravidade ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ), e  $R_{c,j}$  o nível da entrada dos reservatórios em relação ao nível médio da água do mar ( $R_{c1} = 1,5 \text{ m}$ ,  $R_{c2} = 3,0 \text{ m}$  e  $R_{c3} = 5,0 \text{ m}$ ).

A potência média total para um determinado ensaio,  $P_T$ , é calculada com base na potência obtida individualmente para cada um dos reservatórios, através de,

$$P_T = P_{R1} + P_{R2} + P_{R3} \quad [4]$$

Partindo da potência média total consegue-se determinar a potência unitária (por largura de captura) do dispositivo:

$$P_w = \frac{P_T}{w} \quad [5]$$

em que  $P_w$  representa a potência unitária e  $w$  a largura de captura do dispositivo, também designada de frente de captura.

Para efetuar a comparação das diferentes combinações estudadas determinaram-se os ganhos para cada uma das situações com concentradores em relação à situação sem concentradores,

$$\text{Ganhos}(\%) = \left( \frac{P_T}{P_{TOC1}} \right) \cdot 100 \quad [6]$$

em que Ganhos representa essa relação, em percentagem,  $P_T$  a potência total de uma situação com concentradores e  $P_{TOC1}$  a potência total obtida na combinação sem concentradores.

Com o objetivo de comparar a eficiência associada às diferentes combinações estudadas calculou-se a eficiência hidráulica do dispositivo ( $\eta_{Hyd}$ ) para cada ensaio realizado.

Por fim, estimou-se a produção energética anual com base no estudo do recurso já mencionado, onde são apresentadas as probabilidades de ocorrência de cada estado de mar, e nos valores das eficiências associadas às várias fases do processo de conversão da energia das ondas, os quais servem para obtenção da potência produzida,

$$P_p = \sum P_T \text{coef} \eta_{res} \eta_{tur} \eta_{gen} \quad [7]$$

em que  $P_p$  representa a potência média produzida,  $\text{coef}$  os coeficientes atribuídos com base na probabilidade de ocorrência de cada estado de mar,  $\eta_{res}$  a eficiência dos reservatórios,  $\eta_{tur}$  a eficiência das turbinas e  $\eta_{gen}$  a eficiência do gerador elétrico. Estas três eficiências foram definidas tendo por base os resultados de estudos anteriores.

A produção energética anual obtém-se da seguinte forma,

$$E = P_p \cdot t_{ano} \quad [8]$$

em que  $E$  representa a estimativa da energia produzida anualmente e  $t_{ano}$  o número de horas correspondente a um ano.

### 3.6. Resultados

Os resultados do estudo experimental permitiram realizar uma análise comparativa entre as configurações C1, C2 e C3. Dado que as configurações C2 e C3 proporcionam maiores valores de potência absorvida, nas Figuras 8 a 10 apresenta-se uma comparação entre as mesmas, para as três orientações dos concentradores estudadas. As condições de agitação consideradas foram as seguintes:

- IR<sub>1</sub> → H= 2,50m ; T=11,5s
- IR<sub>2</sub> → H= 5,00m ; T=18,4s
- II<sub>1</sub> → H<sub>s</sub>=7,8m ; T<sub>p</sub>=11,5s
- II<sub>2</sub> → H<sub>s</sub>=3,3m ; T<sub>p</sub>=11,5s
- II<sub>3</sub> → H<sub>s</sub>=3,0m ; T<sub>p</sub>=16,1s
- II<sub>4</sub> → H<sub>s</sub>=4,4m ; T<sub>p</sub>=18,4s

Analisando os resultados apresentados nas Figuras 8 a 10 percebe-se que a potência total captada com a configuração C2 é muito semelhante ao valor correspondente aproveitado com a configuração C3.

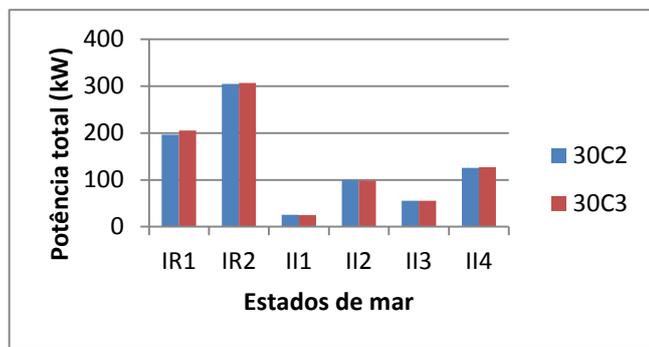


Figura 8. Comparação entre a potência captada na configuração C2 e na configuração C3 para um ângulo de 30° dos concentradores.

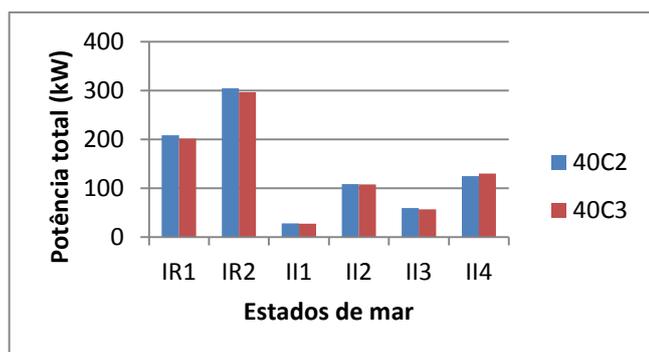


Figura 9. Comparação entre a potência captada na configuração C2 e na configuração C3 para um ângulo de 40° dos concentradores.

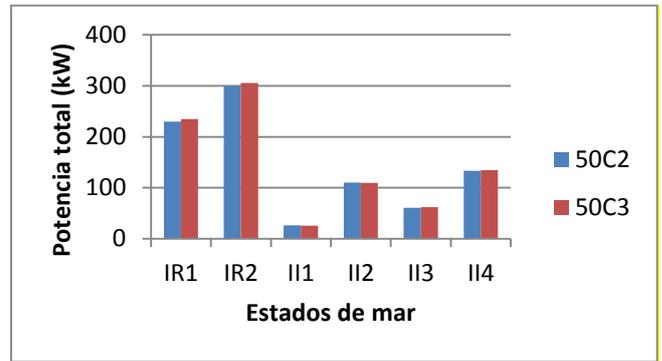


Figura 10. Comparação entre a potência captada na configuração C2 e na configuração C3 para um ângulo de 50° dos concentradores.

Com efeito, em alguns ensaios a configuração C2 apresentou melhores resultados do que a C3, e noutros ensaios verificou-se o oposto. No entanto os valores obtidos foram sempre muito próximos.

Assim, e visto que a configuração C2 representa um maior investimento em termos de construção, não só pelas suas dimensões, mas também pela maior dificuldade em garantir a sua estabilidade (por ser mais alta), pode-se concluir que a utilização da configuração C3 é mais vantajosa. Por esse motivo, nos testes seguintes, apenas foi utilizada a configuração C3.

Os testes realizados com ondas regulares, apesar das suas limitações, permitiram avaliar a influência da altura de onda e do período de onda no funcionamento do modelo.

Assim, pôde verificar-se que o caudal de galgamento aumenta, para os três reservatórios, com a altura de onda incidente. Porém, quando o período de onda aumenta o caudal de galgamento diminui.

Este estudo permite, ainda, concluir que nas combinações que incluem concentradores existe um aumento do caudal médio de galgamento, como já foi referido, e que esse aumento é mais expressivo nos dois reservatórios superiores (resultados não apresentados). Isto pode ser explicado pelo aumento do espreadimento provocado pelos concentradores.

Os testes realizados com ondas irregulares são os que mais se aproximam do que acontece na natureza. Precisamente por isso são aqueles que permitem a obtenção de resultados mais interessantes para realizar uma análise do ponto de vista energético.

Assim, por meio da análise dos resultados dos ensaios com ondas irregulares, foi possível comparar as diferentes combinações de configurações da estrutura do ponto de vista, quer da potência captada, quer da eficiência hidráulica.

Na Figura 11 é apresentada a potência total à entrada dos reservatórios, para as diferentes combinações do dispositivo e para todos os estados de mar experimentados.

Analisando a figura é evidente que qualquer um dos concentradores estudada aumenta a potência aproveitada pelo dispositivo.

O aumento observado é variável com o estado de mar, sendo possível relacioná-lo com a alteração, quer do período, quer da altura de onda.

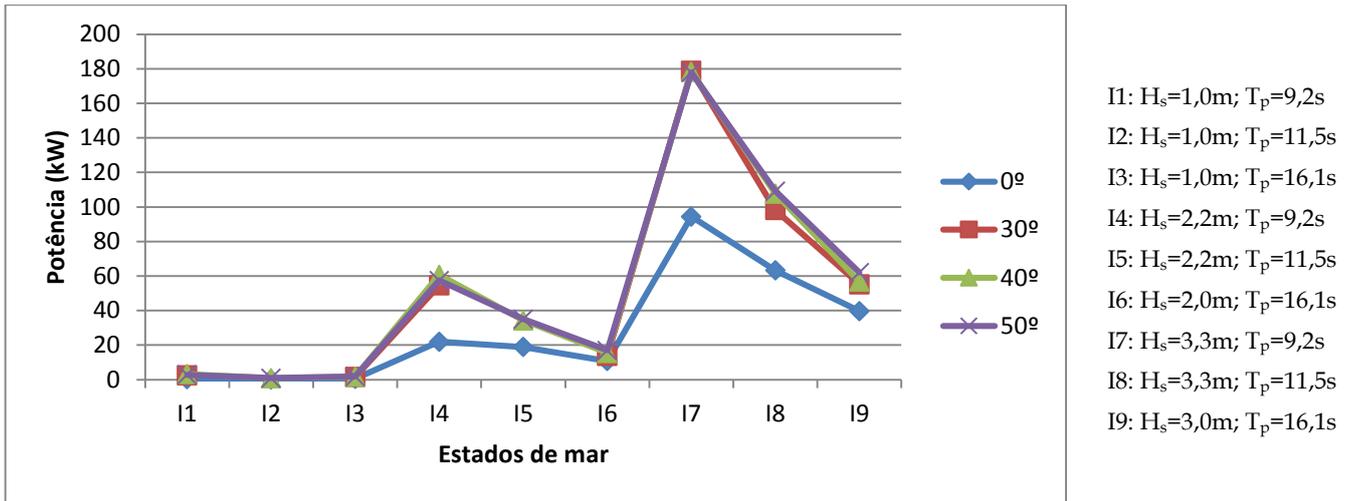


Figura 11. Potência total capturada para as diferentes configurações do dispositivo e para os estados de mar ensaiados.

Analisando os ensaios nos quais se mantém a altura de onda constante e se altera o período de pico, conclui-se que quanto menor o período, maiores são as diferenças entre a situação sem concentradores e com concentradores. Por outro lado, nos ensaios em que o período se mantém constante é perceptível que quanto maior for a altura de onda menores são os ganhos provocados pelos concentradores. Para um período de pico,  $T_p$ , de 9,2s (o menor) os ganhos na potência captada variam entre 1150%, para a menor altura de onda, e 88%, para a maior altura de onda; para um período de pico de 16,1s (o maior) os ganhos de potência variam entre 250%, para a menor altura de onda, e 39% para a maior altura de onda. Apesar de se concluir que há um ganho na potência capturada quando os concentradores são aplicados, não é possível ainda avaliar qual dos ângulos de concentradores é o mais vantajoso.

Até ao momento, as diferentes combinações foram sempre comparadas com base nos valores da potência média total capturada à entrada dos reservatórios. Contudo, deve ser realizada uma comparação tendo em conta a largura de captura do dispositivo.

Assim, com base nas diferentes larguras de captura, calculou-se a potência capturada por metro de frente ( $P_w$ ) que, quando relacionada com a potência da onda incidente ( $P_{Wave}$ ), resulta na eficiência hidráulica do dispositivo ( $\eta_{Hyd}$ ), Figura 12.

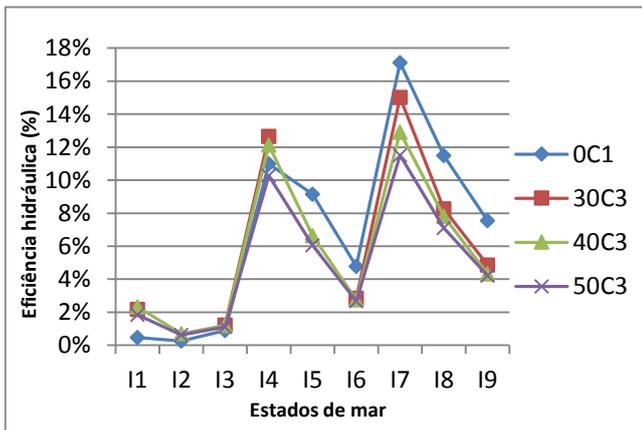


Figura 12. Eficiência hidráulica para os estados de mar ensaiados.

Analisando a Figura 12 é perceptível que as soluções 30C3, 40C3 e 50C3 com concentradores apresentam um melhor desempenho para os estados de mar com menores alturas de onda significativas, enquanto a solução sem concentradores tem melhores eficiências para os estados de mar com maiores alturas de onda. Tendo presente que os estados de mar com menores alturas de onda são os que têm uma maior probabilidade de ocorrência, os resultados das configurações com concentradores são surpreendentes. Isto porque, mesmo apresentando uma maior largura de captura, o que diminui a potência unitária capturada ( $P_w$ ), e mantendo a largura do dispositivo de aproveitamento inalterada (entrada para os reservatórios), as configurações com concentradores revelam um aumento da eficiência hidráulica para os estados de mar que mais ocorrem. Observando os dois casos que apresentam uma maior potência total aproveitada (40C3 e 50C3), é visível que a combinação 40C3 apresenta melhores resultados, aproximando-se muito dos obtidos para a combinação 30C3, que tem uma largura de captura menor. Isto quer dizer que os concentradores na situação 40C3, quando comparados com os 50C3, apresentam o melhor desempenho tendo em conta a largura de captura que apresentam.

Por último, foi elaborada uma estimativa da produção energética anual para o local da costa portuguesa em estudo, para cada uma das combinações ensaiadas. Assim, com base nas probabilidades de ocorrência dos estados de mar apresentados no estudo do recurso, atribuiu-se uma probabilidade de ocorrência a cada condição de agitação marítima ensaiada (altura de onda significativa; período de pico). As potências médias de cada altura de onda significativa obtidas para cada condição de agitação foram então multiplicadas pela respetiva probabilidade de ocorrência, resultando uma potência média anual captada à entrada dos reservatórios.

As estimativas da energia produzida que são apresentadas na Figura 13 indicam que as combinações 40C3 e 50C3 são as mais favoráveis energeticamente, sendo os valores obtidos muito semelhantes (200 MWh e 201 MWh). Quando comparadas com a situação 0C1 (105 MWh) conclui-se que a utilização destas configurações de concentradores aumenta a produção de energia aproximadamente para o dobro.

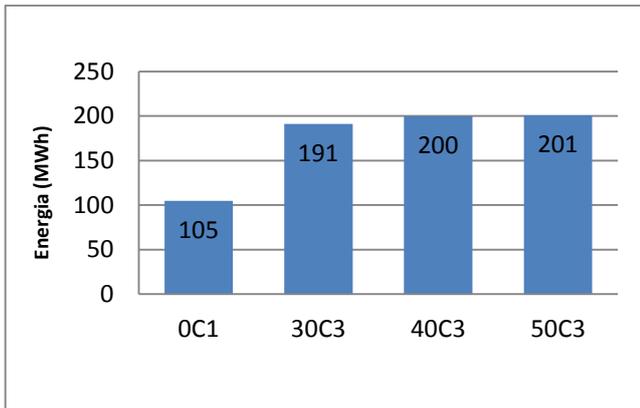


Figura 13. Estimativa da energia anualmente produzida para as configurações do dispositivo ensaiadas.

#### 4. Conclusões e Trabalhos Futuros

O modelo físico testado é baseado no dispositivo SSG, apresentando, no entanto, algumas alterações com vista à otimização do seu desempenho hidráulico, ou seja, ao aumento do caudal médio de galgamento recolhido pela estrutura. As alterações consistem na introdução de concentradores, ou seja, de paredes verticais que aumentam a frente de captura do dispositivo, aumentando assim a energia capturada.

O modelo físico do dispositivo desenvolvido, construído à escala 1:40, foi estudado por meio de ensaios em tanque de ondas. Foram realizadas experiências com ondas regulares e ondas irregulares (espectro JONSWAP), sendo as últimas as mais relevantes porque se aproximam mais da realidade. Os estados de mar ensaiados foram selecionados tendo em conta as características do recurso na zona da foz do Douro, Porto.

Os dados recolhidos durante o trabalho experimental permitiram avaliar o modelo do ponto de vista energético, através da quantificação dos caudais médios de galgamento que ocorrem em cada reservatório.

Os ensaios permitiram concluir que todas as combinações que incluem a utilização de concentradores aumentam o caudal médio de galgamento e, conseqüentemente, também a potência aproveitada à entrada dos reservatórios. Os concentradores fazem com que seja "recolhida" uma maior largura da frente das ondas incidentes, através do aumento da largura de captura do dispositivo.

Por outro lado, observa-se que o facto de os concentradores formarem uma espécie de canal, cada vez mais estreito, provoca um aumento da altura da onda que é espalhada no dispositivo SSG.

Com base nos resultados experimentais obtidos foi possível comparar as duas configurações de concentradores (C2 e C3) e concluir que ambas apresentam, em média, os mesmos resultados. Assim, o estudo da configuração C2 não construção menos dispendiosa, quer pela menor dimensão das paredes, quer pela maior facilidade de assegurar a sua estabilidade.

Os ensaios realizados com ondas irregulares possibilitaram uma análise do desempenho energético do dispositivo SSG desenvolvido, para as diferentes configurações estudadas.

Os resultados obtidos para os diversos estados de mar ensaiados permitem concluir que as combinações 40C3 e 50C3 são as mais vantajosas em relação à potência média total aproveitada, verificando-se uma ligeira diferença a favor da combinação 50C3.

Como a eficiência hidráulica é inversamente proporcional à largura de captura do dispositivo, os resultados obtidos para alturas de onda significativas baixas e períodos de pico curtos são surpreendentes porque a largura de captura nos casos com utilização de concentradores é, no mínimo, 2.1 vezes maior que no caso sem concentradores.

Por fim, foi realizada uma estimativa da produção energética anual para cada uma das combinações ensaiadas. Mais uma vez, através da estimativa da energia produzida conclui-se que as combinações 40C3 e 50C3 são as mais favoráveis e muito semelhantes entre si (200 MWh e 201 MWh respetivamente).

Quando comparadas com a situação 0C1 (105 MWh) pode-se afirmar que, tendo em conta o recurso presente na foz do rio Douro, os concentradores podem duplicar a produção energética anual do modelo desenvolvido.

Tendo por base os trabalhos experimentais realizados e os resultados apresentados anteriormente, apresentam-se de seguida recomendações para desenvolvimentos futuros do tema abordado:

- Ao longo dos ensaios, foi sempre considerado o nível médio da água do mar e a direção de incidência da agitação foi sempre perpendicular à estrutura. Seria importante avaliar o comportamento do dispositivo com concentradores para diferentes níveis de maré e para as direções de incidência que ocorrem na zona de estudo;
- Devem ser estudados mais ângulos de orientação dos concentradores, principalmente valores situados no intervalo  $40^\circ \sim 50^\circ$ ;
- De forma a facilitar o desenvolvimento da tecnologia, é essencial o desenvolvimento de um modelo numérico que simule o funcionamento do dispositivo SSG com os respetivos concentradores;
- A avaliação da questão estrutural, principalmente dos concentradores, não foi abordada e deve ser analisada recorrendo à modelação física e/ou à modelação numérica;
- O estudo dos custos das diferentes componentes deve ser realizado porque a viabilidade económica é sempre um dos fatores a ter em conta no desenvolvimento de um dispositivo para o aproveitamento de energia;
- O estudo técnico-económico de uma solução constituída por vários dispositivos construídos lado a lado (*i.e.*, uma construção modular).

#### Referências

- Barata da Rocha, A. (2014). *Observatório tecnológico para as "energias offshore" - Uma descrição do projeto OTEO*.
- Century, R. (2013). *Renewables Global Futures Report 2013*.

Falcão, A. F. O. (2010). *Wave energy utilization: A review of the technologies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:3, 899-918. ISSN: 1364-0321.

Margheritini, L.; Vicinanza, D. e Frigaard, P. (2009). *SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device*, *Renewable Energy*, 34, 1371-1380. ISSN: 0960-1481. doi: 10.1016/j.renene.2008.09.009.

Research & Innovation - Energy. (s.d.). Obtido em 14 de Fevereiro de 2014, de [http://ec.europa.eu/research/energy/eu/index\\_en.cfm?pg=research-ocean](http://ec.europa.eu/research/energy/eu/index_en.cfm?pg=research-ocean)

Vicinanza, D.; Margheritini, L., Kofoed J. P. e Buccino, M. (2012). *The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments*, *Energies*, 5, 193-226, ISSN: 1996-1073, doi: 10.3390/en5020193.