SIMULAÇÃO NUMÉRICA E OTIMIZAÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS POR GALGAMENTO Numerical simulation and optimization of an overtopping based wave energy converter

HENRIQUE RIOS (1), PAULO ROSA-SANTOS (2), FRANCISCO TAVEIRA-PINTO (3) e TIAGO MORAIS (4)

(1) Mestre em Engenharia Civil, FEUP, Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, henriquedanielrios@gmail.com (2) Professor Auxiliar Convidado, FEUP, Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, pjrsantos@fe.up.pt (3) Professor Catedrático, FEUP, Rua doDr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt (4)Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, INEGI, Rua do Dr. Roberto Frias, 400, 4200-465 Porto, tmorais@inegi.up.pt

Resumo

Ao longo dos anos, o interesse pela produção da energia elétrica através de fontes renováveis tem aumentado devido aos efeitos nocivos associados à utilização de fontes não renováveis. Com o intuito de aproveitar a energia das ondas marítimas associada ao galgamento de estruturas costeiras, foi idealizado um dispositivo designado Sea-wave Slot-cone Generator (SSG), que captura e armazena em reservatórios elevados a água do mar. Essa água, armazenada num nível superior ao do mar, apresenta energia potencial e, quando devolvida ao meio marítimo, passa por turbinas hidráulicas de baixa queda que convertem essa energia em eletricidade.

Neste trabalho, a geometria do dispositivo SSG foi inicialmente otimizada para as condições locais (condições de agitação e maré) de um caso de estudo situado na costa oeste portuguesa (foz do rio Douro, Porto), através de simulações realizadas com o software WOPSim v3.11. Este software permite simular estados de agitação e níveis de maré, e determinar a eficiência hidráulica do dispositivo, assim como estimar a energia elétrica produzida. O trabalho desenvolvido por Oliveira (2014) foi usado como ponto de partida, sendo, no entanto, proposta uma nova geometria para a estrutura, com melhor comportamento hidráulico.

A viabilidade de se recorrer ao modelo numérico IHFOAM 2.1 (modelo de mecânica dos fluidos computacional), desenvolvido pelo IH Cantábria, Espanha, para estudar a interação da agitação marítima com o dispositivo SSG foi posteriormente analisada. Para o efeito foram tidos como referência o modelo físico testado por Oliveira (2014) e os resultados experimentais obtidos. Estudos posteriores procurarão simular numericamente novas condições de teste, minimizando-se a necessidade de recorrer a novos testes experimentais.

Palavras-chave: Energia das ondas, galgamento, SSG, WOPSim, IHFOAM.

Abstract

Due to the negative impacts associated to the use of nonrenewable energy resources, the interest in the production of electric energy using renewable sources experienced a significant growth through the years. A device named Sea-wave Slot-cone Generator (SSG) was idealized in order to take advantage of the energy associated to the wave run-up and overtopping of coastal structures. This wave energy converter (WEC) captures and stores the water that overtops the structure in elevated reservoirs. The stored water has potential energy that, when returned to the maritime environment, is converted in electricity by special low-head turbines.

In this work, the geometry of a SSG device was optimized for the local conditions (wave climate and tidal range) of a case-study located in the Portuguese West coast, using the numerical model WOPSim v3.11. This software allows to simulate the selected sea states and sea water levels, and to determine the hydraulic efficiency of the device, as well as to estimate the electric energy produced. The starting point was the work carried out by Oliveira (2014) but using a new structure geometry and with a better overall hydraulic performance.

The feasibility of using a Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical code (IHFOAM 2.1, developed at IH Cantabria) to study the interaction between the incident waves and the SSG structure was also analyzed. For that purpose, the physical model and the tested conditions considered by Oliveira (2014) were used, as well as the obtained experimental results. Further studies will attempt to numerically analyze new test conditions, minimizing the need of additional physical model tests.

Keywords: Wave energy, overtopping, SSG, WOPSim, IHFOAM.

1. Introdução

Nas últimas décadas, o uso de energias renováveis tem aumentado significativamente. Esse facto advém das reservas de combustíveis fósseis serem cada vez mais escassas e, também, dos efeitos ambientais negativos associados ao seu uso, como o aquecimento global e a poluição ambiental. Um dos recursos energéticos mais limpos é a energia das ondas (Cruz, 2008). Gunn e Stock-Williams (2012) estimaram que o potencial teórico médio disponível, em todo o mundo, era de cerca de 2.11 ± 0.05 TW, ou seja, aproximadamente 18500 TWh/ano. Este valor é da mesma ordem de grandeza do consumo da energia elétrica em todo o mundo. Desta forma, justifica-se o atual esforco no desenvolvimento de tecnologias capazes de transformar a energia das ondas em eletricidade. Atualmente existe uma grande diversidade de conceitos de conversores da energia das ondas (por exemplo, Wave Energy Converters - WEC), os quais podem ser classificados consoante o modo de conversão e o local de instalação.

O Sea-wave Slot-cone Generator (SSG) é um dispositivo capaz de transformar a energia das ondas em eletricidade, e que funciona por galgamento. A estrutura do SSG é constituída por uma rampa frontal, onde as ondas incidentes se espraiam, e por um determinado número de reservatórios sobrepostos (acima do nível médio da água do mar), que recebem água por galgamento e a armazenam até ser, posteriormente, devolvida ao mar. Nesse percurso, a água é forçada a passar por uma turbina hidráulica de baixa queda, com vários níveis, convertendo-se assim a energia potencial acumulada nos reservatórios em energia elétrica. O SSG tem sido desenvolvido pela empresa WAVEnergy AS (Stavanger, Noruega), em conjunto com a Universidade de Aalborg, Dinamarca. Os primeiros estudos referentes ao desempenho hidráulico deste WEC foram realizados em 2005 (Kofoed, 2005a; Kofoed, 2005b). Posteriormente foram realizados outros trabalhos, para avaliar o comportamento do dispositivo para ondas multi-direcionais (Margheritini et al., 2008), e estudar o seu funcionamento em vários locais, nomeadamente em Kvitsøy, na Dinamarca, Swakopmund na Namíbia e Sines em Portugal (por exemplo, Margheritini et al., 2009). Também foram tidos em conta os problemas técnicos e os riscos económicos que envolvem a instalação do SSG em estruturas costeiras. Paralelamente, a Universidade Técnica de Munique, na Alemanha, desenvolveu um novo conceito de turbina de muito baixa queda, projetada para aumentar a eficiência da conversão da energia. De modo a validar os resultados dos estudos numéricos e experimentais anteriores, foi previsto um projeto-piloto a ser implementado em Kvitsøy, Noruega, que não chegou a ser construído. Desde esse período que se têm desenvolvido alguns trabalhos, de forma a proporcionar uma melhoria do aproveitamento da energia das ondas (Margheritini et al., 2009, Vicinanza et al., 2012, entre outros). Mais recentemente, Oliveira (2014) e Oliveira et al. (2016), trabalharam no desenvolvimento e no estudo experimental, em tanque de ondas, de concentradores da energia das ondas, de forma a capturar com o SSG uma maior frente da onda incidente e aumentar o volume de água recolhido por galgamento.

Esses estudos foram realizados para condições típicas da costa oeste portuguesa e mostraram, também, que a utilização de concentradores permite aumentar o volume de água que atinge os reservatórios superiores do SSG por galgamento. Com as modificações introduzidas foi possível duplicar a energia produzida anualmente, relativamente à tecnologia base.

Todavia, o trabalho deixou em aberto o estudo da eficiência do SSG para os diferentes níveis do mar (importante para os locais com uma grande amplitude de maré) e valores do ângulo de abertura dos concentradores, bem como o estudo numérico do dispositivo e um estudo económico incluindo rentabilidade, custos de instalação e manutenção e os riscos financeiros associados.

O presente trabalho tem por objetivo otimizar a geometria do dispositivo SSG para as condições de agitação e maré de um caso de estudo situado na costa oeste portuguesa, bem como analisar a viabilidade de utilizar o modelo numérico IHFOAM 2.1 para estudar a interação da agitação marítima com o dispositivo SSG, minimizando a necessidade futura de recorrer a estudos experimentais.

2. Recursos Marítimos

2.1. Energia marítima

Ao longo do último século, várias tecnologias têm vindo a ser estudadas e desenvolvidas para a conversão da energia dos oceanos em energia elétrica. Os recursos energéticos dos oceanos estão associados, sobretudo, às ondas, marés, correntes, gradiente de salinidade e gradiente térmico. A energia solar e a eólica, à semelhança do que acontece em terra, também podem ser convertidas em energia elétrica nos oceanos. Nestes casos, está-se a aproveitar a localização da superfície do oceano e não a energia dos oceanos em si. Adicionalmente, também se pode produzir biomassa para a obtenção de biodiesel através dos oceanos. A estimativa dos recursos energéticos dos oceanos é apresentada no Quadro 1 (adaptado de OTEO, 2014).

Quadro 1.	Estimativa	global	\mathbf{os}	recursos	energéticos	dos	oceanos		
(Taveira-Pinto et al., 2015).									

Forma de Energia dos Oceanos	Estimativa Global dos Recursos (TWh/ano)					
Ondas	32 000					
Amplitude e correntes de maré	22 000					
Correntes oceânicas	6 000					
Gradiente térmico	61 300					
Gradiente de salinidade	30 000					

2.2. Ambiente marítimo

O conhecimento das características do ambiente marítimo permite um melhor aproveitamento dos recursos existentes no oceano. Assim, para explorar o potencial da tecnologia SSG, é importante conhecer os parâmetros que definem a agitação marítima e as marés (níveis de água) no local de instalação do dispositivo.

2.2.1. Marés

A variação do nível médio da água do mar pode resultar do efeito das marés meteorológicas e das marés astronómicas. As primeiras resultam da variação da pressão atmosférica e da ação do vento (os ventos costeiros podem provocar uma acumulação de água na zona costeira e, consequentemente, o aumento do nível da água do mar). Geralmente, na costa Portuguesa, estas marés têm um efeito pouco relevante nas massas de água, quando comparado com o efeito das marés astronómicas, que resultam da ação combinada das forças de atração da Lua e do Sol sobre as massas de água do mar, em conjunto com o efeito da rotação da Terra (Kamphuis, 2010).

As marés podem ser do tipo semidiurnas, diurnas ou mistas. Na costa oeste Portuguesa, ocorrem marés semidiurnas, isto é, em cada dia ocorrem duas marés altas e duas marés baixas, com uma ligeira diferença entre ambos os níveis, superiores e inferiores. O período das marés semidiurnas é então de 12 horas e 25 minutos (metade de um dia lunar).

No local em estudo, a variação máxima do nível médio da água do mar, por efeito da maré, é de aproximadamente 4.0 m. No estudo realizado, foram consideradas as previsões de maré do Instituto Hidrográfico, para o ano de 2014. O número de ocorrências para cada intervalo de 0.50 m, entre 0.0 m e 4.0 m, foi determinado e tido em consideração no estudo.

2.2.2. Agitação marítima

As ondas resultam da interação do vento com a superfície do oceano, podendo as suas características ser descritas com base em diferentes teorias. A teoria de Airy é a teoria mais simples, permitindo, contudo, uma estimativa aproximada das características e parâmetros das ondas. No entanto, em algumas aplicações, é importante recorrer a teorias de onda de ordem superior. A Figura 1 apresenta as condições de aplicabilidade das várias teorias de onda (*H* representa a altura de onda, *T* o período de onda, *h* a profundidade de água, *g* a aceleração da gravidade e λ o comprimento de onda).



Figura 1. Limites de aplicação das várias teorias de onda (IHCantabria, 2014).

Quando as ondas, geradas ao largo, atingem a plataforma continental, começam a sentir a influência dos fundos e, por esse motivo, alteram as suas características, que são, então, variáveis de local para local.

Neste trabalho são usadas as condições de agitação obtidas por Henriques *et al.* (2013), para um local situado na foz do rio Douro, no qual a profundidade de água local é de cerca de 11.0 m, em relação ao nível médio da água do mar. Essas condições foram determinadas tendo por base registos ao largo, posteriormente transferidas para o local em estudo utilizando modelação numérica, e tendo em consideração os vários efeitos de transformação das ondas, desde águas profundas até ao local em estudo.

2.2.3. Fenómenos de transformação das ondas

Na sua propagação até à costa, o comportamento das ondas modifica-se quando estas chegam à plataforma continental, devido à influência dos fundos, motivada pela redução da profundidade de água. As ondas podem, então, ser afetadas por fenómenos como a refração, o empolamento, a reflexão e a rebentação. Adicionalmente, e no caso de existir algum obstáculo, estrutura ou mudança na linha da costa, também pode ocorrer difração, espraiamento e galgamento (Thorpe, 1999). Embora todos esses fenómenos sejam importantes para a compreensão do comportamento das ondas, os dois últimos têm maior importância para o caso em estudo neste trabalho. O espraiamento da onda depende, não só das características da onda, mas também das características da praia, ou da estrutura costeira em estudo, nomeadamente da inclinação, rugosidade e porosidade da superfície. Além disso, o tipo de rebentação depende também das características da onda e da superfície onde ocorre o espraiamento. Importa frisar que no caso de dispositivos que funcionam por galgamento se procura maximizar o espraiamento da onda e minimizar todas as perdas de energia que possam ocorrer, de forma a maximizar os volumes de galgamento.

A Figura 2 apresenta uma série de parâmetros usados para determinar a altura máxima de espraiamento $R_{u,2\%}$, definido como o valor em que é excedido apenas por 2% das ondas.



Figura 2. Parâmetros do espraiamento da onda (Pullen et al., 2007).

Ocorre galgamento quando a cota de espraiamento da onda é superior à cota do coroamento da estrutura, ou seja, se $R_{u,2\%} > R_c$. A altura de espraiamento relativo $(R_{u,2\%}/H_{m0})$, por exemplo, a altura do espraiamento que é excedida apenas por 2% das ondas, por altura de onda significativa (espectral), pode ser calculada recorrendo à Equação 1. No entanto, o valor máximo do espraiamento é dado pela Equação 2.

$$\frac{R_{u,2\%}}{H_{m0}} = c_1 \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \xi_{m-1,0}$$
^[1]

$$\frac{R_{u,2\%}}{H_{m0}} = \gamma_f \gamma_\beta \left(c_2 - \frac{c_3}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}} \right)$$
[2]

De modo a obter resultados aproximados à realidade, são usados os coeficientes empíricos c_1 , $c_2 \in c_3$, os fatores γ_b , γ_f e γ_β , que permitem ter em conta a existência da berma, a rugosidade do talude e o ângulo de ataque das ondas em relação à estrutura, respetivamente, bem como o parâmetro de rebentação $\xi_{m-1,0}$ (Pullen *et al.*, 2007), definido através da seguinte equação,

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_{m0}}{L_0}}}$$
[3]

em α que representa o ângulo do talude com a horizontal e L_0 o comprimento de onda em águas profundas. O tipo de rebentação da onda pode ser definido em função valor de $\xi_{m-1,0}$, Figura 3.



Figura 3. Tipos de rebentação num talude (Pullen et al., 2007).

3. Conversores de Energia das Ondas

3.1. Introdução

Uma vez que o trabalho se centra num conversor de energia das ondas, é importante apresentar um breve resumo das tecnologias disponíveis. Atualmente existem mais de 100 conceitos em estudo, nas diversas fases de desenvolvimento (Falcão, 2010). Devido a essa diversidade, os WEC podem ser classificados tendo por base a sua localização em relação à costa, o modo de operação, a orientação relativamente à direção das ondas e a sua dimensão comparativamente ao comprimento de onda.

3.2. Classificação

Os WEC podem ser construídos na zona costeira, próximos ou afastados da costa. Os dispositivos costeiros podem ser instalados em águas pouco profundas (menos de 10 m) ou integrados em quebramares ou falésias.

Os dispositivos que são instalados próximos da costa (10 a 40 m profundidade) são normalmente fixos ao fundo do mar, evitando-se o uso de amarrações se as condições locais assim o permitirem.

Em águas profundas (mais de 40 m) e locais afastadas da costa, os WEC são do tipo flutuante ou submersos, estando amarrados ao fundo do oceano.

Quanto mais perto da costa, mais acessíveis são os WEC e mais fácil é o transporte da energia para terra, porém, regra geral, o recurso é mais elevado em águas profundas e em locais afastados da costa (OTEO, 2012; Ruiz, 2010).

A classificação dos WEC quanto à orientação e dimensões relativamente às ondas compreende as seguintes categorias: absorvedor pontual, atenuador e terminador. Os primeiros são dispositivos com um diâmetro pequeno (em relação ao comprimento de onda) e normalmente axi-simétricos. A sua forma permite absorver a energia das ondas das várias direções. Os atenuadores apresentam uma estrutura longa (comparando com o comprimento de onda) e são aplicados na mesma direção das ondas. Os terminadores são também longos, porém são instalados perpendicularmente às ondas (OTEO, 2012).

A classificação dos WEC pode também ser feita com base no seu modo de funcionamento. Em termos gerais podem definir-se os seguintes princípios de funcionamento: coluna de água oscilante, corpo oscilante e galgamento. Na última classe, e como o próprio nome indica, a água do mar passa por cima da estrutura, entrando em reservatórios acima do nível médio da água do mar, como foi referido atrás. A devolução da água ao mar é feita através de turbinas de baixa queda. O Sea-wave Slot-cone Generator, o Sea Power, o Tapchan, o Wave Dragon, o Wave Plane e o WaveCat são exemplo de dispositivos que funcionam por galgamento.

4. Sea-Wave Slot-Cone Generator

O Sea-wave Slot-cone Generator (SSG) é um conversor da energia das ondas projetado para potenciar o fenómeno do galgamento, que pode ser instalado tanto em quebramares e falésias, como offshore, onde o recurso é normalmente mais elevado (Margheritini *et al.*, 2009).

Quando as ondas chegam à rampa frontal da estrutura SSG sofrem espraiamento, que poderá culminar com a entrada de água do mar nos reservatórios, por galgamento, através das várias aberturas existentes a cotas determinadas. Esses reservatórios armazenam a água a uma cota superior à do nível médio do mar, e consequentemente energia (energia potencial dessa água). Posteriormente, a água é devolvida ao mar, passando por uma conduta onde está instalada uma turbina de baixa queda de vários patamares, produzindo-se energia. De modo a prevenir pressões negativas dentro dos reservatórios, existem aberturas de ventilação.

A instalação do SSG em quebramares, ou outras estruturas costeiras/portuárias, apresenta vantagens. Por um lado, o funcionamento do dispositivo melhora o comportamento da estrutura à reflexão. Por outro lado, economicamente, esse tipo de instalação, permite uma partilha dos custos de construção entre o dispositivo e a estrutura costeira.

O SSG apresenta uma estrutura robusta, e um processo de conversão da energia das ondas em eletricidade composto por quatro etapas fundamentais, onde ocorre dissipação de parte da energia capturada.

Na primeira etapa, as ondas capturadas espraiam-se sobre a rampa da estrutura SSG até alcançarem a entrada dos reservatórios. Posteriormente, a energia potencial adquirida pela água diminui devido à pequena queda entre a cota de entrada no reservatório e o nível da superfície livre da água dentro dele.

Na etapa seguinte, o escoamento da água faz girar as pás da turbina, transformando-se a energia hidráulica em energia mecânica. Por fim, essa energia mecânica é transferida para o gerador que assim produz energia elétrica (Vicinanza *et al.*, 2012).

Desde 2003 que existe a ideia de construir um WEC onshore baseado no galgamento, mas só em 2004 é que a Universidade de Aalborg, Dinamarca, começou os estudos numéricos e físicos, com ondas regulares e irregulares, a 2D e a 3D (Bakke, 2008).

Entretanto foram também realizados vários trabalhos com o intuito de melhorar o rendimento do SSG para vários locais de instalação, através da alteração da sua geometria e do desenvolvimento de turbinas especiais - MST (Multi-Stage Turbine). Recentemente, Oliveira (2014) idealizou e testou experimentalmente um modelo físico do SSG no tanque de ondas da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP com as condições de agitação típicas da costa portuguesa. Este trabalho também permitiu testar a eficácia de usar concentradores da energia das ondas no SSG de modo a aumentar a sua eficiência.

O processo de otimização do dispositivo SSG para um dado local de instalação terá de ter em atenção inúmeros fatores que condicionam a sua eficiência e a quantidade de energia produzida, as quais estão diretamente relacionadas com o comportamento hidráulico da estrutura, isto é, a inclinação da rampa frontal, o número de reservatórios utilizados, as cotas de entrada para esses reservatórios, a dimensão dos reservatórios, as características das turbinas e a estratégia de controlo do seu funcionamento, entre outros.

Em princípio, quanto maior é o número de reservatórios do dispositivo, maior é a quantidade de energia potencial que é possível aproveitar. Porém, é importante ter em atenção as condições de agitação locais, por exemplo, as alturas, os períodos e as direções das ondas, assim como a amplitude das marés. Locais de instalação com grande variação da altura de onda e do nível médio da água do mar (por exemplo, maré), requerem a existência de vários reservatórios, alguns dos quais poderão ficar, durante algum tempo, submersos e sem capacidade de armazenar a água do mar.

A cota de entrada para o reservatório inferior é também um parâmetro importante. Dependendo da altura das ondas, a entrada pode localizar-se num nível superior ou inferior, permitindo a captação de um menor ou maior volume de água, respetivamente. Contudo, uma cota mais baixa da entrada dos reservatórios significa menor energia potencial.

Outra característica importante é a distância vertical entre as entradas nos reservatórios. Entradas mais distantes entre si permitem aumentar o volume de água nos reservatórios de menor nível, no entanto, tal faz com que os reservatórios superiores capturam menos água. No limite, se a distância entre as entradas for exageradamente grande, o dispositivo tende a comportar-se como uma estrutura de um único reservatório (Vicinanza *et al.,* 2012).

A dimensão dos reservatórios afeta, também, diretamente a produção de energia elétrica. Um reservatório profundo, em planta, permite acumular mais água (ou mais energia potencial), e o número de ciclos "start/stop" das turbinas é menor, uma vez que o reservatório demora mais tempo a esvaziar. Em contrapartida a área de implantação requerida é maior.

A inclinação da rampa frontal também influi no rendimento do SSG. Vicinanza *et al.* (2012) testou três inclinações, para vários estados de mar, tendo em vista o melhoramento da eficiência do SSG e encontrar condições para as quais não ocorresse rebentação da onda sobre a rampa, minimizando as perdas de energia.

Uma combinação ponderada de todos os fatores referidos permite um aumento da eficiência hidráulica.

5. Modelação Numérica

Neste trabalho foram utilizados dois modelos numéricos: um para otimizar a geometria do SSG para as condições do local de instalação (WOPSim v3.11) e outro para simular a complexa interação entre as ondas e a estrutura do SSG (IH FOAM 2.0).

5.1. Modelo WOPSim v3.11

O WOPSim v3.11 (Wave Overtopping Power Simulation) foi desenvolvido na Universidade de Aalborg, na Dinamarca, e permite otimizar a geometria de WEC que funcionam por galgamento, tal como o SSG ou o Wave Dragon (Borgarino *et al.*, 2007), bem como o modo de operação das suas turbinas. Este programa permite obter os volumes de água que, por galgamento, atingem os reservatórios do dispositivo, assim como a energia produzida pelas turbinas.

O WOPSim está configurado para simular dispositivos do tipo SSG com N*res* reservatórios, com uma turbina (independente) associada a cada um desses reservatórios, pois possibilita inserir vários parâmetros que caracterizam a geometria do dispositivo, os estados de mar e as regras de operação das turbinas.

Os parâmetros geométricos que definem cada reservatório são:

- Nível de entrada R_c ;
- Distância vertical da crista do reservatório ao nível da água no reservatório – *f*;
- Queda bruta de cada reservatório *h*;
- Calado/Profundidade da rampa d_r ;
- Comprimento do reservatório *L*;
- Largura do reservatório *W*.

O nível de entrada é a distância vertical entre o nível médio da água do mar e o ponto mais alto da rampa, imediatamente antes da entrada para o reservatório. A queda bruta corresponde à distância entre o nível da água dentro do reservatório e o nível médio da água do mar. A profundidade da rampa/calado está relacionada com a distância entre o nível médio da água do mar e o início da rampa frontal do dispositivo. Os estados de mar são definidos com base no:

- Período de pico da onda T_p;
- Altura de onda significativa *H_s*;
- Probabilidade de ocorrência;
- Número de ondas a gerar;
- Nível médio da água do mar MWL.

A Figura 4 apresenta um print screen do WOPSim, com os conjuntos de parâmetros necessários à simulação, tais como:

- Condições a considerar e cálculo;
- Dimensão dos reservatórios;
- Características das turbinas;

Input parameters

• Características dos estados do mar.

O caudal médio de galgamento por metro de crista de onda, e para a altura de onda significativa H_s , pode ser estimado através de (Kofoed, 2005b),

$$Q = \frac{q}{\lambda_{\alpha}\lambda_{dr}\lambda_{s}\sqrt{gH_{s}^{3}}} = Ae^{c\frac{K_{c}}{H_{s}}\frac{1}{\gamma_{r}\gamma_{b}\gamma_{h}\gamma_{\beta}}}$$
[4]

Kofoed (2002) definiu, empiricamente, as constantes A = 0.2e C = -2.1, para o caso em que não ocorre rebentação da onda na rampa frontal do dispositivo. R_c representa o bordo livre da estrutura. Os coeficientes γ expressam a influência dos fundos, da existência de berma, da rugosidade e do ângulo de ataque das ondas, sendo para o efeito usados os índices r, b, $h \in \beta$, respetivamente. Os parâmetros λ , por sua vez, expressam a influência da inclinação da rampa frontal do dispositivo SSG, da energia refletida e o coeficiente de comparação entre os resultados de Kofoed (2002) e de Van der Meer e Janson (1995), sendo para o efeito usados os índices α , dr e s, respetivamente. Os cálculos do WOPSim têm ainda por base a seguinte equação da continuidade,

$$Q_{in} + Q_{upper,over} = Q_{over} + Q_{tur} + Q_{res}$$
^[5]

em que Q_{in} representa o caudal de galgamento associado ao reservatório *j*, $Q_{upper,over}$ o caudal que é proveniente do reservatório superior *j*+1 caso o mesmo esteja cheio, Q_{over} o caudal que galga o reservatório *j* caso esteja cheio, Q_{tur} o caudal turbinado e Q_{res} o caudal que permanece no reservatório.

Os sucessivos caudais de galgamento são calculados tendo por base o método probabilístico proposto por Franco *et al.* (1995) e Van der Meer e Janson (1995).

De forma a permitir a consideração de vários reservatórios, a Equação 4 foi melhorada tendo por base resultados de novos testes experimentais.

Assim, para um dipositivo SSG constituído por três (ou mais) reservatórios, Kofoed (2005a), Borgarino *et al.* (2007) e Vicinanza *et al.* (2012) recomendam a aplicação da Equação 6, para estimar o caudal médio de galgamento no reservatório n,

$$q_n(z_1, z_2) = \sqrt{gH_s^3} \frac{A}{B} e^{c\frac{R_{c,1}}{H_s}} \left(e^{B\frac{Z_2}{H_s}} - e^{B\frac{Z_1}{H_s}} \right)$$
[6]

em que z_1 e z_2 representam as duas cotas que limitam o reservatório *n* inferior e superiormente, respetivamente, *i.e.*, $z_1 = R_{c,n}$ e $z_2 = R_{c,n+1}$.

Sugere-se que se considere A=0.197, B=-1.753 e C=-0.408. Teoricamente, para o reservatório mais elevado, a fronteira considerada é infinita, no entanto, o *software* considera o dobro da distância para o reservatório anterior, por exemplo, $z_2 = 2z_1$.

0								-				
Conditions		×		C C	>			+				
Computational settings		Beservoir 1			Becervoir 2			Beservoir 3				
Key	Value											
No of model waves	Sea State w. 🗸		Parameter	Value	Parame	Parameter Value			Parameter		Value	
Total number of waves	350000		Crest level [m] 1.500		Lifest le	Crest level [m] 3.000			Crest level [m]		5.000	
Timesteps per wave period	10		Reservoir length [m]	servoir length [m] 10.000 Reservoir length [m] 10.000		10.000		Reservoir length [m]		10.000		
Water flow model	General multi-lev		Reservoir width [m] 15.000		Reserv	Reservoir width [m] 13.000			Reservoir width [m] 10.000			
Overflow to next reservoir	False		Initial freespace [m] 0.600		Initial fr	Initial freespace [m] 0.900		Initial freespace [m] 1.200				
Compute plot values	True			uktura in 🛛 🔪	i i		ution of States	,			de la companya de la	
Use average head	True		+ V- IL	IrbinesV		• • •	urbinesV		+	v Tu	rbinesv	
Random seed value (0=No seed	10		<u>n</u>		<u>н</u>				<u> </u>			
Overtop distribution	Even		Parameter	Value 🔺	Param	neter	Value	^	Parameter		Value	
Overton spreading (1 - 100%)	100	~	Turbine on lower limit [m]	0.100	Turbir	ne on lower limit [m]	0.150		Turbine on lo	wer limit [m]	0.200	
Advanced settings	Advanced settings		Turbine on upper limit [m] 0.100			Turbine on upper limit [m] 0.150			Turbine on upper limit [m] 0.200			
Key	Value	^	Turbine on Hs gain	0.000	Turbin	ne on Hs gain	0.000		Turbine on H	ls gain	0.000	
Overtopp. para. A	0.197		Turbine on Hs offset	0.000	Turbir	ne on Hs offset	0.000		Turbine on H	ls offset	0.000	
Overtopp. para. B	-1.753		Turbine Off lower limit [m]	0.600	Turbin	e Off lower limit [m]	0.900		Turbine Off I	ower limit [m]	1.200	
Overtopp. para. C	-0.408		Turbine Off upper limit [m]	0.600	Turbin	Turbine Off upper limit [m] 0.900			Turbine Off upper limit [m] 1.200			
Geometric correction coefficient 1.00			T			T			T. 464 - 0611 0.000			
Waves angle of incidence	0		£ 0.0 1.0 F-11			E ^{0.0} 1.0			<u>E</u> ^{0.0} 1.			
Slone angle 30			8 0.5 + E 0.5 +			8 0.5			@ 10			
ow model: General multi-lev Ove	ថ្លៃ 1.0	Ö	ର 1.0 ଜୁନ	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	G		8 1.5					
							•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••					
E 0.50 0.05	5	- On ⁰ -1Off ² 3 4 5 6 0			- On ⁰ -1Off ² 3 4 5 6 0			$-0n^0$ $-10ff^2$ $3 4 5 6$				
Res1 Res2 Res3 6 0 2 4 6 8 10 Timesten			Turbine characteristic			Turbine characteristic			Turbine characteristic			
		Head [m] Q [M^3/s]	Efficiency [%]	Head	[m] Q [M^3/s]	Efficiency [%]	^	Head [m]	Q [M^3/s]	Efficiency [%]		
	www.lewalo		0.500 3.342	60.400	1.500	1.796	81.800		3.000	0.924	85.700	
HS ID Prob.	waves SWLU		0.625 3.491	75.600	1 688	1.842	85 300		3.250	0.941	87 300	
0.500 5.000 0.13500	5000 3.000					1.012			0.200	0.011	01.000	
1.000 6.100 0.30300	5000 3.000		0.750 3.625	83 200	1 875	1 885	87 500	-	3 500	10.957	88 400	
1 700 7 900 0 26500	5000 3.000		— Q [m^3/s] — Eff. [%]			— Q [m^3/s] — Eff. [%]			🐷 — Q [m^3/s] — Eff. [%]			
1.100 1.300 0.20300	3.000		80 20 5 20 5 20 5 20 5 20 5 20 5 20 5 20						1			
2.400 9.300 0.16400								4 4.5				
<	>		<								>	

Figura 4. Print screen do software WOPSim.

Aquando da otimização da geometria do SSG é necessário calcular e comparar os resultados da eficiência hidráulica do dispositivo e da eficiência dos reservatórios. A eficiência hidráulica é dada pelo quociente entre a potência que galga a crista dos reservatórios P_{in} e a potência da onda para uma frente de onda com a largura do dispositivo P_{wave} ,

$$\eta_{in} = \frac{P_{in}}{P_{wave}}$$
[7]

A potência de onda que galga a crista dos reservatórios é dada por,

$$P_{in} = \sum_{j=1}^{N_{res}} Q_{in,j} R_j \rho g$$
[8]

em que $Q_{in,j}$ representa o caudal médio de galgamento do reservatório *j*, R_j a cota da crista do reservatório *j* (em relação ao nível médio do mar) e ρ a massa volúmica da água do mar. Por sua vez, a eficiência dos reservatórios do dispositivo é dada pelo quociente entre a potência da onda armazenada nos reservatórios e a potência da onda incidente, para uma frente de onda com a largura do dispositivo,

$$\eta_{res} = \frac{P_{res}}{P_{wave}}$$
[9]

A potência de onda armazenada nos reservatórios é dada por,

$$P_{res} = \sum_{j=1}^{N_{res}} (Q_{in,j} - Q_{over,j}) \overline{h_j} \rho g$$
^[10]

em que \bar{h}_j representa a queda média, em relação ao nível médio do mar, relativa ao reservatório *j*.

Como forma de verificar a adequação da equação proposta por Kofoed (2005a) às condições estudadas em laboratório por Oliveira (2014), os valores obtidos no modelo físico e os resultados obtidos a partir dessa equação são comparados na Figura 5.



Figura 5. Comparação dos resultados obtidos no modelo físico de Oliveira (2014) e Kofoed (2005a).

5.2. IHFOAM

O IHFOAM 2.1.1 é um modelo numérico desenvolvido na Universidade de Cantábria, em Espanha, baseado no solver "interFoam" (um dos solvers do OpenFOAM®), e que inclui condições-fronteira próprias para a geração de ondas e a absorção ativa de reflexões. O interFoam é utilizado para resolver as equações Reynolds Average Navior-Stokes (RANS) 3D para duas fases incompressíveis, usando uma discretização de volumes finitos e o método do volume de fluido (VOF).

O OpenFOAM® (Open Field Operation and Manipulation) é uma ferramenta open source de CDF - Computation Fluid Dynamics, em linguagem C++, que permite resolver vários tipos de problemas complexos no domínio da hidráulica (incluindo turbulência e separação do escoamento), através da geração de malhas, da configuração dos parâmetros da simulação, resolução das equações RANS e amostragem de resultados. Uma das vantagens do código OpenFOAM® é a possibilidade de usar outros programas, tal como o Kitware ParaView, para o pós-processamento. Outra vantagem é o facto de o código estar estruturado para permitir a inclusão de novos solvers (e.g. IHFOAM), a implementação de novas condições de fronteira e de novas aplicações (Higuera et al., 2013). A metodologia de trabalho habitual começa por considerar um caso similar ao pretendido, o qual é posteriormente adaptado às novas condições de estudo.

A informação para cada caso divide-se em três partes: uma que caracteriza as condições iniciais (e.g., as condiçõesfronteira, velocidade, turbulência), outra relativa aos valores das constantes que é necessário considerar, à malha e à geração de ondas (por exemplo, aceleração da gravidade, características da malha, condições de agitação) e uma última que controla a simulação (por exemplo, o tempo de simulação, passo de cálculo, a decomposição da malha). Uma vez definidas as características da malha, as fronteiras e a geometria do SSG, é necessário criar a malha e refiná-la, assim como configurar o modelo de resolução "ihFoam".

A teoria de ondas a considerar nas simulações é definida tendo por base as suas condições de aplicabilidade (Figura 1). O uso de absorção ativa de reflexões é essencial, tanto nos modelos físicos como nos numéricos, especialmente quando a fronteira de geração se encontra próxima do modelo propriamente dito. Se a reflexão não fosse tida em conta, os resultados seriam distorcidos da realidade.

6. Caso de Estudo

A primeira fase do trabalho consistiu na otimização de um dispositivo SSG para uma instalação num quebramar próximo da foz do rio Douro, Porto, Portugal. Para o efeito, simularam-se vários estados de mar tendo por base o clima de agitação definido por Henriques *et al.* (2013) para o local, assim como as previsões da variação da maré do Instituto Hidrográfico.

A geometria inicial do dispositivo SSG foi a estudada por Oliveira (2014), constituída por três reservatórios, com as seguintes cotas de entrada em relação ao nível médio da água do mar: $R_{C1} = 1.5 m$, $R_{C2} = 3 m$ e $R_{C3} = 5 m$.

Os reservatórios tinham 10 m de largura e um comprimento de 24.8 m, 21.0 m e 17.4 m, respetivamente, do reservatório inferior, intermédio e superior. O ângulo da rampa era de 35° e os reservatórios distanciavam-se horizontalmente de 1.2 m. Com base nestes dados, os vários estados de mar foram simulados no software WOPSim, tendo-se obtido a eficiência hidráulica do dispositivo para a geometria inicial. Posteriormente, foram fixados todos os parâmetros que definem o dispositivo SSG exceto um, para que a variação da eficiência seja apenas função desse mesmo parâmetro. Por exemplo, simularam-se os estados de mar com a geometria inicial, mas alterou-se o valor do ângulo da rampa para se poder determinar para que valor a eficiência hidráulica do dispositivo era máxima. Este processo foi repetido para os vários parâmetros, como por exemplo, número de reservatórios, cota de coroamento dos reservatórios, direção do dispositivo e dimensões dos reservatórios.

As condições no local de instalação eram caracterizadas, em grande parte do ano, por ondas de pequena altura, logo foi necessário instalar reservatórios a cotas baixas. No entanto, a amplitude da maré é grande, logo também é importante a instalação de reservatórios a cotas superiores.

O número total de reservatórios foi fixado em 5, Figura 6, os quais apresentam as seguintes cotas de entrada: $R_{C1} = 1.0m$, $R_{C2} = 1.5 m$, $R_{C3} = 2 m$, $R_{C4} = 3 m e R_{C5} = 4 m$. Com o intuito de as ondas atingirem o dispositivo com um ângulo nulo (por exemplo, de frente), o dispositivo SSG deve ser instalado com a direção de 270° N.



Figura 6. Perfil da geometria otimizada do SSG.

O ângulo da rampa que apresentou uma melhor eficiência hidráulica foi o de 30°, permitindo um maior espraiamento da onda e, previsivelmente, a não ocorrência de rebentação.

As dimensões dos reservatórios que representam o melhor compromisso entre o volume de água que entra, aquele que é armazenado e turbinado, são de 20 m de comprimento e 15 m de largura (comprimento e largura uniformes, Figura 6). A altura de onda de 3.0 m foi aquela que resultou em eficiências mais elevadas.

Para condições idênticas (estados de mar e amplitudes de maré), a estrutura SSG otimizada resultou numa produção anual de energia elétrica de 22.2 MWh/ano sendo a da estrutura inicial de 10.1 MWh/ano.

A segunda fase do trabalho consistiu no estudo da interação das ondas com a estrutura do SSG, utilizando um modelo de mecânica dos fluídos computacional (CFD) – IHFOAM. Foram simuladas as mesmas condições de teste do trabalho realizado por Oliveira (2014), que foi também utilizado para a validação qualitativa dos resultados numéricos.

Inicialmente foi definida uma malha 2D (largura de 0.02 m, que corresponde a uma única célula) tendo como referência a fronteira de geração de ondas e, na face oposta, a fronteira de absorção/reflexão das ondas. O bloco da malha ("block mesh") criada apresentava 100 m de comprimento (50 m para a propagação das ondas e 50 m para a reprodução do perfil do SSG), e, na vertical, as cotas variaram entre -17.0 m e +15.0 m (Figura 7).



Figura 7. Exemplo de uma simulação IHFOAM aos $0.00~{\rm s}$ (início da simulação).

Uma vez estabelecido o bloco base, foi necessário refinar a malha localmente, de forma a reproduzir os detalhes na zona da entrada dos reservatórios, pois esse é o local de maior interesse do estudo. Neste estudo foram utilizadas, apenas, ondas regulares, que foram simuladas com base na teoria de Stokes de 2^a ordem. Após a simulação, usando o software ParaView, é possível visualizar o comportamento das ondas na sua interação com a estrutura do SSG, assim como os locais onde ocorre mais turbulência e as zonas onde a velocidade da água é mais elevada.

Devido à sofisticação do modelo numérico em questão e às dificuldades inerentes à primeira aplicação do modelo, bem como à complexidade associada à reprodução da geometria do SSG e ao elevado esforço computacionais requerido pelo modelo IHFOAM (várias horas de cálculo numérico para simular apenas alguns segundos do modelo físico), tornou-se impraticável a realização da validação quantitativa dos resultados numéricos. Contudo, foram realizadas algumas simulações com sucesso, que mostraram as potencialidades dessa ferramenta numérica e constituem o ponto de partida para estudos posteriores. Assim, no futuro, para além da validação quantitativa do modelo com base no trabalho de Oliveira (2014), sugere-se a realização de mais simulações, com novas geometrias e novas condições de agitação, como por exemplo, a geometria otimizada que foi proposta para as condições locais existentes na foz do rio Douro, podendo, ainda, ser incluído o uso de concentradores da energia das ondas, de modo a aumentar a eficiência hidráulica do SSG, tal como proposto por Oliveira (2014).

7. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho foi desenvolvido com dois objetivos distintos: o primeiro foi otimizar a geometria de um dispositivo SSG, que aproveita a energia das ondas do mar por galgamento, para produzir energia elétrica, para ser instalado na foz do rio Douro, Porto, Portugal; o segundo objetivo consistia na simulação da interação das ondas com um dispositivo SSG, através da aplicação de um modelo numérico de mecânica dos fluídos computacionais (CFD), utilizando como base o modelo físico do trabalho estudado por Oliveira (2014) na FEUP e os resultados então obtidos.

O trabalho de otimização do SSG revelou que a geometriabase do dispositivo teria de ser alterada, pois as condições locais (agitação marítima e maré) na costa oeste portuguesa são diferentes das que existem noutros locais, por exemplo, na Dinamarca ou na Noruega.

A geometria resultante do estudo de otimização é constituída por uma rampa frontal de espraiamento, com um ângulo de 30°, e 5 reservatórios com as seguintes cotas de entrada, relativamente ao nível médio do mar: R_{c1} =1.0 m, R_{c2} =1.5 m, R_{c3} =2 m, R_{c4} =3 m e R_{c5} =4 m. Para esta nova geometria, a eficiência hidráulica global e a eficiência ao galgamento foram de 69.9% e 49.6%, respetivamente. A produção de energia anual foi estimada em 22.23 MWh/ano, que corresponde a 1.47MWh/ano por metro de extensão do SSG. Estes valores são superiores a 10.1 MWh/ano e a 1.0 MWh/ano por metro de extensão do dispositivo, estimados para a geometria inicial.

Em trabalhos posteriores, sugere-se o estudo da geometria do SSG para outros locais da costa portuguesa. Ainda para o local em estudo neste trabalho, a geometria apresentada poderá ser melhorada se forem realizados estudos mais detalhados.

As características de desempenho das turbinas hidráulicas não foram incluídas no estudo de otimização que foi realizado neste trabalho, estando também sujeitas a melhorias. O mesmo é válido para as regras e estratégias de controlo da operação dessas turbomáquinas hidráulicas.

A segunda parte do trabalho visou a simulação da interação das ondas com a estrutura do dispositivo SSG, utilizando o modelo IHFOAM. As simulações realizadas demonstraram as potencialidades dessa ferramenta numérica e permitiram compreender melhor a forma como ocorre a interação das ondas com o dispositivo SSG, quais são as zonas com maior turbulência, entre outros. Estes resultados são também um ponto de partida para estudos posteriores, que procurarão simular numericamente novas condições de teste, e com maior detalhe, minimizando-se a necessidade de recorrer a novos testes experimentais.

Referências

- Bakke, M. (2008). WAVESSG, Full-scale demonstration of robust and high-efficiency wave energy converter. Wave Energy AS.
- Bogarino, B.; Kofoed, J. P.; Meinert, P. (2007). Development of a generic power simulation tool for overtopping based WEC. Department of Civil Engineering, Aalborg University.
- Cruz, J. (2008). Ocean wave energy: current status and future prespectives. Springer Science & Business Media, 2008. 3540748954
- Falcão, A. F. de O. (2010). *Wave energy utilization: A review of the technologies*. Renewable and sustainable energy reviews. Vol. 14. n.º 3. p. 899-918. 1364-0321
- Franco, L., de Gerloni, M., and van der Meer, J. (1994). Wave overtopping on vertical and composite breakwaters.
 Proc. of the 24th International Conference on Coastal Engineering. October 23-28, 1994, Kobe, Japan, Ch.75, pp.1030-1045, published ASCE, New York.

- Gunn, K.; Stock-Williams, C. (2012). Quantifying the global wave power resource. Renewable Energy. Vol. 44. p. 296-304. 0960-1481
- Henriques, J.; Cândido, J.; Pontes, M.; Falcão, A. (2013). Wave energy resource assessment for a breakwater-integrated oscillating water column plant at Porto, Portugal. Energy. Vol. 63. p. 52-60. 0360-5442.
- Higuera, P.; Lara, J.; Losada, I. (2013). Realistic wave generation and active wave absorption for Navier–Stokes models: Application to OpenFOAM®. Coastal Engineering. Vol. 71. p. 102-118. 0378-3839.
- IHCantabria. (2014). IHFOAM Manual. Cantabria, Spain: Institute of Environmental Hydraulic of University of Cantabria.
- Kamphuis, J. W. (2010). Introduction to Coastal Engineering and Management. Canada: Queen's University. ISBN: 978-981-283-484-3
- Kofoed, J. P. (2002). Wave Overtopping of Marine Structures: utilization of wave energy. Aalborg Universitet, Det Teknisk-Naturvidenskabelige, Faculty of Engineering and Science, Institut for Vand, Jord og Miljøteknik, Department of Civil Engineering.
- Kofoed, J. P. (2005a). Experimental hydraulic optimization of the wave energy converter seawave Slot-Cone generator. Hydraulics and Coastal Engineering No. 26, Department of Civil Engineering, Aalborg University, June 2005, ISSN: 1603-9874
- Kofoed, J. P. (2005b). Model testing of the wave energy converter Seawave Slot-Cone Generator. Hydraulics and Coastal Engineering No. 18Department of Civil Engineering, Aalborg University, April, 2005. ISSN: 1603-9874
- Margheritini, L.; Vicinanza, D.; Frigaard, P. (2008). Sea Slot Cone Generator overtopping performance in 3D conditions. Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference Vancouver, BC, Canada, July 6-11, pp.382-387.
- Margheritini, L.; Vicinanza, D.; Frigaard, P. (2009). SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. Renewable Energy. Vol. 34. n.º5. p. 1371-1380. 0960-1481.
- Oliveira, P. (2014). Aproveitamento da Energia do Mar através do Espraiamento de Estruturas Costeiras Portuárias. Porto, Portugal: Faculty of Engineering of University of Porto.
- Oliveira, P., Taveira-Pinto, F., Morais, T., Rosa-Santos, P. (2016). Experimental evaluation of the effect of wave focusing walls on the performance of the Sea-wave Slot-cone Generator, Energy Conversion and Management (Elsevier), Vol.110, pp. 165-175, ISSN: 0196-8904, doi: 10.1016/j.enconman.2015.11.071.
- OTEO. (2012). Estado da Arte Relatório. Observatório Tecnológico para as Energias Offshore, 2012.
- OTEO. (2014). Relatório das Tecnologias de Aproveitamento elaborado pelo Observatório Tecnológico para as energias Offshore. Porto, Portugal: Observatório Tecnológico das Energias Offshore.

- Pullen, T., Allsop, N., Bruce, T., Kortenhaus, A., Sch, H., Van der Meer, J. (2007). *Wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual.*
- Ruiz, M. T. (2010). *Dynamics and Hydrodynamics for Floating Wave Energy Converters*. Lisbon, Portugal: Technical University of Lisbon.
- 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 (AIP Publishing LLC), 7, 061601, ISSN: 1941-7012, doi:10.1063/1.4939086
- Thorpe, T. (1999). A brief review of wave energy: A report produced for The UK Department of Trade and Industry. ETSU-R120, May.
- Van der Meer, J.W. and Janssen, J. (1995). *Wave run-up and wave overtopping at dikes*. Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures. ASCE. Ed. N. Kobayashi and Z. Demirbilek. Ch. 1, p. 1-27
- Vicinanza, D.; Margheritini, L.; Kofoed, J. P.; Buccino, M. (2012). The SSG wave energy converter: Performance, status and recent developments. Energies. Vol. 5. n.º 2. p. 193-226.