

MODELAGEM COMPUTACIONAL DO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM CONVERSOR TIPO PLACA HORIZONTAL SUBMERSA EM ESCALA REAL

COMPUTATIONAL MODELING OF THE OPERATIONAL PRINCIPLE OF A SUBMERGED HORIZONTAL PLATE TYPE CONVERTER IN REAL SCALE

Vinicius Paranhos Vianna¹

Flávio Medeiros Seibt²

Mateus das Neves Gomes³

Luiz Alberto Oliveira Rocha⁴

Elizaldo Domingues dos Santos⁵

Liércio André Isoldi⁶

Resumo: Diversos estudos apontam que em pouco tempo a capacidade de geração de energia atual bem como a forma como a energia é obtida não será suficiente para suprir a demanda global. Em virtude deste déficit que se projeta para o futuro, as fontes de energia renováveis estão em evidência. A Terra possui uma ampla extensão litorânea onde a energia contida nas ondas do mar encontra-se disponível e apresenta um elevado potencial energético, sendo uma fonte de energia limpa e totalmente renovável. Entre os diferentes dispositivos de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica, os mais promissores são aqueles que associam o aproveitamento de diferentes recursos, ou seja, ondas e eólica, por exemplo, ou que possuem mais de uma função, conversor e quebra-mar, por exemplo. Nesse contexto, o dispositivo tipo placa horizontal submersa pode ser usado como conversor de energia das ondas e como quebra-mar, concomitantemente. O presente trabalho tem como objetivo demonstrar o princípio de funcionamento do dispositivo tipo placa horizontal submersa tanto na função de quebra-mar como de conversor de energia das ondas através da modelagem computacional. Para tanto, utilizou-se os softwares de dinâmica dos fluidos computacional GAMBIT, para a construção e discretização do domínio computacional, e FLUENT para solução das equações de conservação. Para representação da interação entre água e ar empregou-se o modelo multifásico *Volume of Fluid*. Foi utilizado um domínio bidimensional e

¹ Graduando em Engenharia Civil Costeira e Portuária, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, Brasil, e-mail: viniciossjn@hotmail.com

² Doutorando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil, e-mail: fseibt@gmail.com

³ Doutor em Engenharia Mecânica, Instituto Federal do Paraná (IFPR), Paranaguá, PR, Brasil, e-mail: mateus.gomes@ifpr.edu.br

⁴ Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil, e-mail: luizrocha@mecanica.ufrgs.br

⁵ Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, Brasil, e-mail: elizaldosantos@furg.br

⁶ Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, Brasil, e-mail: liercioisoldi@furg.br

uma onda monocromática, ambos com dimensões em escala real. Os resultados demonstram, qualitativamente, a efetividade do dispositivo como quebra-mar, através do monitoramento da elevação da superfície livre da água a montante e a jusante da placa, bem como sua potencialidade como conversor de energia das ondas, pelo monitoramento da velocidade axial do escoamento abaixo da placa.

Palavras-chave: Conversor de Energia das Ondas. Energia das Ondas. Placa Horizontal Submersa. Quebra-Mar. Simulação Numérica.

Abstract: Several studies indicate that in a short time the current energy generation capacity and the way which it is obtained will not be sufficient to supply the global demand. Due to this projected deficit for the future, renewable energy sources are in evidence. The Earth has a wide coastal stretch where the energy contained in the sea waves is available and has a high energy potential, being a source of clean and fully renewable energy. Among the different sea waves energy conversion devices into electrical energy, the most promising are those that associate the use of different resources, i.e., waves and wind, for example, or that have more than one function, converter and breakwater, for example. In this context, the submerged horizontal plate type device can be used as sea wave converter and breakwater, concomitantly. Therefore, the present work has the objective of demonstrating the operation principle of the submerged horizontal plate device in both the breakwater function and the wave energy converter through computational modeling. To do so, we used GAMBIT computational fluid dynamics software for the construction and discretization of the computational domain, and FLUENT for the solution of conservation equations. For the representation of the interaction between water and air, the multiphase Volume of Fluid model was employed. A two-dimensional domain and a monochromatic wave were used, both with real-scale dimensions. The results demonstrate, qualitatively, the effectiveness of the device as a breakwater, by monitoring the water free surface elevation upstream and downstream of the plate, as well as its potential as a wave energy converter, by monitoring the axial velocity of the flow below the board.

Keywords: Wave Energy Converter. Wave Energy. Submerged Horizontal Plate. Breakwater. Numerical Simulation.

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais a população média mundial se encontra próxima a 7 bilhões de pessoas. Estudos estimam que em menos de 50 anos este número deverá chegar a 9 bilhões (UN, 2015). Com isto, tem-se uma demanda crescente por diversos insumos, como: alimentos, medicações, vestuário e energia. Sendo a energia um fator extremamente importante para a economia, existe, portanto, a necessidade de buscar fontes alternativas para sua produção (ANEEL, 2008; GOULART, 2014).

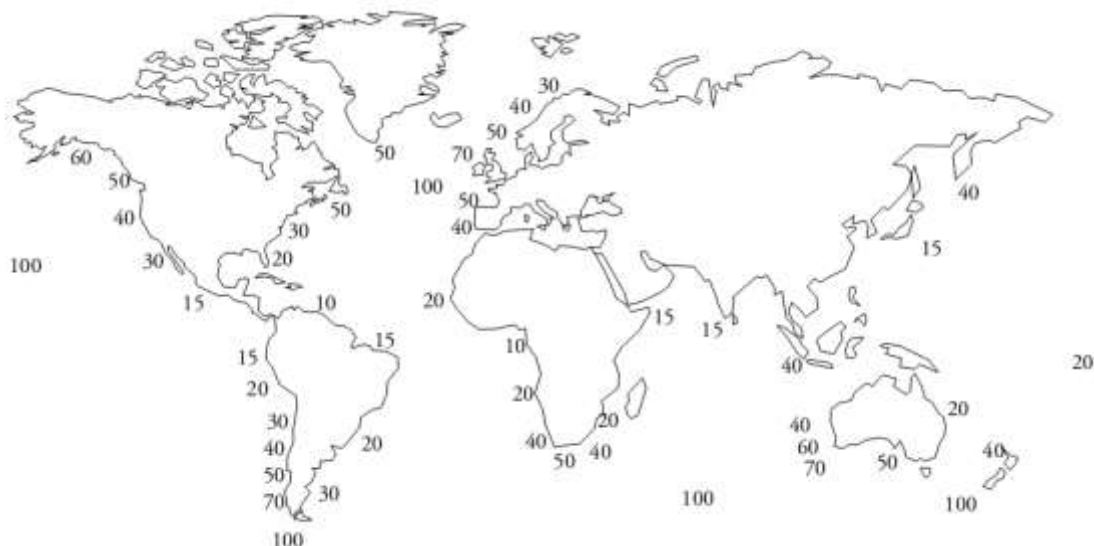
De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a energia é o fator fundamental para o desenvolvimento da nação. Com isso, o Brasil tem investido em fontes de energia limpas e renováveis, tendo em vista que a operação de recursos fósseis, além de ter um custo significativo, contribui para a degradação ambiental (ANEEL, 2008; GOMES, 2014).

A energia dos oceanos está disponível em diferentes formas, sendo as mais relevantes: a energia ondas, a energia das marés, a energia das correntes marítimas e a energia térmica dos oceanos (UIHLIEN e MAGAGNA, 2016). No entanto, as ondas de superfície concentram a maior parte deste recurso, com uma disponibilidade global de energia estimada em $2,11 \pm 0,05$ TW, valor comparável ao consumo médio anual de energia elétrica em todo o mundo (GUNN e STOCK-WILLIAMS, 2012). Regiões situadas entre 30° e 60° de latitude, como a costa do Brasil, apresentam um potencial atrativo a ser explorado, com boas médias anuais de energia de ondas disponível (FALCÃO, 2010).

A potência de uma onda é proporcional ao quadrado de sua amplitude e ao seu período. Assim, ondas de elevada amplitude (cerca de 2 m) e de elevado período (7 a 10 s), normalmente, excedem os 50 kW/m de frente de onda (CRUZ e SARMENTO, 2004). Portanto, considerando a vasta extensão da faixa litorânea brasileira, cerca de 8.000 km de extensão, e tomando-se um valor médio para o potencial energético na costa brasileira, de 20 kW/m (conforme Fig. 1), o potencial energético total para o Brasil resultaria em

aproximadamente 0,15 TW (GOMES, 2010). Na Figura 1 é possível observar o potencial energético global de energia das ondas.

Figura 1 – Distribuição do potencial médio anual de energia das ondas em kW/m



Fonte: Thorpe, 1999.

Diferentes critérios são utilizados para classificar os conversores. Os dois mais usuais são a profundidade do local de instalação do equipamento e o tipo de dispositivo de conversão. O primeiro critério permite classificar os dispositivos como: costeiros (*shoreline*) — situados em região com profundidades de até 20 m — que são geralmente presos ao fundo; próximos da costa (*near-shore*) — situados em região com profundidades entre 20 e 50 m — que podem ser presos ao fundo ou flutuantes; ou afastados da costa (*offshore*) — situados em região com profundidades maiores que 50 m — que são geralmente flutuantes. Já o segundo critério, agrupa os conversores pelo seu princípio de funcionamento como: coluna de água oscilante, corpos oscilantes e galgamento (CRUZ, 2008). Entretanto, estes critérios não contemplam todas as possibilidades existentes de converter a energia das ondas em energia elétrica; outros princípios de funcionamento podem ser usados, como, por exemplo, o conversor do tipo placa horizontal submersa.

O sistema de placa horizontal submersa é um tipo de estrutura utilizada em engenharia costeira, como quebra-mar submerso, para fins de proteção costeira, que pode ser utilizada, também, como conversor de energia das

ondas (GRAW, 1993a; CARTER, 2005; BROSSARD et al., 2009). Sua utilização como conversor tem como principal característica a dupla funcionalidade da estrutura, uma vez que o mesmo dispositivo utilizado para conversão de energia das ondas não deixa de atuar como quebra-mar submerso (NING et al., 2015). Devido a esta característica, espera-se que este tipo de dispositivo seja um conversor de energia das ondas economicamente viável; no entanto, ainda é necessário o desenvolvimento de pesquisas para tornar possível esta avaliação.

O objetivo do presente trabalho é contribuir para um maior conhecimento do dispositivo tipo placa horizontal submersa, quanto as suas duas funções: quebra-mar e conversor de energia das ondas; através de uma análise qualitativa sobre resultados de simulações numéricas obtidos com um modelo em escala real. Esta análise foi feita com base na elevação da superfície livre da água a montante e a jusante da placa, para demonstrar o princípio de funcionamento na função de quebra-mar, e com base na variação da velocidade horizontal sob a placa, para demonstrar o princípio de funcionamento na função de conversor de energia das ondas.

Para tanto, foi simulada uma onda monocromática de período (T) 7,50 s, incidindo numa placa horizontal submersa disposta em três diferentes alturas totais da placa (H_P): 8,00, 8,50 e 9,00 m. Nas simulações numéricas foi utilizado um domínio bidimensional que se baseia no modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF – HIRT e NICHOLS, 1981; SRINIVASAN et al., 2011), para o tratamento da interação entre água e ar, e no Método de Volumes Finitos (MVF – PATANKAR, 1980; VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007), para a solução das equações de conservação de massa e quantidade de movimento.

2 PLACA HORIZONTAL SUBMERSA

O dispositivo de placa horizontal submersa consiste de uma placa plana e imersa, horizontalmente, abaixo da superfície livre do mar. A passagem das ondas pelo dispositivo, origina um escoamento sob a placa, que alterna periodicamente de sentido, absorvendo energia das ondas incidentes. Assim,

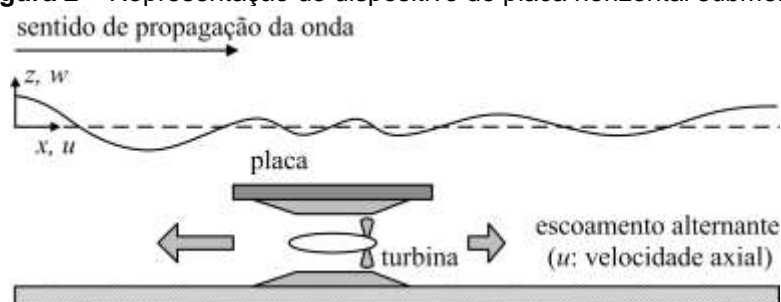
esse dispositivo pode atuar tanto como conversor de energia das ondas do mar em eletricidade, aproveitando esse escoamento de água alternado para o acionamento de uma turbina, como quebra-mar, atenuando a energia das ondas que atingem as regiões costeiras.

O sistema de placa submersa foi estudado inicialmente como um quebra-mar submerso visando à proteção costeira. Durante experimentos, realizados por Dick e Brebner (1968), com blocos submersos sólidos e permeáveis, observou-se a ocorrência de um padrão de circulação do escoamento ao redor dos blocos permeáveis, dando origem aos estudos de placa horizontal submersa.

Em experimentos de Graw (1992), o sistema foi descrito como um eficiente filtro de ondas, cujo escoamento sob a placa foi considerado vantajoso em relação a outros quebra-mares submersos. Este escoamento ocorre durante a passagem da onda sobre a placa e apresenta característica pulsante com maior intensidade no sentido contrário ao de propagação da onda. Neste mesmo trabalho, afirma-se que este escoamento é bastante estável, não sofrendo alterações significativas mesmo quando a região abaixo da placa é parcialmente obstruída.

Sua aplicação como conversor consiste no aproveitamento deste escoamento estável, que ocorre sob uma placa horizontal imersa abaixo da superfície da água, como propulsão para uma turbina hidráulica (conforme Fig. 2) instalada sob a mesma (GRAW, 1993a; 1993b; 1994; 1995).

Figura 2 – Representação do dispositivo de placa horizontal submersa



Fonte: Os autores, 2017.

Algumas vantagens deste dispositivo com relação a outros conversores de energia das ondas: (i) é totalmente submerso, portanto, o impacto de

grandes ondas sobre a estrutura é reduzido; (ii) pela mesma razão, problemas de corrosão na turbina também são reduzidos; (iii) a dupla funcionalidade contribui para a redução de custos, pois, quando a turbina está captando energia, o sistema atua como filtro de ondas e conversor de energia, porém se a região abaixo da placa for bloqueada, o sistema atua como um quebra-mar submerso convencional; (iv) como o dispositivo é totalmente submerso, a influência visual sobre o ambiente é reduzida (GRAW, 1994).

O sistema de placa horizontal submersa é abordado em diversos estudos apenas como um quebra-mar submerso (HSU e WU, 1998; BROSSARD e CHAGDALI, 2001; HU et al., 2002; HILDEBRANDT e SCHLURMANN, 2008; LIU et al., 2009), em outros estudos, nas duas funções: quebra-mar e conversor (GRAW, 1993a; 1993b; 1994; 1998; CARTER, 2005; SEIBT et al., 2012a), bem como, apenas na função de conversor de energia das ondas (ORER e OZDAMAR, 2007; SEIBT, 2014; SEIBT et al., 2012b; 2014a; 2014b; 2015).

Cabe destacar que diferentemente dos estudos citados, no presente artigo foi realizado um estudo numérico em escala real, o que representa um diferencial na abordagem do dispositivo de placa horizontal submersa e se inseri no conjunto de novos trabalhos que estão sendo propostos por esse grupo de pesquisa.

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

O modelo computacional utilizado foi desenvolvido com os softwares de Dinâmica dos Fluidos Computacional GAMBIT (GAMBIT, 2006) e FLUENT (FLUENT, 2007). O primeiro foi utilizado para construção e discretização do domínio bidimensional com uma malha estruturada de elementos quadriláteros. O segundo foi utilizado para executar a solução das equações de conservação de massa e quantidade de movimento a partir do MVF, o qual permite obter uma versão discreta das Equações Diferenciais Parciais (EDPs). Diferentemente de outros métodos, ele fundamenta-se em uma abordagem física do problema representado pela EDP, sendo amplamente utilizado em aplicações de engenharia envolvendo dinâmica de fluidos; como, por exemplo:

aerodinâmica, hidrodinâmica, interação fluido-estrutura (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

3.1 Modelo Matemático

3.1.1 Modelo do Escoamento

As equações de conservação da massa e da quantidade de movimento para um escoamento isotérmico, laminar, incompressível e bidimensional, com presença de duas fases (água-ar), são dadas pelas Eqs. (1), (2) e (3) (SCHLICHTING e GERSTEN, 2000):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho \left[u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \rho g \quad (3)$$

onde ρ é a massa específica (kg/m^3), u e w são as componentes horizontal e vertical, respectivamente, da velocidade do escoamento (m/s), p é a pressão (N/m^2), ρg é o empuxo (N/m^3) e μ é a viscosidade dinâmica ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$).

Para representar a interação água-ar do escoamento e avaliar sua interação com o equipamento, é empregado o método VOF. O método VOF é um modelo multifásico usado para escoamentos de fluidos com duas ou mais fases. Neste modelo, as fases são imiscíveis, i.e., o volume ocupado por uma fase não pode ser ocupado pela outra fase. Assim, as frações de volume (α_q), usadas para representar ambas as fases no interior do volume de controle, são assumidas como contínuas no espaço e no tempo. Além disso, a soma das frações de volume, no interior do volume de controle, é sempre unitária ($0 \leq \alpha_q \leq 1$). Sendo assim, se $\alpha_{\text{água}} = 0$ a célula está sem água e preenchida de ar ($\alpha_{\text{ar}} = 1$) e se a célula tem a presença de ambos os fluidos (água e ar), uma fase é o complemento da outra, ou seja, $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$. Portanto, é necessária

uma equação de transporte adicional para a fração de volume, dada pela Eq. (4), como (SRINIVASAN et al., 2011):

$$\frac{\partial(\alpha_q)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_q u)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha_q w)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Os valores de massa específica e viscosidade dinâmica para o conjunto de equações são dados, portanto, pela média ponderada das propriedades de cada uma das fases, conforme as Eqs. (5) e (6) (SRINIVASAN et al., 2011):

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (5)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (6)$$

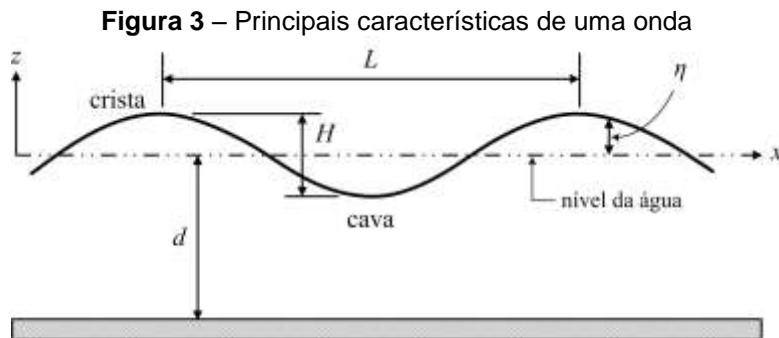
Uma vez que o fluido é considerado incompressível, devido ao escoamento envolver baixas velocidades, a equação de estado, para determinação da pressão em qualquer ponto do domínio, torna-se dependente apenas da coluna de fluido, não existindo variação de massa específica de cada fase (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

3.1.2 Modelo de Geração da Onda

As principais características das ondas são: a distância horizontal entre duas cristas sucessivas (comprimento de onda, L), a distância vertical entre a crista e a cava (altura de onda, H), o tempo decorrido entre o aparecimento de duas cristas sucessivas (período de onda, T), a distância entre o nível médio da superfície da água até o fundo (profundidade, d) e a distância entre a superfície livre e o nível médio da água (elevação da superfície livre, η). A Fig. 3 apresenta a representação das características das ondas.

O comprimento de onda (L) é definido, pela teoria de ondas de Airy, a partir da equação de dispersão – Eq. (7) – e tem seu valor determinado de forma iterativa, por (DEAN e DALRYMPLE, 1991):

$$L = \left(\frac{g}{2\pi} \right) T^2 \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) \quad (7)$$



Fonte: Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991.

Já as componentes de velocidade de propagação da onda, nas direções horizontal (x) e vertical (z), são dadas pelas Eqs. (8) e (9), a partir da teoria de Airy, respectivamente como (DEAN e DALRYMPLE, 1991):

$$u(x, z, t) = \frac{H}{2} \left(\frac{gk}{\sigma} \right) \left[\frac{\cosh k(d+z)}{\cosh(kd)} \right] \cos(kx - \sigma t) \quad (8)$$

$$w(x, z, t) = \frac{H}{2} \left(\frac{gk}{\sigma} \right) \left[\frac{\sinh k(d+z)}{\cosh(kd)} \right] \sin(kx - \sigma t) \quad (9)$$

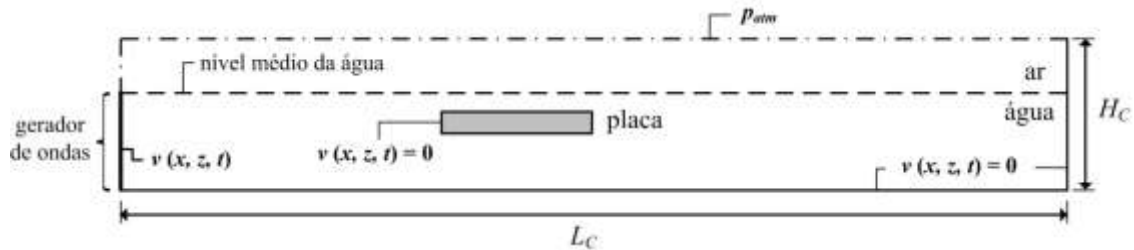
onde H é a altura de onda (m), g é a aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), k é o número de onda dado por $k = 2\pi/L$ (m^{-1}), L é o comprimento de onda (m), σ é a frequência de onda dada por $\sigma = 2\pi/T$ (rad/s), T é o período de onda (s), d é a profundidade da lâmina de água (m) e t é o tempo (s).

A onda considerada neste estudo possui características de escala real, como: período $T = 7,50$ s, comprimento $L = 65,40$ m, altura $H = 1,00$ m e profundidade $d = 10,00$ m.

3.1.3 Condições de Contorno

O modelo matemático é completado pelas condições de contorno do problema, as quais foram atribuídas da seguinte forma: velocidade dependente do tempo ($v(x, z, t)$) na fronteira esquerda (representando o gerador de ondas do canal), pressão atmosférica (p_{atm}) na fronteira superior e parte da fronteira esquerda (representada pela linha traço-ponto) e condição de não-deslizamento e impermeabilidade ($v(x, z, t) = 0$) nas demais fronteiras, conforme Fig. 4.

Figura 4 – Representação das condições de contorno do domínio computacional



Fonte: Os autores, 2017.

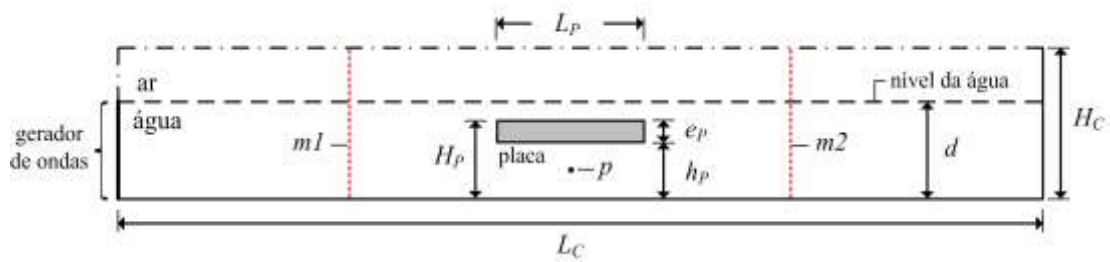
Com a atribuição de uma função temporal na fronteira esquerda do canal (condição de contorno de velocidade dependente do tempo), foi simulado o comportamento de um gerador de ondas (HORKO, 2007). A função temporal utilizada foi composta pelas Eqs. (8) e (9) das componentes de velocidade de propagação da onda, nas direções horizontal (x) e vertical (z) da teoria de ondas linear de Airy.

3.2 Características do Domínio Computacional

Para a simulação numérica do dispositivo de placa horizontal submersa considerou-se a representação bidimensional de um canal de ondas, de altura $H_C = 20,00$ m, comprimento $L_C = 327,00$ m e com profundidade da lâmina de água $d = 10,00$ m (como em GOULART et al., 2015), com a presença de uma placa horizontal, de espessura $e_P = 0,32$ m e comprimento $L_P = 16,00$ m, abaixo da superfície da água e centralizada ao longo do comprimento do canal (L_C), conforme Fig. 5.

Para o monitoramento dos dados utilizados na análise qualitativa, foram inseridas no modelo sondas numéricas na região a montante da placa ($m1$), a jusante da placa ($m2$) e abaixo da placa (p). As sondas $m1$ e $m2$ foram utilizadas para monitorar a elevação da superfície livre e posicionadas a 60,00 m, a montante e a jusante da placa, respectivamente. Já a sonda p , situada na metade do comprimento da placa submersa e na metade da altura da placa (h_P) foi utilizada para monitorar a velocidade axial (u) do escoamento abaixo da placa (Fig. 5).

Figura 5 – Representação da geometria do domínio computacional



Fonte: Os autores, 2017.

No presente estudo, foram avaliadas três alturas totais ($H_P = h_P + e_P$) da placa horizontal submersa, conforme Tab. 1.

Tabela 1 – Relação de alturas totais da placa simuladas

Placa	H_P (m)
1	8,00
2	8,50
3	9,00

Fonte: Os autores, 2017.

3.3 Características da Malha e do Modelo Numérico

Quanto à discretização do domínio computacional, foi utilizada uma malha estruturada de elementos quadriláteros de dimensões $0,10 \times 0,10$ m e o passo de tempo utilizado foi de $0,01$ s para todos os casos.

Foram adotados, também, os seguintes parâmetros de solução numérica: esquema de advecção UPWIND de 1ª ordem para tratamento dos termos advectivos; PRESTO para discretização espacial da pressão; GEO-RECONSTRUCTION para a discretização da fração volumétrica; PISO como método de acoplamento pressão-velocidade; fatores de sub-relaxação $0,30$ e $0,70$ para as equações da conservação da massa e quantidade de movimento, respectivamente.

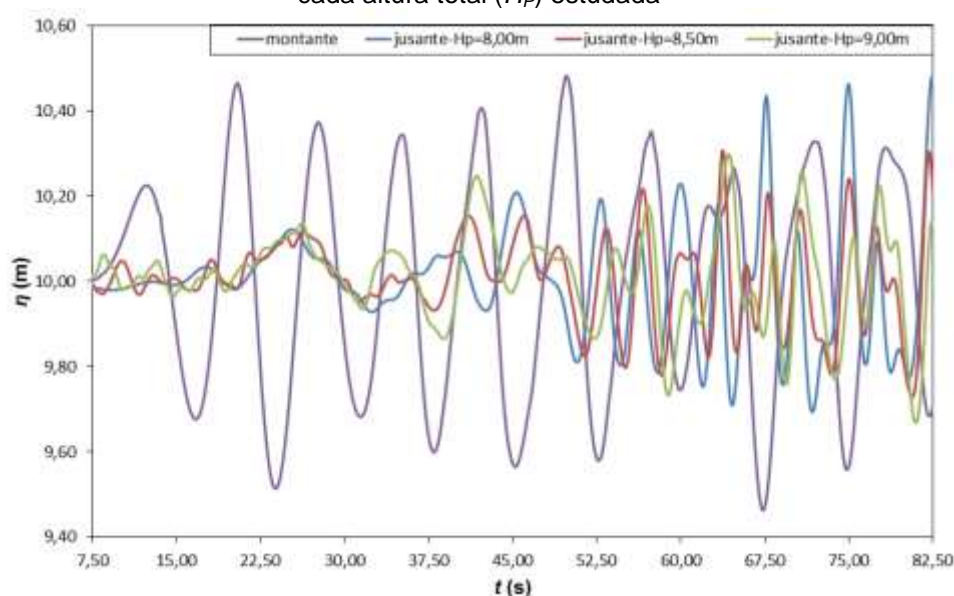
Cabe destacar que o modelo numérico usado nesse trabalho já foi previamente verificado e validado, como apresentado em Seibt (2014), Seibt et al. (2014a) e Seibt et al. (2014b).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 apresenta os resultados da elevação da superfície livre (η) a montante da placa, em $m1$, e a jusante da placa, em $m2$ (ver Fig. 5) para um intervalo de tempo igual a $10T$ (onde T é o período de onda). É possível

observar que ocorre uma significativa redução da altura da onda após sua passagem sobre a placa horizontal submersa. Percebe-se, também, que para cada altura total da placa (H_p) há uma diferença entre as alturas de onda medidas a jusante da placa, mostrando que a variação desse parâmetro geométrico é importante para a concepção da estrutura do dispositivo, pois modifica a altura de onda que chega à zona protegida.

Figura 6 – Elevação da superfície livre (η) a montante ($m1$) e a jusante ($m2$) da placa para cada altura total (H_p) estudada

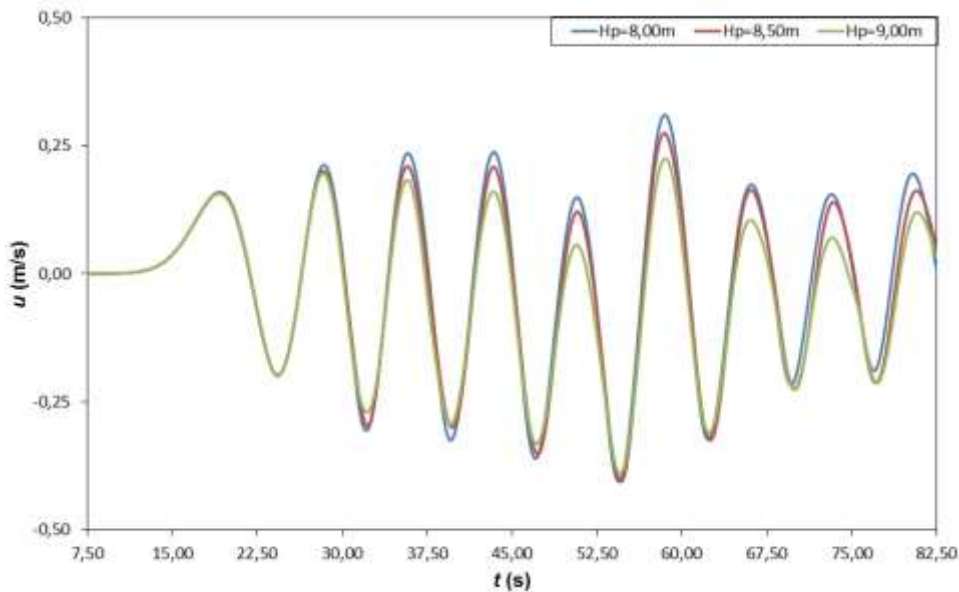


Fonte: Os autores, 2017.

Esse efeito causado pela placa horizontal submersa é o que caracteriza sua atuação na função de quebra-mar submerso. Vale destacar que um quebra-mar submerso, como a placa horizontal submersa, permite que as ondas provenientes do mar aberto passem por ele, em direção à zona protegida, sem que haja obstrução do escoamento abaixo da placa.

Já a Figura 7, apresenta os resultados da velocidade axial (u) do escoamento sob a placa horizontal submersa no ponto p (ver Fig. 5) para cada altura total de placa (H_p) estudada, compreendendo o mesmo intervalo de tempo apresentado na Fig. 6.

Figura 7 – Velocidade axial (u) sob a placa submersa em p para cada altura total (H_p) estudada



Fonte: Os autores, 2017.

Conforme a Fig. 7, verifica-se que a maior magnitude de u ocorre no sentido oposto ao de propagação da onda. Destaca-se que esse é um efeito característico do dispositivo, o qual possibilita que o equipamento possa ser aproveitado como conversor de energia das ondas, pois à medida que a velocidade do escoamento sob a placa apresenta uma magnitude significativa, esta energia pode ser aproveitada para movimentar uma turbina hidráulica.

Assim como na Fig. 6, é possível observar na Fig. 7 que cada curva de u , referente a uma altura total (H_p) estudada, apresenta uma diferente magnitude, o que confirma a importância do parâmetro H_p para a concepção da estrutura do dispositivo.

5 CONCLUSÕES

Este estudo preliminar permitiu analisar qualitativamente o efeito da variação da altura total (H_p) de uma placa horizontal submersa em escala real, considerando seu princípio de funcionamento como quebra-mar e conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica.

Os resultados apresentaram a reprodução dos efeitos característicos da placa horizontal submersa em ambas as funções: quebra-mar e conversor de energia das ondas; mostrando a coerência do modelo computacional empregado, como era esperado.

Em estudos futuros, pretende-se avaliar quantitativamente o efeito da variação da altura total da placa nessas configurações estudadas, através de determinação da sua eficiência de conversão e do seu coeficiente de transmissão. O primeiro, utilizado para avaliar o desempenho do dispositivo como conversor de energia das ondas, já o segundo, utilizado para avaliar sua capacidade de atuar como quebra-mar.

O presente trabalho é um dos primeiros, desse grupo de pesquisas, a abordar o dispositivo de placa horizontal submersa em escala real. Espera-se, com isso, obter resultados que comprovem o desempenho da placa horizontal submersa em ambas as funções, tendo em vista que o mesmo amplia a perspectiva de uma nova alternativa para geração de energia limpa e renovável.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem a FAPERGS – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul e ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, DF, Brasil: ANEEL, 2008. 236p. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>.

BROSSARD, J.; CHAGDALI, M. Experimental investigation of the harmonic generation by waves over a submerged plate. **Coastal Engineering**, v. 42, n. 4, pp. 277-290, 2001.

BROSSARD, J.; PERRET, G.; BLONCE, L.; DIEDHIOU, A. Higher harmonics induced by a submerged horizontal plate and a submerged rectangular step in a wave flume. **Coastal Engineering**, v. 56, n. 1, pp. 11-22, 2009.

CARTER, R.W. **Wave energy converters and a submerged horizontal plate**. Manoa, Honolulu, HI, USA, 2005. 273p. Dissertação (Master in Ocean and Resources Engineering), University of Hawai'i.

CRUZ, J. (Ed.) **Ocean wave energy: current status and future perspectives**. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 432p., 2008.

CRUZ, J.M.B.P.; SARMENTO, A.J.N.A. **Energia das ondas: Introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais**. Alfragide, Portugal: Instituto do Ambiente, 65p., 2004.

Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Curitiba, PR, v.2, n.1,31, jan. / jun., 2017.

DEAN, R.G.; DALRYMPLE, R.A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. In: Liu, P. (Ed) Advanced Series on Ocean Engineering, v. 2. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 353p., 1991.

DICK, T.M.; BREBNER, A. **Solid and permeable submerged breakwaters**. In: Coastal Engineering Proceedings (Proceedings of 11th Conference on Coastal Engineering, London, United Kingdom, 1968), ASCE, v. 1, n. 11, p. 1141-1158, 1968.

FALCÃO, A.F.O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, pp. 899-918, 2010.

FLUENT (versão 6.3.26) **Documentation Manual**, ANSYS, Inc., 2007.

GAMBIT (versão 2.4.6) **Documentation Manual**, ANSYS, Inc., 2006.

GOMES, M.N. **Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante**. Porto Alegre, 2014. 149p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GOMES, M.N. **Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna D'água Oscilante para a Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica**. Rio Grande, 2010. 209p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional), Universidade Federal do Rio Grande.

GOULART, M.M. **Estudo Numérico da Geometria de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real Empregando Constructal Design**. Rio Grande, 2014. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional), Universidade Federal do Rio Grande.

GOULART, M.M.; MARTINS, J.C.; JUNIOR, I.C.A.; GOMES, M.N.; SOUZA, J.A.; ROCHA, L.A.O.; ISOLDI, L.A.; DOS SANTOS, E.D. Constructal design of an onshore overtopping device in real scale for two different depths. **Marine Systems & Ocean Technology**, v. 10, pp. 120-129, 2015.

GRAW, K.-U. **Is the submerged plate wave energy converter ready to act as a new coastal protection system?** In: Proceedings of XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Napoli, Italia, p. 1-9, 1994.

GRAW, K.-U. **Shore protection and electricity by submerged plate wave energy converter**. In: Proceedings of European Wave Energy Symposium, Edinburgh, UK, p. 379-384, 1993a.

GRAW, K.-U. **The submerged plate as a wave filter: the stability of the pulsating flow phenomenon**. In: Coastal Engineering Proceedings (Proceedings of 23rd Conference on Coastal Engineering, Venice, Italy, 1992), ASCE, v. 1, n. 23, p. 1153-1160, 1992.

GRAW, K.-U. **The submerged plate wave energy converter: A new type of wave energy device**. In: Proceedings of International Symposium on Ocean Energy Development (ODEC), Muroran, Hokkaido, Japan, p. 307-310, 1993b.

GRAW, K.-U. Vorrichtung zur Erzeugung von Elektrischer Energie aus Wasserwellen. PINA (Patent- und Innovationsagentur des Landes Nordrhein-Westfalen), Deutsches Patentamt, Patent Nr. P 43 24 110, 1995.

GRAW, K.-U. **Wave energy: need for protection - possible uses**. In: Information Booklet of the University of Leipzig at Expo'98: The Oceans, a Heritage for the Future, Lisbon, Portugal, p. 1-16, 1998.

GUNN, K.; STOCK-WILLIAMS, C. Quantifying the global wave power resource. **Renewable Energy**, v. 44, pp. 296-304, 2012.

HILDEBRANDT, A.; SCHLURMANN, T. **Velocity Field Under Propagating Waves Over a Submerged Horizontal Plate and Induced Forces**. In: Proceedings of Fourth ChineseGerman Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (JOINT2008), Darmstadt, Germany, p. 421-425, 2008.

HIRT, C.W.; NICHOLS, B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, n. 1, pp. 201-225, 1981.

HORKO, M. **CFD optimisation of an oscillating water column energy converter**. Australia, 2007. 159p. Dissertação (Master Degree of Engineering Science), The University of Western Australia.

HSU, H.H.; WU, Y.C. Scattering of water wave by a submerged horizontal plate and a submerged permeable breakwater. **Ocean Engineering**, v. 26, n. 4, pp. 325-341, 1998.

HU, H.; WANG, K.H.; WILLIAMS, A.N. Wave motion over a breakwater system of a horizontal plate and a vertical porous wall. **Ocean Engineering**, v. 29, n. 4, pp. 373-386, 2002.

LIU, C.; HUANG, Z.; TAN, S.K. Nonlinear scattering of non-breaking waves by a submerged horizontal plate: Experiments and simulations. **Ocean Engineering**, v. 36, n. 17, pp. 1332-1345, 2009.

NING, D.; LI, Q.; LIN, H.; TENG, B. Numerical Investigation of Nonlinear Wave Scattering by a Horizontal Submerged Plate. **Procedia Engineering**, v. 116, pp. 237-244, 2015.

ORER, G.; OZDAMAR, A. An experimental study on the efficiency of the submerged plate wave energy converter. **Renewable Energy**, v. 32, n. 8, pp. 1317-1327, 2007.

PATANKAR, S.V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York: McGraw Hill, 196p., 1980.

SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. **Boundary-layer theory**. Berlin: Springer, 800p., 2000.

SEIBT, F.M. **Análise Numérica do Princípio de Funcionamento do Conversor de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Placa Submersa**. Rio Grande, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Universidade Federal do Rio Grande.

SEIBT, F.M.; COUTO, E.C.; DOS SANTOS, E.D.; ISOLDI, L.A.; ROCHA, L.A.O.; TEIXEIRA, P.R.F. Numerical study on the effect of submerged depth on the horizontal plate wave energy converter. **China Ocean Engineering**, v. 28, n. 5, pp. 687-700, 2014a.

SEIBT, F.M.; COUTO, E.C.; TEIXEIRA, P.R.F.; DOS SANTOS, E.D.; ISOLDI, L. A. Análise numérica de uma placa submersa como quebra mar e conversor de energia das ondas. **VETOR-Revista de Ciências Exatas e Engenharias**, v. 22, n. 2, pp. 5-17, 2012a.

SEIBT, F.M.; COUTO, E.C.; TEIXEIRA, P.R.F.; DOS SANTOS, E.D.; ISOLDI, L.A.; ROCHA, L.A.O. **Computational Modeling of the Submerged Plate Wave Energy Converter**. In: Proceedings of 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT). Rio de Janeiro, Brazil: ABCM, vol. 1, p. 1-7, 2012b.

SEIBT, F.M.; COUTO, E.C.; TEIXEIRA, P.R.F.; DOS SANTOS, E.D.; ROCHA, L.A.O.; ISOLDI, L.A. Numerical Analysis of the Fluid-Dynamic Behavior of a Submerged Plate Wave Energy Converter. **Computational Thermal Sciences: An International Journal**, v. 6, n. 6, pp. 525-534, 2014b.

SEIBT, F.M.; ISOLDI, L.A.; TEIXEIRA, P.R.F.; DOS SANTOS, E.D.; ROCHA, L.A.O. Avaliação numérica do efeito da variação da altura relativa de um conversor de energia das ondas do mar tipo placa submersa. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 7, n. 2, pp. 102-115, 2015.

SRINIVASAN, V.; SALAZAR, A.J.; SAITO, K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. **Applied Mathematical Modelling**, v. 35, n. 8, pp. 3710-3730, 2011.

THORPE, T.W. **An overview of wave energy technologies: status, performance and costs**. In: Proceedings International One Day Seminar, Institution of Mechanical Engineers, London, UK, 1999.

UIHLEIN, A.; MAGAGNA, D. Wave and tidal current energy – A review of the current state of research beyond technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, pp. 1070-1081, 2016.

UN – United Nations. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World Population Prospects: The 2015 Revision**, World Population 2015 Wallchart. ST/ESA/SER.A/378. New York, 2015. Disponível em: <www.esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/World_Population_2015_Wallchart.pdf>.

VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics – the finite volume method**. England: Pearson, 503p., 2007.

Enviado em: 05 jun. 2017

Aceito em: 24 jun. 2017

Editores responsáveis: Amanda Ávila Rodrigues