



REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

MODELAGEM COMPUTACIONAL DO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS TIPO PLACA HORIZONTAL SUBMERSA EM ESCALA REAL E ANÁLISE DE SIMILARIDADE COM MODELO EM ESCALA DE LABORATÓRIO¹

FLÁVIO MEDEIROS SEIBT², ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS³, LIÉRCIO
ANDRÉ ISOLDI⁴, LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA⁵

¹Apresentado no 7º Conferência Sul em Modelagem Computacional (MCSul) e do VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO).

^{2,5} Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Rua Sarmento Leite 425, 90050-170, Porto Alegre, RS, Brasil, fseibt@gmail.com², luizrocha@mecanica.ufrgs.br⁵.

^{3,4} Escola de Engenharia (EE), Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Avenida Itália km 8, 96203-900, Rio Grande, RS, Brasil, elizaldosantos@furg.br³, liercioisoldi@furg.br⁴.

RESUMO

A grande concentração de energia disponível nas ondas do mar faz desse recurso uma importante alternativa como fonte de energia renovável. O sistema de placa horizontal submersa é uma estrutura utilizada como quebra-mar, mas pode ser utilizado, também, como conversor de energia das ondas. O objetivo deste estudo é simular, numericamente, o conversor tipo placa horizontal submersa em escala real e analisar a similaridade dos resultados com relação a resultados precedentes de um modelo em escala de laboratório, de forma a possibilitar recomendações teóricas sobre a geometria do conversor. Para isso, as

dimensões do modelo foram definidas por um fator de escala segundo o critério de similaridade de Froude. Foi simulada uma onda de período 6,00 s incidindo numa placa submersa disposta em diferentes alturas relativas entre 76,7 e 88,3 %. Os dados de eficiência do dispositivo foram avaliados sem considerar a presença da turbina abaixo da placa. Nas simulações numéricas, foi utilizado um domínio bidimensional e a interação entre água e ar foi tratada com o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF). O Método de Volumes Finitos foi empregado para a solução das equações de conservação de massa e quantidade de movimento. A análise dos resultados permitiu identificar que a configuração da placa com maior altura relativa pode levar a uma eficiência do equipamento de aproximadamente 18 %. Além disso, a comparação entre os resultados das duas escalas mostrou-se concordante, de modo que diferença média entre as eficiências obtidas foi de 2 %, considerando os casos estudados.

Palavras-chave: energia das ondas, método de volumes finitos, placa horizontal submersa

COMPUTATIONAL MODELING OF THE REAL-SCALE SUBMERGED HORIZONTAL PLATE TYPE WAVE ENERGY CONVERTER AND SIMILARITY ANALYSIS WITH LABORATORY-SCALE MODEL

ABSTRACT

The large concentration of available energy in the sea waves makes this resource an important alternative as a source of renewable energy. The submerged horizontal plate system is a structure used as a breakwater, but can also be used as a wave energy converter. The aim of this study is to simulate, numerically, the real-scale submerged horizontal plate converter and to analyze the results similarity with respect to previous results of a laboratory-scale model, in order to allow theoretical recommendations on the geometry of the converter. For this, the dimensions of the model were defined by a scale factor according to the Froude similarity criterion. The submerged plate arranged with different relative heights between 76.7 and 88.3 % and an incident wave with period of 6.00 s were simulated. The device efficiency data were determined without considering the presence of the turbine below the plate. In the

numerical simulations, a two-dimensional domain was used and the interaction between water and air was treated with the multiphasic model Volume of Fluid (VOF). The Finite Volume Method was used to solve the conservation equations of mass and momentum. The analysis of the results allowed to identify that the configuration of the plate with greater relative height can lead to an efficiency of the equipment of approximately 18 %. In addition, the comparison between the results of the two scales was concordant, so that average difference between the obtained efficiencies was 2 %, considering the studied cases.

Keywords: wave energy, finite volume method, submerged horizontal plate

1. INTRODUÇÃO

Diante de um cenário global de crescente demanda energética, especialmente por eletricidade, e de evidente necessidade de preservação dos recursos naturais, tem ocorrido um processo de diversificação das matrizes energéticas com foco em fontes renováveis, no qual os oceanos tem se destacado como uma alternativa promissora devido ao seu elevado potencial de energia (Falcão, 2010; Margheritini et al., 2012).

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). Apesar de ainda não ser considerada uma alternativa viável, devido ao alto custo das tecnologias atuais e a pouca disponibilidade de dados das ondas na costa do país, estudos recentes indicam uma disponibilidade de 15,25 KW/m (quilowatt por metro de frente de onda) no litoral sul do Brasil (Contestabile et al., 2015).

Outro aspecto importante é a densidade energética das ondas, é esperado que a energia das ondas proporcione de 15 a 20 vezes mais energia, por metro quadrado, que a energia eólica ou solar (Vining e Muetze, 2009). Portanto, mesmo com estimativas conservadoras quanto à eficiência dos conversores de energia das ondas em energia elétrica,

as boas perspectivas têm estimulado pesquisas científicas e tecnológicas para o aproveitamento desta fonte de energia (Astariz et al., 2015).

Atualmente, diversas soluções têm sido estudadas e desenvolvidas para o aproveitamento da energia das ondas, porém nenhuma delas encontra-se consolidada do ponto de vista comercial. Devido às características do local de instalação serem muito particulares, é esperado que diferentes princípios de conversão de energia das ondas sejam utilizados no desenvolvimento dos conversores (Chozas e Soerensen, 2009; Son et al., 2016).

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 estudo é contribuir para um maior conhecimento do conversor tipo placa horizontal submersa, apresentando uma análise sobre resultados de simulações numéricas obtidos com modelo em escala real. Bem como, estabelecer uma relação

qualitativa entre os resultados do modelo em escala real, do presente trabalho, e os resultados prévios do modelo em escala de laboratório de Seibt et al. (2014). Para tanto, a geometria da placa submersa e as características da onda incidente no dispositivo, foram definidas por um fator de escala a partir do critério de similaridade de Froude.

Assim, no presente trabalho foi simulada uma onda monocromática de período (T) 6,00 s, incidindo numa placa horizontal submersa com alturas relativas (X) de 76,7 a 88,3 %. A altura relativa da placa (X) é definida pela razão entre a altura da placa (H_p) e a profundidade da lâmina de água (h), logo, $X = H_p/h$. Tais características são similares, em escala, aos casos abordados por Seibt et al. (2014) tomados como base para as análises e comparações realizadas. 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. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 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 pela estrutura, 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, aproveitando esse escoamento alternante da água para o acionamento de uma turbina, quanto 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 para proteção costeira. Durante experimentos, realizados por Dick e Brebner (1968), com blocos submersos sólidos e permeáveis, foi observada 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 abaixo da 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 Figura 1) instalada sob a mesma (Graw, 1993a; 1993b; 1994; 1995a).

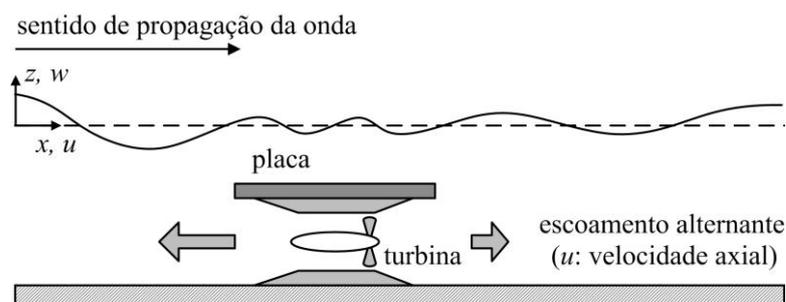


Figura 1: Representação do dispositivo de placa horizontal submersa

Algumas vantagens deste conversor 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 da estrutura 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).

Apesar da potencialidade do sistema de placa horizontal submersa, como um dispositivo de dupla atuação (conforme Graw, 1994), grande parte dos estudos a respeito do assunto é voltada para seu uso como quebra-mar submerso (Hsu e Wu, 1998; Brossard e Chagdali, 2001; Hu et al., 2002; Hildebrandt e Schlurmann, 2008; Liu et al., 2009). Estes

estudos, no entanto, contribuem para a melhor compreensão dos fenômenos relacionados ao escoamento em torno da placa horizontal submersa.

Carter (2005) abordou o sistema de placa horizontal submersa como conversor de energia das ondas, a partir de um modelo numérico bidimensional, empregando o Método de Elementos de Contorno e a teoria linear de ondas para um escoamento potencial. Neste estudo, foi apresentado o campo de velocidades sob a placa, contribuindo para o entendimento do escoamento que se desenvolve sob a mesma durante a passagem das ondas. Os resultados evidenciaram, contudo, que este escoamento apresenta alternância de sentido, ou seja, pulsos de escoamento com intensidade significativa em ambos os sentidos, contrariando afirmações de Graw (1993a). Dessa forma, indicando a necessidade de uma turbina hidráulica que mantenha o sentido de rotação independente do sentido do escoamento.

Orer e Ozdamar (2007) avaliaram experimentalmente a eficiência do dispositivo como conversor de energia das ondas. Nesse estudo, foi analisado o comportamento da velocidade do escoamento sob a placa quando o dispositivo, em uma altura fixa, é sujeito a diferentes características de ondas incidindo sobre ele. Foram incluídos diferentes níveis de restrição abaixo da placa com formatos retangulares e triangulares. Os autores comprovaram o melhor desempenho da placa horizontal submersa quando a área sob a placa é reduzida (parcialmente obstruída – conforme Graw, 1993b). Porém, indicaram a possibilidade de uma eficiência em torno de 60 % para o dispositivo, contrapondo-se a Graw (1993b; 1995b) que havia predito uma eficiência de apenas 4 %. Além disso, estes propuseram o uso de uma turbina que mantenha o sentido de rotação independente do sentido do escoamento sob a placa, uma vez que, o escoamento apresenta alternância de sentido.

Em estudo recente (Seibt et al., 2014), foi apresentado um modelo numérico bidimensional para o dispositivo de placa horizontal submersa utilizando o MVF e o modelo multifásico VOF. Esse modelo foi validado com base nos resultados experimentais de Orer e Ozdamar (2007), com a reprodução de um caso em que a área abaixo da placa não foi obstruída. Nesse estudo, foram apresentados perfis de velocidade do escoamento sob uma placa com 1,00 m de comprimento para uma onda de características fixas incidindo em seis diferentes alturas da placa. Foi observada a influência da altura da placa sobre a magnitude da velocidade do escoamento sob a mesma e indicada uma eficiência de até 64 %.

No presente artigo foi realizado um estudo numérico bidimensional, utilizando um modelo computacional análogo ao utilizado por Seibt et al. (2014), cuja geometria considerada foi redimensionada em escala a fim de representar um conversor de placa horizontal submersa com dimensões reais. Foram comparados resultados de vazão mássica e velocidade do escoamento sob a placa submersa em ambas as escalas, assim como de sua eficiência. A eficiência foi calculada pela razão entre a potência média disponível do escoamento sob a placa submersa e a potência média da onda incidente, sem considerar a presença da turbina abaixo da placa em ambos os casos.

2.2 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 retangulares. 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).

2.2.1 Modelo matemático e numérico

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 Equações (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 Equação (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 Equações (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).

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 Figura 2.

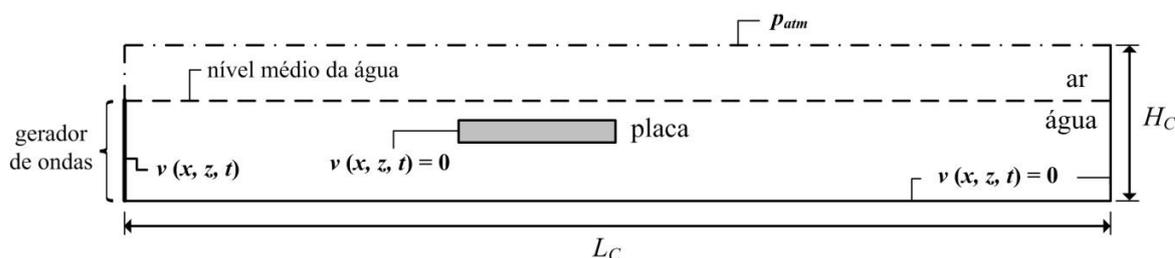


Figura 2: Representação das condições de contorno do domínio computacional

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 Equações (7) e (8) das componentes de velocidade de propagação da onda, nas direções horizontal (x) e vertical (z) da teoria de ondas de Stokes de 2ª ordem, dadas respectivamente como (Dean e Dalrymple, 1991):

$$u(x, z, t) = \frac{H}{2} \left(\frac{gk}{\sigma} \right) \left[\frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)} \right] \cos(kx - \sigma t) + \frac{3}{16} \left[\frac{H^2 \sigma k \cosh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \right] \cos 2(kx - \sigma t) \quad (7)$$

$$w(x, z, t) = \frac{H}{2} \left(\frac{gk}{\sigma} \right) \left[\frac{\sinh k(h+z)}{\cosh(kh)} \right] \sin(kx - \sigma t) + \frac{3}{16} \left[\frac{H^2 \sigma k \sinh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \right] \sin 2(kx - \sigma t) \quad (8)$$

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), h é a profundidade da lâmina de água (m) e t é o tempo (s).

O comprimento de onda (L) é definido, segundo a teoria de ondas de Stokes de 2ª ordem, a partir da equação de dispersão - Equação (9) - e tem seu valor determinado de forma iterativa, por (Dean e Dalrymple, 1991):

$$L = \left(\frac{g}{2\pi} \right) T^2 \tanh \left(\frac{2\pi h}{L} \right) \quad (9)$$

Foram adotados também os seguintes parâmetros de solução: 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 0,3 e 0,7 para as equações da conservação da massa e quantidade de movimento, respectivamente. Todas as simulações do presente trabalho referem-se a um tempo de escoamento de $13T$, onde T é período de onda, e o passo de tempo usado foi de 0,01 s para todos os casos.

2.2.2 Escala de similaridade

A definição de escala, no caso de modelos para estudo de escoamento de fluidos, é determinada por um critério de similaridade, que consiste em um fator de escala que permite estabelecer uma relação entre aspectos fluidodinâmicos do modelo reduzido com aspectos reais do escoamento. Este recurso é usualmente empregado na análise de modelos

experimentais em escala de laboratório para estimar o comportamento de modelos experimentais em escala real (protótipos) (Hughes, 1993).

No caso de estudos experimentais, a utilidade desse recurso é evidenciada pela larga diferença dos custos envolvidos na construção de modelo reduzido e na construção de um protótipo. Já no caso de estudos numéricos, pode ser uma ferramenta para auxiliar a definição do uso de uma ou de outra escala, tendo em vista o custo computacional e a precisão dos resultados. Partindo desta premissa, adotou-se um fator de escala para correlacionar os dois modelos numéricos, em diferentes escalas, baseado no critério de similaridade de Froude.

O critério de Froude, bastante utilizado em estudos de engenharia costeira, estabelece uma relação entre forças de inércia e forças de gravidade para um escoamento e é definido pela Equação (10), como (Hughes, 1993):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gB}} \quad (10)$$

onde V é uma variável de velocidade (m/s), g é a aceleração da gravidade (m/s²) e B é uma variável de comprimento (m).

A partir dessa relação, a escala pode ser criada estabelecendo-se um paralelo entre as dimensões do modelo de laboratório (índice m) e do caso real (índice r), conforme a Equação (11) (Hughes, 1993):

$$\left(\frac{V^2}{gB} \right)_r = \left(\frac{V^2}{gB} \right)_m \quad (11)$$

rearranjando, obtém-se a Equação (12):

$$\left(\frac{V_r^2}{V_m^2} \right) = \left(\frac{g_r}{g_m} \right) \left(\frac{B_r}{B_m} \right) \quad (12)$$

Logo, cada grandeza pode ser adimensionalizada por um fator de escala $N_{(i)}$, como na Equação (13):

$$(N_V)^2 = N_g \cdot N_B \quad (13)$$

Com isso, assumindo condições atmosféricas idênticas para os modelos ($N_g = 1$) e decompondo a escala de velocidade ($N_V = N_B/N_t$), obtém-se uma relação de escalas para as grandezas básicas, dada pela Equação (14), como:

$$N_t = \sqrt{N_B} \quad (14)$$

onde N_t representa o fator de escala de tempo e N_B o fator de escala de comprimento.

Por fim, adotou-se um fator de escala de comprimento $N_B = 16$ e, portanto, o fator de escala de tempo correspondente $N_t = 4$ para redimensionar a onda incidente apresentada no trabalho de Seibt et al. (2014). Dessa forma, a partir das características da onda simulada naquele trabalho, foram determinadas as características equivalentes da onda real (monocromática) adotada nesse trabalho, conforme Tabela 1.

2.2.3 Características do domínio computacional

Assim como as características da onda incidente na placa submersa, o domínio bidimensional de Seibt et al. (2014) também foi redimensionado a partir da escala de similaridade adotada, cujos valores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Características geométricas do modelo

		Seibt et al. (2014)	Presente trabalho
Onda	T (s)	1,50	6,00
	H (m)	0,06	0,96
	L (m)	3,00	47,85
	h (m)	0,60	9,60
Canal	H_C (m)	1,00	16,00
	L_C (m)	20,00	320,00
Placa	L_P (m)	1,00	16,00
	e_P (m)	0,02	0,32

Cabe destacar que o comprimento de onda (L) não foi obtido pela multiplicação direta com o fator escala de comprimento (N_B), mas pela equação de dispersão - Equação (9) - a partir dos valores do período de onda (T) e profundidade da água (h) da cada escala.

Conforme a Figura 3, algumas das dimensões do domínio computacional foram definidas com base nas características da onda simulada. Estas características do domínio foram mantidas do trabalho de Seibt et al. (2014) e, redimensionadas, resultaram em um canal de comprimento $L_C = 320,00$ m.

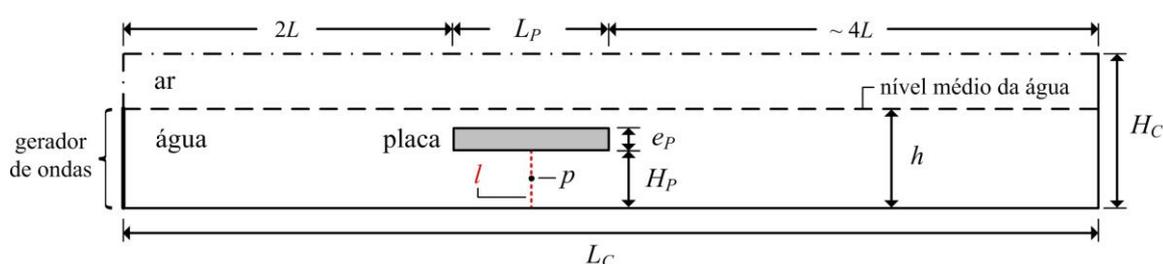


Figura 3: Representação da geometria do domínio computacional

A Tabela 2 apresenta as alturas relativas de placa que foram simuladas e as correspondentes alturas de placa do presente trabalho e do trabalho de Seibt et al. (2014).

Tabela 2: Alturas relativas de placa simuladas

Posição	H_P (m) Seibt et al. (2014)	H_P (m) Presente trabalho	$X = H_P/h$
1	0,53	8,48	88,3 %
2	0,52	8,32	86,7 %
3	0,51	8,16	85,0 %
4	0,50	8,00	83,3 %
5	0,48	7,68	80,0 %
6	0,46	7,36	76,7 %

Para o monitoramento dos dados utilizados na análise, foram inseridas no modelo sondas numéricas na região abaixo da placa. As principais sondas numéricas utilizadas foram um ponto (p), situado na metade do comprimento da placa submersa (L_P) e na metade da

altura da placa (H_P), e uma linha (l) situada na metade do comprimento da placa (L_P) ao longo da altura da placa (H_P – conforme Figura 3). Estas foram utilizadas para monitoramento de velocidades e vazão mássica, respectivamente.

Foram geradas, portanto, 6 malhas para o desenvolvimento deste trabalho, referentes as 6 alturas relativas (X) da placa horizontal submersa. Com o intuito de evitar um elevado número de estudos de refinamento de malha, foram adotadas as recomendações de Ramalhais (2011) referentes à discretização do domínio computacional.

Sendo assim, foi utilizada uma malha estruturada de elementos retangulares distribuídos de forma a proporcionar maior refinamento na região de interface entre as duas fases (água-ar) e também na região próxima ao fundo do canal (Horko, 2007; Ramalhais, 2011). Assim, as dimensões das células não ultrapassaram $L/60$, na direção de propagação da onda, e $H/20$, na direção vertical, na região onde se propaga a onda, bem como, no fundo do canal (Ramalhais, 2011).

2.2.4 Eficiência do conversor tipo placa horizontal submersa

A eficiência (φ) do conversor tipo placa horizontal submersa é definida, pela Equação (15), como (Graw, 1995b; Orer e Ozdamar, 2007):

$$\varphi = \frac{P_P}{P_W} \quad (15)$$

onde P_P é a potência média disponível no escoamento sob a placa (W) e P_W é a potência média da onda incidente no equipamento (W), a qual é definida, na teoria de Stokes de 2ª ordem, pela Equação (16) (McCormick, 1981):

$$P_W = \left(\frac{1}{16} \rho g H^2 \right) \frac{\sigma}{k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \left[1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{k^4 h^6} \right] \quad (16)$$

Já a potência média disponível sob a placa (P_P) é calculada segundo a Equação (17) (Carter, 2005; Dizadji e Sajadian, 2011):

$$P_p = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{-h+H_p} \left(P + \frac{1}{2} \rho u^2 \right) . u dz dt \quad (17)$$

onde P é a pressão estática (Pa) sob a placa e o termo $(\rho u^2/2)$ representa a pressão dinâmica (Pa).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta os resultados da velocidade $u_{máx}$ do escoamento sob a placa horizontal submersa no ponto p (ver Figura 3) de ambas as simulações, ou seja, escala real (presente trabalho) e escala de laboratório (Seibt et al., 2014). Uma vez que a maior magnitude de u é verificada no sentido oposto ao de propagação da onda os valores foram representados em módulo ($| -u_{máx} |$).

Na curva da escala real da Figura 4, observa-se um incremento na magnitude das velocidades do escoamento nessa região, à medida que a altura relativa é reduzida, até um máximo ($X = 80,0 \%$) em torno de 7,5 % maior que o valor registrado para $X = 88,3 \%$ (menor valor). A variação na curva de velocidade, observada para $X = 83,3 \%$, não era esperada, devendo ser analisada posteriormente; entretanto, não prejudica a análise dos resultados.

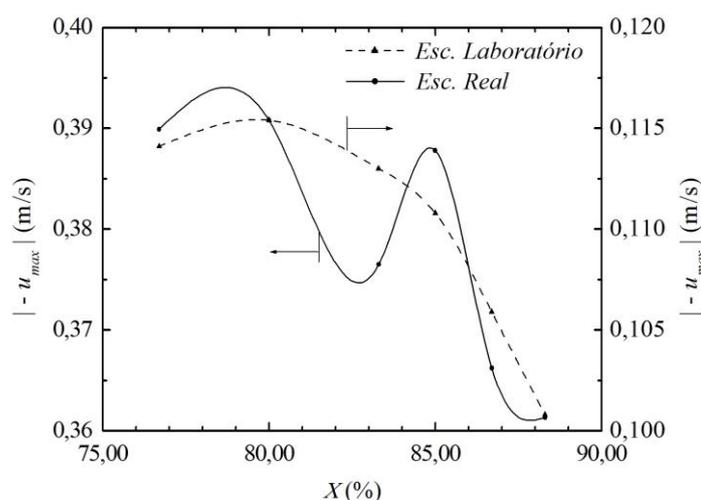


Figura 4: Velocidade $u_{m\acute{a}x}$ sob a placa submersa em p para cada altura relativa (X) estudada em ambas as escalas

Conforme Figura 4 é possível perceber que há uma concordância significativa entre os resultados das diferentes escalas, de forma que as velocidades $u_{m\acute{a}x}$ da escala real são, em média, 3,5 vezes maiores que as velocidades de laboratório, ou seja, as velocidades do modelo em escala de laboratório correspondem a aproximadamente 30 % do valor das velocidades do modelo em escala real. Essa relação se aproxima do valor da razão $N_B/N_t = 4,0$, o que indica, juntamente com a semelhança entre as curvas, que os modelos apresentam similaridade.

Na Figura 5, são apresentados os resultados de vazão mássica (\dot{m}_{RMS}) abaixo da placa submersa na linha l (ver Figura 3) de ambos os trabalhos. Observa-se, na curva da escala real, uma redução de aproximadamente 10 % no valor da vazão com a redução da altura relativa, o que era esperado devido à redução da área abaixo da placa. Comparando-se as duas curvas (Figura 5), percebe-se novamente a concordância entre os resultados, cuja relação não foi diretamente definida na mudança de escala para essa grandeza. Contudo, para as alturas relativas estudadas em ambos os trabalhos, os valores de \dot{m}_{RMS} da escala real foram, em média, 55,5 vezes maiores que os resultados da escala de laboratório. Cabe destacar que a vazão mássica (\dot{m}_{RMS}) foi calculada pela média quadrática RMS (*Root Mean Square*), adotada devido ao escoamento alternar constantemente de sentido.

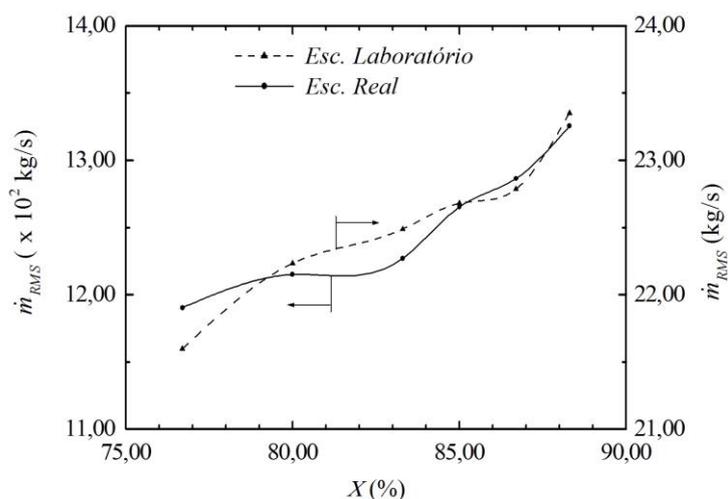


Figura 5: Vazão mássica (\dot{m}_{RMS}) sob a placa em l para cada altura relativa (X) estudada em ambas as escalas

Para avaliar o efeito da variação da altura relativa da placa sobre o desempenho do conversor, foi determinada sua eficiência (φ). A Figura 6 apresenta as curvas de eficiência (φ) do dispositivo, na escala real e de laboratório, para cada X simulado. Pode-se perceber que a curva da escala real apresenta a máxima eficiência para $X = 88,3\%$ ($\varphi = 18,00\%$) e a mínima eficiência para $X = 85,0\%$ ($\varphi = 15,00\%$). Há, ainda, uma sutil recuperação na eficiência após o ponto de mínimo, até o último valor estudado $X = 76,7\%$ ($\varphi = 16,55\%$).

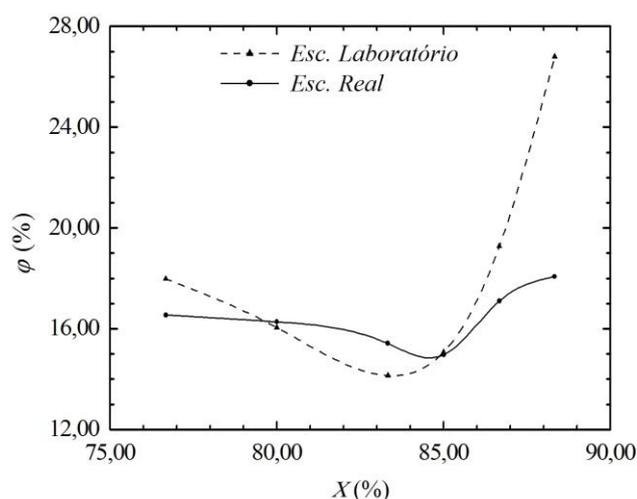


Figura 6: Eficiência do dispositivo (φ) para cada altura relativa (X) estudada em ambas as escalas

Na Figura 6, observa-se, novamente, a concordância entre as curvas das duas escalas, as quais apresentaram uma diferença média de 2 % entre os resultados. Uma observação importante é que o valor máximo ocorreu para a mesma altura relativa nos dois casos ($X = 88,3\%$) e que após o valor mínimo ocorrido nas duas curvas houve um novo aumento na eficiência, mesmo com a mudança do ponto de mínimo.

A observação de todos esses parâmetros permite confirmar que a maior altura relativa é importante para a eficiência do dispositivo de placa horizontal submersa, o que já era esperado com base em Seibt et al. (2014). Além disso, verifica-se, com base nos resultados apresentados, que o uso de uma escala de similaridade entre modelos numéricos pode permitir o uso de modelos em escala de laboratório para predição de resultados com modelos em escala real (modelos bidimensionais).

4. CONCLUSÕES

Este estudo permitiu avaliar o efeito da variação da altura relativa (X) de uma placa horizontal submersa em escala real quanto à eficiência de conversão, considerando seu princípio de funcionamento como conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica. Bem como, analisar a similaridade dos resultados obtidos com os resultados procedentes do modelo em escala de laboratório de Seibt et al. (2014).

A comparação entre os resultados de velocidade ($|-u_{máx}|$) e vazão mássica (\dot{m}_{RMS}) do escoamento, sob a placa submersa, permitiu confirmar uma relação de proporcionalidade dos resultados das duas escalas e a concordância quanto ao comportamento das curvas de cada grandeza. O mesmo foi confirmado quanto à eficiência do equipamento, cuja variação entre os resultados ficou em torno de 2 %.

Os resultados mostraram, para as configurações analisadas, que a definição de uma escala de similaridade a partir de um critério adequado, permite correlacionar resultados de modelos numéricos obtidos em escalas equivalentes, o que era esperado. Essa constatação é importante tendo em vista o menor custo computacional geralmente proporcionado pelos modelos reduzidos. Entretanto, cabe destacar que o presente estudo abordou apenas modelos bidimensionais e o custo computacional dos modelos não foi analisado.

Em estudos futuros, pretende-se analisar a variação de outras características do conversor e da onda incidente considerando a escala de similaridade, bem como, incluir um método de otimização para ampliação do estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- ASTARIZ, S.; PEREZ-COLLAZO, C.; ABANADES, J.; IGLESIAS, G. Towards the optimal design of a co-located wind-wave farm. **Energy**, v. 84, p. 15-24, 2015.
- BROSSARD, J.; CHAGDALI, M. Experimental investigation of the harmonic generation by waves over a submerged plate. **Coastal Engineering**, v. 42, n. 4, p. 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, p. 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.
- CHOZAS, J.F.; SOERENSEN, H.C. State of the art of wave energy in Spain. In: Proc. of 3rd Annual Electrical Power & Energy Conference (EPEC), IEEE, Montreal, Canada, pp. 1-6, 2009.
- CONTESTABILE, P.; FERRANTE, V.; VICINANZA, D. Wave Energy Resource along the Coast of Santa Catarina (Brazil). **Energies**, v. 8, n. 12, p. 14219-14243, 2015.
- CRUZ, J. (Ed.) Ocean wave energy: current status and future perspectives. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 432p., 2008.

- DEAN, R.G.; DALRYMPLE, R.A. Water wave mechanics for engineers and scientists. New Jersey, USA: World Scientific Publishing, 353p., 1991.
- DICK, T.M.; BREBNER, A. Solid and permeable submerged breakwaters. In: Proc. of 11th Coastal Engineering Conference (ASCE), London, UK, pp.1141-1158, 1968.
- DIZADJI, N.; SAJADIAN, S.E. Modeling and optimization of the chamber of OWC system. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 2360-2366, 2011.
- FALCÃO, A.F.O. Wave energy utilization: A review of the Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, p. 899-918, 2010.
- FLUENT (versão 6.3.26), ANSYS, Inc., 2007.
- GAMBIT (versão 2.4.6), ANSYS, Inc., 2006.
- GRAW, K.-U. The submerged plate as a wave filter: the stability of the pulsating flow phenomenon. In: Proc. of 23rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Venice, Italy, pp. 1153-1160, 1992.
- GRAW, K.-U. Shore protection and electricity by submerged plate wave energy converter. In: Proc. of European Wave Energy Symposium, Edinburgh, UK, pp. 379-384, 1993a.
- GRAW, K.-U. The submerged plate wave energy converter: A new type of wave energy device. In: Proc. of International Symposium on Ocean Energy Development (ODEC), Muroran, Hokkaido, Japan, pp. 307-310, 1993b.
- GRAW, K.-U. Is the submerged plate wave energy converter ready to act as a new coastal protection system? In: Proc. of XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Napoli, Italia, pp. 1-9, 1994.
- 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, 1995a.
- GRAW, K.-U. Wellenenergie – eine hydromechanische Analyse. Berlin, Germany: Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, 1995b.
- GUNN, K.; STOCK-WILLIAMS, C. Quantifying the global wave power resource. **Renewable Energy**, v. 44, p. 296-304, 2012.
- HILDEBRANDT, A.; SCHLURMANN, T. Velocity Field Under Propagating Waves Over a Submerged Horizontal Plate and Induced Forces. In: Proc. of Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering, Darmstadt, pp. 24-30, 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, p. 201-225, 1981.
- HORKO, M. CFD optimisation of an oscillating water column energy converter. Australia, 2007. 145p. Dissertação (Master in Engineering Science), 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, p. 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, p. 373-386, 2002.
- HUGHES, S.A. Physical models and laboratory techniques in coastal Engineering. Vol. 7. World Scientific, Singapura, 550p., 1993.
- 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, p. 1332-1345, 2009.

- MARGHERITINI, L.; HANSEN, A.M.; FRIGAARD, P. A method for EIA scoping of wave energy converters – based on classification of the used technology. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 32, n. 1, p. 33-44, 2012.
- MCCORMICK, M.E. Ocean Wave Energy Conversion. New York, USA: Dover Publications, Inc., 256p., 1981.
- NING, D.; LI, Q.; LIN, H.; TENG, B. Numerical Investigation of Nonlinear Wave Scattering by a Horizontal Submerged Plate. **Procedia Engineering**, v. 116, p. 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, p. 1317-1327, 2007.
- PATANKAR, S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York, USA: McGraw Hill, 196p., 1980.
- RAMALHAIS, R.S. Estudo numérico de um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO). Portugal, 2011. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Nova de Lisboa.
- SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. Boundary-layer theory. Berlin, Germany: Springer, 800p., 2000.
- 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, p. 687-700, 2014.
- SON, D.; BELISSEN, V.; YEUNG, R.W. Performance validation and optimization of a dual coaxial-cylinder ocean-wave energy extractor. **Renewable Energy**, v. 92, p. 192-201, 2016.
- 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, p. 3710-3730, 2011.
- 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, p. 1070-1081, 2016.
- VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. An introduction to computational fluid dynamics – the finite volume method. England: Pearson, 503p., 2007.
- VINING, J.G.; MUETZE, A. Economic factors and incentives for ocean wave energy conversion. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 45, n. 2, p. 547-554, 2009.