

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA ALTURA RELATIVA DE UM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR TIPO PLACA SUBMERSA

Flávio Medeiros Seibt (Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio Grande, RS, Brasil).

E-mail: fseibt@furg.br

Liércio André Isoldi (Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Escola de Engenharia, Rio Grande, RS, Brasil).

E-mail: liercioisoldi@furg.br

Paulo Roberto de Freitas Teixeira (Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Escola de Engenharia, Rio Grande, RS, Brasil).

E-mail: pauloteixeira@furg.br

Elizaldo Domingues dos Santos (Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Escola de Engenharia, Rio Grande, RS, Brasil).

E-mail: elizaldosantos@furg.br

Luiz Alberto Oliveira Rocha (Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Departamento de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, RS, Brasil)

E-mail: luizrocha@mecanica.ufrgs.br

Resumo: O elevado potencial energético das ondas do mar torna esse recurso uma importante alternativa como fonte de energia limpa e renovável. O sistema de placa horizontal submersa é um tipo de estrutura utilizada como quebra-mar submerso, para proteção costeira, podendo ser utilizada, também, como conversor de energia das ondas. O objetivo deste estudo é avaliar numericamente o efeito da variação da altura relativa de uma placa submersa (dada pela razão entre a altura da placa e a profundidade da lâmina de água) sobre a eficiência do escoamento que ocorre abaixo da mesma, quando sujeita à incidência de diferentes ondas sobre sua estrutura, e obter dados para recomendações teóricas sobre a geometria do conversor. Para isso, foram simuladas seis ondas com períodos entre 1,25 e 3,50 s, incidindo numa placa submersa com alturas relativas de 86,7, 85,0 e 83,3 %. A eficiência do dispositivo, definida pela razão entre a potência disponível do escoamento sob a placa submersa e a potência média da onda incidente, foi avaliada desconsiderando a presença da turbina abaixo da placa. Nas simulações numéricas foi utilizado um domínio bidimensional que se baseia no modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), para o tratamento da interação água-ar, e no Método de Volumes Finitos, para a solução das equações de conservação de massa e quantidade de movimento. A análise dos dados obtidos permitiu identificar uma eficiência do equipamento aproximadamente três vezes maior para as ondas de maior período em relação às ondas incidentes de menor período, chegando a aproximadamente 27 %.

Palavras-chave: Energia das Ondas do Mar, Placa Horizontal Submersa, *Volume of Fluid* (VOF), Método de Volumes Finitos, Simulação Numérica.

NUMERICAL EVALUATION OF THE EFFECT OF RELATIVE HEIGHT ON THE SUBMERGED PLATE WAVE ENERGY CONVERTER

Abstract: The high energy potential of the ocean waves make this resource an important alternative of clean and renewable energy. The submerged horizontal plate system is a structure type used as submerged breakwater for coastal protection and can be used also as a wave energy converter. The aim of this study is to numerically evaluate the effect of varying the relative height of a submerged plate (given by the ratio between the plate height and depth of the water layer) on the efficiency of the flow which occurs below the plate, when subjected to incidence of different waves on its structure, and obtain data to theoretical recommendations on the converter geometry. For this, six waves were simulated with periods between 1.25 and 3.50 s, and propagated through the submerged plate with relative heights of 86.7, 85.0 and 83.3%. The device efficiency, defined as the ratio of the available power flow under submerged plate and the average power of the incident wave was evaluated disregarding the presence of the turbine below the plate. In numerical simulations were used a two-dimensional domain that is based on the multiphase model *Volume of Fluid* (VOF) for the treatment of air-water interaction, and the Finite Volume Method for the solution of the equations of conservation of mass and momentum. The

data analysis identified an equipment efficiency about three times higher for larger waves period in relation to the incident waves of shorter period, reaching approximately 27%.

Keywords: Ocean Wave Energy, Submerged Horizontal Plate, Volume of Fluid (VOF), Finite Volume Method, Numerical Simulation.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por produção de energia elétrica e a necessidade de preservação dos recursos naturais, tem desencadeado um processo de diversificação das matrizes energéticas com foco no uso de fontes renováveis de energia. Nesse processo, os oceanos tem se destacado como uma das alternativas mais promissoras devido ao seu grande potencial energético.

O potencial energético dos oceanos está distribuído sob diferentes formas, sendo as mais relevantes: a energia ondas, a energia das marés, a energia das correntes marítimas e a energia térmica dos oceanos. No entanto, a maior parte deste recurso concentra-se nas ondas de superfície, cuja energia é expressa geralmente em potência por metro de frente de onda. Regiões com boas médias anuais, como a costa sul da América do Sul, apresentam valores entre 20 e 70 kW/m (FALCÃO, 2010).

Em termos globais, estima-se que a energia das ondas proporcione uma potência em torno de 1 – 10 TW, valor comparável ao consumo médio anual de energia elétrica em todo o mundo. Além disso, é esperado que a energia das ondas proporcione de 15 – 20 vezes mais energia por metro quadrado que a energia eólica ou solar (VINING; MUETZE, 2009). Portanto, mesmo usando valores conservadores para a eficiência dos conversores de energia das ondas em energia elétrica, as perspectivas são boas o suficiente para estimularem pesquisas científicas e tecnológicas para o aproveitamento desta fonte de energia.

Diversas soluções têm surgido para o aproveitamento da energia das ondas, porém atualmente nenhuma delas ocupa uma posição 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; SOERENSEN, 2009).

Diferentes critérios são utilizados para classificar os conversores, os 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, são geralmente presos ao fundo; próximos da costa (*near-shore*) – situados em região com profundidades entre 20 e 50 m, podem ser presos ao fundo ou flutuantes; ou afastados da costa (*offshore*) – situados em região com profundidades maiores que 50 m, são geralmente flutuantes (CRUZ; SARMENTO, 2004). Já o segundo critério agrupa os conversores pelo seu princípio de funcionamento, da seguinte forma: coluna de água oscilante, corpos oscilantes e galgamento (FALCÃO, 2010). Entretanto, esta classificação não contempla todas as possibilidades existentes de converter a energia das ondas em energia elétrica; outros princípios de funcionamento podem ser usados, como é o caso do conversor do tipo placa 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, podendo ser utilizada, também, como conversor de energia das ondas (GRAW, 1993a; BROSSARD et al., 2009). Sua utilização como conversor apresenta 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. 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 conversor tipo placa submersa, apresentando resultados de análises numéricas que relacionem as características da onda incidente sobre a estrutura com a potência disponível no escoamento sob a placa, i.e., sem considerar a presença da turbina abaixo da placa. Esta relação foi quantificada por uma eficiência avaliada com base na razão entre a potência da onda incidente e a potência disponível do escoamento sob a placa submersa.

Para tanto, foram simuladas ondas com períodos de 1,25, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 e 3,50 s, incidindo numa placa submersa com alturas relativas (X) de 86,7, 85,0 e 83,3 %. 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, $X = H_p/h$. Foram analisadas as variações em parâmetros, como pressão e velocidade do escoamento, que permitem obter recomendações teóricas sobre a geometria do conversor que possibilite melhor desempenho, em função do clima de ondas que incide sobre o dispositivo. Nas simulações numéricas foi utilizado um domínio bidimensional que se baseia no modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF – HIRT; 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; MALALASEKERA, 2007), para a solução das equações de conservação de massa e quantidade de movimento.

2. CONVERSOR DE PLACA SUBMERSA

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

Mais tarde, experimentos de Graw (1992), apresentaram este equipamento como um eficiente filtro de ondas, sendo vantajoso em relação a outros quebra-mares submersos especialmente pelo escoamento que ocorre sob a placa. Este escoamento foi descrito como um fluxo pulsante que ocorre durante a passagem da onda sobre a placa e apresenta 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.

O conversor de placa submersa 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).

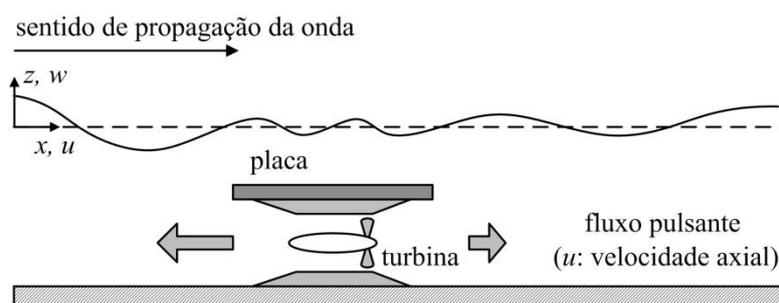


Figura 1 – Representação do dispositivo de placa submersa.

Este conversor apresenta algumas vantagens 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) como o fluxo pulsante sob a placa tem o sentido predominante contrário ao da propagação das ondas, uma turbina hidráulica comum pode ser utilizada, proporcionando uma redução de custos de implantação do sistema; (iv) a dupla utilização também contribui para esta redução de custos, logo, se a turbina está captando energia, o sistema atua como filtro de ondas e conversor de energia, mas se a região abaixo da placa estiver completamente bloqueada, o sistema atua como um quebra-mar submerso convencional; (v) como o dispositivo é totalmente submerso, a influência sobre o meio ambiente é reduzida (GRAW, 1994).

Mesmo tendo-se no trabalho de Graw (1994) a apresentação da placa submersa como um dispositivo de duplo propósito, onde se enfatiza sua vocação como conversor de energia das ondas, a maior parte dos estudos a respeito do assunto são voltados para seu uso como quebra-mar submerso (HSU; WU, 1999; BROSSARD; CHAGDALI, 2001; HU et al., 2002; HILDEBRANDT; SCHLURMANN, 2008; LIU et al., 2009). Estes estudos, no entanto, são de grande importância para a melhor compreensão dos fenômenos relacionados ao escoamento em torno da placa submersa.

No estudo de Carter (2005), o sistema de placa horizontal submersa é abordado 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. Ao apresentar o campo de velocidades sob a placa, obtido por este modelo, contribui para o entendimento do escoamento pulsante que se desenvolve sob a mesma em decorrência da passagem das ondas. Os resultados evidenciaram, contudo, que este escoamento é alternante, contrariando afirmações de Graw (1993a), e, assim, indicando a necessidade de uma turbina hidráulica que mantenha o sentido de rotação independente do sentido do escoamento.

Orer e Ozdamar (2007) apresentam resultados experimentais de avaliação da eficiência do dispositivo como conversor de energia das ondas. Nesse estudo os autores analisaram 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 e incluíram ainda diferentes níveis de restrição abaixo da placa com formatos retangulares e triangulares. Em seus resultados, comprovam o melhor desempenho da placa submersa quando a área sob a placa é reduzida (conforme Graw, 1993b), porém, indicam a possibilidade de uma eficiência em torno de 60 % para o dispositivo, contrapondo-se às conclusões de Graw (1993b; 1995b) que havia predito uma eficiência de apenas 4 %. Além disso, propõem a necessidade de uma turbina que mantenha o sentido de rotação independente do sentido do escoamento sob a placa, uma vez que, mesmo ocorrendo pulsos de maior magnitude no sentido contrário ao de propagação das ondas, o escoamento apresenta alternância de sentido.

Em outro estudo recente (SEIBT et al., 2014), é apresentado um modelo numérico bidimensional para o dispositivo de placa submersa baseado no MVF e no modelo multifásico VOF. Esse modelo foi validado com base nos resultados experimentais de Orer e Ozdamar (2007), a partir da reprodução de um caso em que não há restrições ao escoamento sob a placa. Nesse estudo são 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 profundidades relativas da placa, mostrando uma relação entre a profundidade relativa da placa e a magnitude da velocidade do escoamento sob a mesma.

No presente artigo é realizado um estudo numérico bidimensional com modelo computacional análogo ao utilizado por Seibt et al. (2014) a fim de se avaliar a influência da variação da altura relativa (X) da placa submersa e das características da onda incidente em relação ao comportamento do escoamento sob a placa.

3. MODELAGEM COMPUTACIONAL

O modelo computacional foi desenvolvido com base na Dinâmica dos Fluidos Computacional empregando os *softwares* GAMBIT (GAMBIT, 2006) e FLUENT (FLUENT, 2007). O primeiro foi utilizado para construção e discretização de um domínio bidimensional com malha estruturada de elementos retangulares. O segundo é um programa computacional baseado no MVF, que permite a modelagem de escoamentos de fluidos e de transferência de calor em geometrias complexas, o qual foi utilizado para executar a solução das equações de conservação de massa e quantidade de movimento.

O MVF é uma técnica matemática que permite obter uma versão discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP). Diferentemente de outros métodos, entretanto, ele fundamenta-se em uma abordagem física do problema representado pela EDP, sendo um método amplamente utilizado em aplicações de engenharia que envolvam dinâmica de fluidos; como, por exemplo: aerodinâmica, hidrodinâmica, interação fluido-estrutura e moldagem de polímeros (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

3.1 Modelo Matemático

3.1.1 Modelo do Escoamento

As equações de conservação da massa e da quantidade de movimento para resolução de um escoamento isotérmico, laminar e incompressível, com presença de duas fases (água-ar), são dadas por (SCHLICHTING; 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 (kg/m s).

Para a representação da 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.

A fração de volume (α_q) é usada para representar ambas as fases no interior do volume de controle. Nesse modelo, as frações de volume são assumidas como contínuas no espaço e no tempo. Além disso, a soma das frações de volume, no interior do volume de controle, são sempre unitárias ($0 \leq \alpha_q \leq 1$). Sendo assim, se $\alpha_{\text{água}} = 0$ a célula está sem água e preenchida de

ar ($\alpha_{ar} = 1$) e se a célula tem a presença de ambos os fluidos (água e ar), uma fase é o complemento da outra, ou seja, $\alpha_{ar} = 1 - \alpha_{água}$. Portanto, é necessária uma equação de transporte adicional para a fração de volume, dada como (SRINIVASAN et al., 2011):

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

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 e podem ser escritos como (SRINIVASAN et al., 2011):

$$\rho = \alpha_{água} \rho_{água} + \alpha_{ar} \rho_{ar} \tag{5}$$

$$\mu = \alpha_{água} \mu_{água} + \alpha_{ar} \mu_{ar} \tag{6}$$

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; 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) e a distância entre o nível médio da superfície da água até o fundo do mar (profundidade, h). A Figura 2 apresenta a representação das características das ondas.

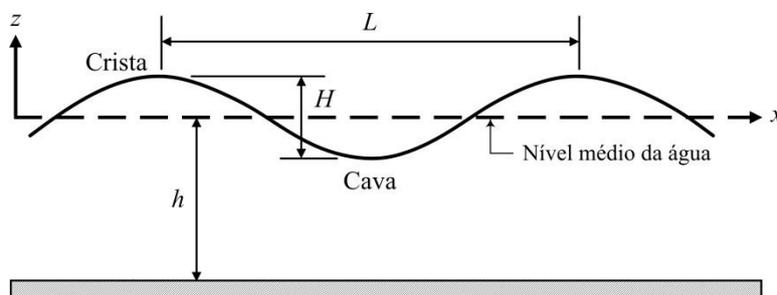


Figura 2 – Principais características de uma onda (adaptado de Dean e Dalrymple, 1991).

O comprimento de onda (L) é definido pela teoria de ondas de Stokes de 2ª ordem a partir da equação de dispersão e seu valor determinado, de forma iterativa por (DEAN; DALRYMPLE, 1991):

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

Já as componentes de velocidade de propagação da onda, nas direções horizontal (x) e vertical (z), são dadas, a partir da teoria de Stokes de 2ª ordem, respectivamente como (DEAN; DALRYMPLE, 1991):

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

$$w(x, z, t) = \frac{H}{2} \left(\frac{gk}{\sigma} \right) \left[\frac{\sinh k(h+z)}{\cosh(kh)} \right] \sin(kx - \sigma t) + \frac{3}{16} \left[\frac{H^2 \sigma k \sinh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \right] \sin 2(kx - \sigma t) \tag{9}$$

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

3.1.3 Condições de Contorno

Para completar o modelo matemático é necessário considerar, ainda, as 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 3.

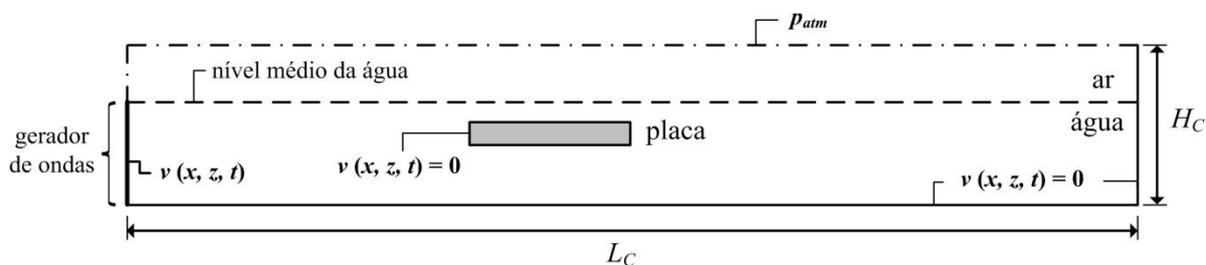


Figura 3 – Representação das condições de contorno do domínio computacional.

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 (8) e (9) das componentes de velocidade de propagação da onda, nas direções horizontal (x) e vertical (z) da teoria de ondas de Stokes de 2ª ordem.

Dessa forma, foram simuladas seis ondas de diferentes períodos, com altura fixa ($H = 0,06 \text{ m}$), cujas características são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características das ondas simuladas.

Onda	T (s)	L (m)	L / L_P
1	1,25	2,27	0,91
2	1,50	3,00	1,20
3	2,00	4,36	1,74
4	2,50	5,67	2,27
5	3,00	6,95	2,78
6	3,50	8,21	3,30

3.2 Características Geométricas do Domínio Computacional

Para a simulação numérica do dispositivo de placa submersa considerou-se a representação bidimensional de um canal de ondas, de altura $H_C = 1,00 \text{ m}$ e com profundidade da lâmina de

água $h = 0,60$ m, com a presença de uma placa horizontal, de espessura $e_p = 0,02$ m e comprimento $L_p = 2,50$ m, abaixo da superfície da água, conforme Figura 4.

Na Figura 4, algumas das dimensões do domínio computacional foram definidas com base nas características de cada onda simulada. Estas dimensões foram fixadas como forma de garantir condições mínimas para a formação das ondas antes de chegarem à placa e, também, garantindo um número mínimo de ondas incidentes sobre a placa antes da ocorrência de reflexão das ondas no fundo do canal (região após a placa). Assim, permitindo, também, a obtenção de uma quantidade suficiente de dados para análise.

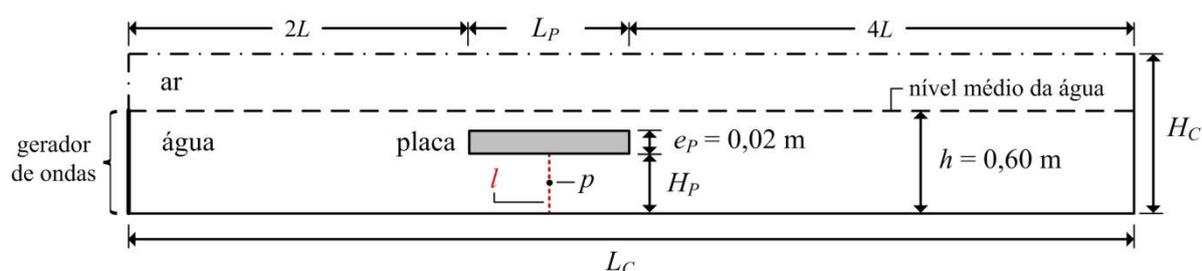


Figura 4 – Representação das condições de contorno do domínio computacional.

Cabe destacar, que o comprimento da placa submersa ($L_p = 2,50$ m) foi definido com base em estudos anteriores (SEIBT et al., 2012a; 2012b) deste mesmo grupo de pesquisa; além disso, que as larguras do canal e da placa foram desconsideradas uma vez que o modelo numérico é bidimensional.

Para o monitoramento dos dados utilizados nas análises comparativas, 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 e na metade da altura da placa (H_p), e uma linha (l) situada na metade do comprimento da placa ao longo da placa submersa (conforme Figura 4). Estas foram utilizadas para monitoramento de velocidades e vazão mássica, respectivamente; para os dados de pressão, o monitoramento se deu de forma análoga ao monitoramento de velocidades.

No presente estudo, foram avaliadas três alturas relativas (X) da placa submersa, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Relação de alturas relativas simuladas.

Placa	H_p (m)	$X = H_p/h$
1	0,52	86,7 %
2	0,51	85,0 %
3	0,50	83,3 %

3.3 Características da Malha e do Modelo de Simulação

Quanto à discretização do domínio computacional, 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 tanque. Ao longo da região de propagação das ondas a malha foi limitada a dimensões mínimas de $H/20$ na direção vertical e $L/60$ na direção horizontal, critérios semelhantes aos adotados por Ramalhais (2011).

Foram geradas, portanto, 18 malhas para o desenvolvimento deste trabalho, combinando as 6 diferentes ondas e as 3 alturas relativas. Com o intuito de evitar um elevado

número de estudos de independência de malha, foram acolhidas as recomendações de Ramalhais (2011) referentes à discretização do domínio computacional, que demonstraram serem eficientes em estudos anteriores. Desta forma, as dimensões das células não ultrapassam $L/60$, na direção de propagação da onda, e $H/20$, na direção vertical, na região onde se manifesta a onda e no fundo do canal.

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 referem-se a um tempo de escoamento de $13T$, onde T é período de onda, e o passo de tempo usado foi de 0,001 s para todos os casos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um dos parâmetros analisados nas simulações foi a velocidade horizontal (u) máxima do escoamento sob a placa submersa, no ponto p (ver Figura 4) em sentido oposto ao de propagação da onda (sentido de maior magnitude), cujo comportamento é apresentado na Figura 5.

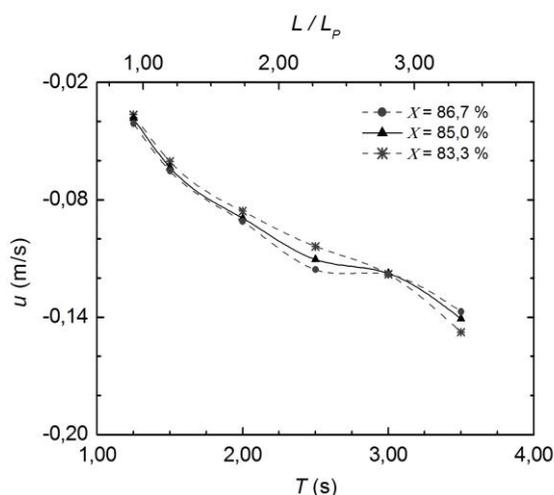


Figura 5 – Velocidade $u_{máx}$ sob a placa submersa em p para cada X e T estudado.

Na Figura 5, pode-se observar um incremento significativo na magnitude das velocidades do escoamento nessa região, em torno de 3,5 vezes, com o aumento do período da onda incidente. É possível perceber, também, que as ondas de períodos menores que 3,00 s ($L/L_P < 2,78$) apresentaram uma tendência de redução da velocidade máxima à medida que a altura relativa X diminuiu. No entanto, essa tendência inverte-se para relações $L/L_P > 2,78$. Por outro lado, para $T = 3,00$ s, percebe-se claramente que as relações de X estudadas não interferiram na variação dos valores de $u_{máx}$ ($L/L_P = 2,78$).

Essa informação é importante do ponto de vista de conversão de energia, pois fornece um indicativo da velocidade de rotação da turbina. Cabe ressaltar que o sinal negativo destes valores de velocidade (Figura 5) indica apenas um movimento em sentido contrário ao de propagação das ondas.

Com a análise da vazão mássica (Figura 6), portanto, percebe-se que a mesma apresenta um comportamento análogo ao da velocidade, ou seja, há também um acréscimo na magnitude da vazão de massa efetiva – dada pela média quadrática RMS (*Root Mean*

Square); de aproximadamente 3 vezes. A razão de adotar-se a vazão mássica RMS, deve-se ao fato de que o escoamento alterna constantemente de sentido.

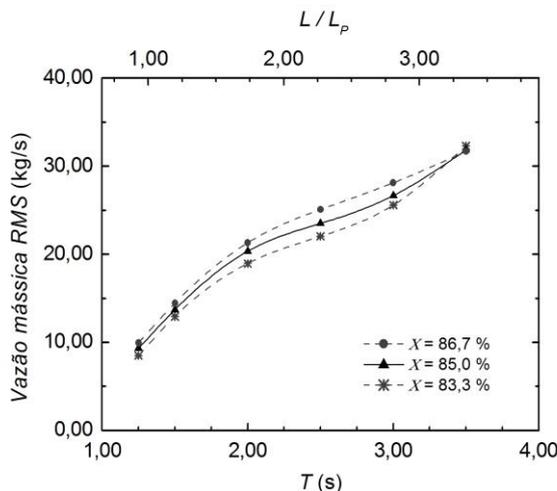


Figura 6 – Vazão mássica RMS sob a placa submersa para cada X e T estudado.

No entanto, para investigar a influência do período da onda incidente no desempenho do conversor, é necessário determinar a eficiência de conversão. A eficiência (ϕ) deste conversor é definida por (GRAW, 1995b; CARTER, 2005; ORER; OZDAMAR, 2007):

$$\phi = \frac{P_p}{P_w} \tag{10}$$

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). Esta potência é definida na teoria de Stokes de 2ª ordem como (MCCORMICK, 1981):

$$P_w = \left(\frac{1}{16} \rho g H^2 \right) \frac{\sigma}{k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \left[1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{k^4 h^6} \right] \tag{11}$$

Já a potência média disponível sob a placa (P_p) é calculada segundo a expressão (DIZADJI; SAJADIAN, 2011):

$$P_p = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{-h+H_p} \left(P + \frac{1}{2} \rho u^2 \right) u dz dt \tag{12}$$

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

A partir da equação da potência média da onda incidente, Equação (11), percebe-se que a característica da onda de maior relevância para sua potência é a altura de onda (H), parâmetro este que foi fixado em mesmo valor para todas as ondas simuladas. No entanto, o número de onda (k) é determinado a partir do comprimento de onda (L) e, portanto, existe um acréscimo de energia da onda incidente a cada incremento no período da onda, como é possível perceber na Figura 7. Esse acréscimo de energia da onda fica em torno de 2 vezes, da onda de menor período para a de maior período, ou seja, bastante menor que o incremento percebido na velocidade do escoamento.

Já a eficiência do dispositivo determinada para cada período de onda, tem seu comportamento apresentado conforme a Figura 8, onde se pode perceber um claro aumento de

eficiência do dispositivo com o aumento do período da onda incidente, aproximadamente 2,5 vezes maior, com o aumento do período da onda, se comparados o menor e o maior períodos de onda estudados neste trabalho.

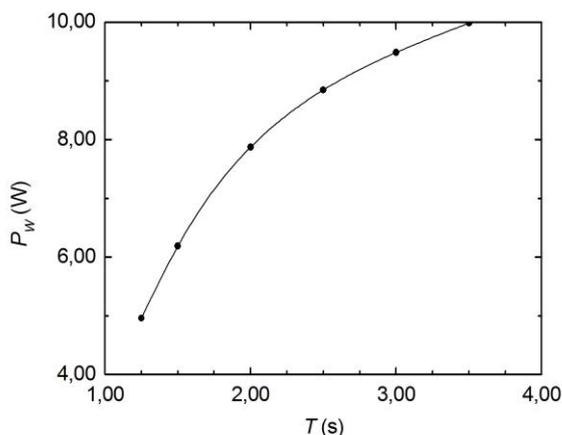


Figura 7 – Potência média da onda incidente em relação ao período.

Outra observação, na Figura 8, é a baixa variação dos valores de eficiência para as ondas de período $T = 1,25$ s ($L/L_p = 0,91$) e $T = 3,50$ s ($L/L_p = 3,30$), percebida nas 3 curvas do gráfico, evidenciando a relevância do comprimento relativo da placa, conforme Graw (1994; 1998).

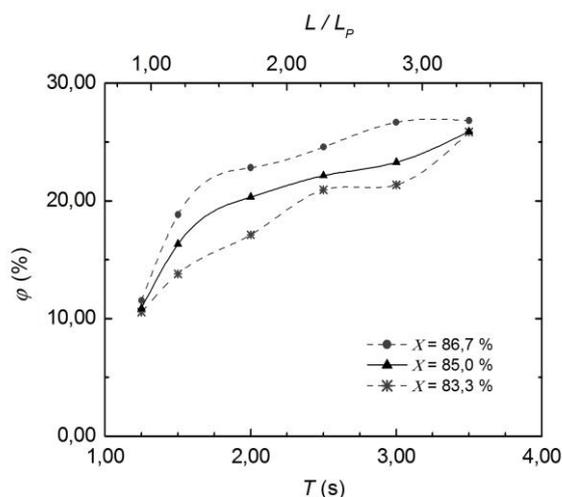


Figura 8 – Eficiência do conversor de placa submersa para cada X e T estudado.

A observação de todos esses parâmetros permite confirmar que o potencial energético da onda incidente é determinante para a eficiência do dispositivo de placa submersa, o que já era esperado. Entretanto, percebe-se também a importância do comprimento relativo da placa, onde as ondas de maior período ($L/L_p > 2,00$) apresentam maior ganho de eficiência relativamente às demais (Figura 8). Por sua vez, a redução da altura relativa X da placa submersa acarretou em uma redução dos valores de eficiência para todos os casos estudados.

5. CONCLUSÕES

Este estudo permitiu avaliar os efeitos da variação da altura relativa X de uma placa horizontal submersa em relação à variação do período de onda incidente, para uma faixa de períodos de 1,25 a 3,50 s, considerando seu princípio de funcionamento como conversor de energia das

ondas do mar em energia elétrica.

Em relação à análise da velocidade máxima do escoamento, da vazão mássica e da potência da onda incidente, os resultados evidenciaram a potência da onda incidente (resultante da variação do período de onda) como parâmetro determinante sobre as variações observadas nos demais parâmetros, para os casos estudados.

Com a análise destes parâmetros verificou-se que a onda de maior potência, em relação a de menor potência, apresentou um aumento da velocidade máxima do escoamento de 250 % e da vazão mássica RMS em torno de 350 %. Variações essas, ocorridas em uma situação onde a potência da onda aumentou 100 % para a faixa de períodos de onda analisadas.

Em relação à eficiência do equipamento, seu incremento foi de aproximadamente 27 %. A baixa variação da eficiência, observada para $T = 1,25$ s e $T = 3,50$ s, permitiram inferir a relevância do comprimento relativo da placa, concluindo-se que para $L/L_p > 2,00$ há um maior ganho de eficiência. Por sua vez, a redução da altura relativa X da placa submersa, acarretou uma redução dos valores de eficiência para todos os casos estudados, o que aponta para um melhor desempenho do dispositivo em uma altura relativa $X = 86,7$ %, dentre os valores estudados.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem a CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

BROSSARD, J.; CHAGDALI, M. *Experimental investigation of the harmonic generation by waves over a submerged plate. Coastal Engineering*, v. 42, n. 1, 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. Msc. Thesis, University of Hawai'i, Manoa, Honolulu, HI, USA, 2005.*

CHOZAS, J.F.; SOERENSEN, H.C. *State of the art of wave energy in Spain. In: Proc. of IEEE 3rd Annual Electrical Power and Energy Conference (EPEC), IEEE, Montreal, QC, Canada, p. 1-6, 2009.*

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

DEAN, R.G.; DALRYMPLE, R.A. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., USA, 1991.*

DICK, T.M.; BREBNER, A. *Solid and permeable submerged breakwaters. In: Proc. of 11th Coastal Engineering Conference (ASCE), London, UK, p. 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, p. 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, p. 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, p. 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, p. 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.* Bericht Nr. 8 des Lehr- und Forschungsgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft, Bergische Universität – Gesamthochschule, Wuppertal, Germany, 1995b.

GRAW, K.-U. *Wave energy, need for protection – possible uses.* In: Proc. of Expo'98 – The Oceans, a Heritage for the Future, Lisboa, Portugal, 1998.

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, p. 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.* Msc. Thesis, The University of Western Australia, Australia, 2007.

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, 1999.

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, p. 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, p. 1332-1345, 2009.

MCCORMICK, M.E. *Ocean Wave Energy Conversion*. Dover Publications, Inc. Mineola, NY, USA, 1981.

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*. McGraw Hill, New York, 1980.

RAMALHAIS, R.S. *Estudo numérico de um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO)*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2011.

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

SEIBT, F.M.; COUTO, E.C.; TEIXEIRA, P.R.F.; DOS SANTOS, E.D.; ISOLDI, L.A. *Estudo Numérico de uma Placa Submersa Vista como Quebra-Mar e Conversor de Energia das Ondas*. In: Anais do V Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil, p. 108-115, 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 a Submerged Plate Wave Energy Converter*. In: Proc. of 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012b.

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.

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.

VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method*. Pearson, England, 2007.

VINING, J.G.; MUETZE, A. *Economic factors and incentives for ocean wave energy conversion*. *Industry Applications, IEEE Transactions*, v. 45, n. 2, p. 547-554, 2009.