



# REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS



ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DA VARIAÇÃO CONJUNTA DO  
COMPRIMENTO E DA ALTURA RELATIVA DE UM CONVERSOR DE ENERGIA  
DAS ONDAS TIPO PLACA HORIZONTAL SUBMERSA<sup>1</sup>

FLÁVIO MEDEIROS SEIBT<sup>2</sup>, LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA<sup>2</sup>, ELIZALDO  
DOMINGUES DOS SANTOS<sup>3</sup>, LIÉRCIO ANDRÉ ISOLDI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Apresentado no 7º Conferência Sul em Modelagem Computacional (MCSul) e do VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMGNO).

<sup>2</sup>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.com<sup>2</sup>, luizrocha@mecanica.ufrgs.br<sup>3</sup>.

<sup>3</sup>Escola de Engenharia (EE), Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Avenida Itália km 8, 96203-900, Rio Grande, RS, Brasil, elizaldosantos@furg.br<sup>4</sup>, liercioisoldi@furg.br<sup>5</sup>.

## RESUMO

Os oceanos concentram uma grande quantidade de energia, disponível, principalmente, nas ondas do mar, fazendo desse 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 e pode ser utilizado, também, como conversor de energia das ondas. O objetivo deste estudo é analisar numericamente o efeito da variação conjunta do comprimento e da altura relativa de um conversor tipo placa horizontal submersa sobre a sua eficiência de conversão, bem como sobre o comportamento do escoamento que ocorre abaixo da placa e, assim, obter dados para recomendações teóricas sobre a geometria do conversor. Para tanto,

foi simulada uma onda com período de 3,00 s incidindo numa placa submersa com quatro diferentes comprimentos e disposta em alturas relativas de 88,3, 83,3 e 76,7 %. A eficiência de conversão do dispositivo foi avaliada 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 menor comprimento e maior altura relativa pode levar a uma eficiência do equipamento aproximadamente três vezes maior que a configuração com maior comprimento e menor altura relativa, chegando a aproximadamente 42 %, entre os casos estudados.

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

**NUMERICAL STUDY ABOUT THE EFFECT OF THE JOINT VARIATION OF LENGTH AND RELATIVE HEIGHT OF A SUBMERGED HORIZONTAL PLATE TYPE WAVE ENERGY CONVERTER**

**ABSTRACT**

The oceans concentrate a great amount of energy, available, mainly, in the sea waves. Thus, sea waves are an important alternative source of clean and renewable energy. The submerged horizontal plate system is a structure used as a breakwater and can also be used as a wave energy converter. The aim of this study is to numerically analyze the effect of joint variation of the length and relative height of a submerged horizontal plate type converter on its conversion efficiency, as well as, on the flow behavior that occur below the plate and, thus, obtain theoretical recommendation about the geometry of the converter. For that, an incident wave in the submerged plate was simulated with a period of 3.00 s. The plate had four different lengths and was arranged at relative heights of 88.3, 83.3 and 76.7 %. The conversion efficiency of the device was evaluated 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 by 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 smaller length and greater relative height can lead to an efficiency of the equipment approximately three times greater than the configuration with greater length and smaller relative height, reaching approximately 42 % between the cases studied.

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

## 1. INTRODUÇÃO

Em um contexto global de crescente demanda energética, especialmente por eletricidade, e da 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 pelo seu alto potencial energético (Falcão, 2010; Margheritini et al., 2012).

A energia dos oceanos está disponível sob diferentes formas, sendo as mais relevantes: a energia das ondas, a energia das marés, a energia das correntes marítimas e a energia térmica dos oceanos (Uihlein e Magagna, 2016). No entanto, as ondas de superfície concentram a maior parte deste recurso, cuja disponibilidade global de energia está 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).

Além disso, 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 usando valores conservadores para a 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).

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 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: (i) costeiros (*shoreline*) — situados em região com profundidades de até 20 m — que são geralmente presos ao fundo; (ii) próximos da costa (*near-shore*) — situados em região com profundidades entre 20 e 50 m — que podem ser presos ao fundo e flutuantes ou (iii) 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: coluna de água oscilante, corpos oscilantes e galgamento (Cruz, 2008). Estes critérios, no entanto, 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, podendo ser utilizada, também, como conversor de energia das ondas (Graw, 1993a; Carter, 2005; 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 (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 conversor tipo placa horizontal submersa, apresentando resultados de análises numéricas que relacionem as características geométricas do dispositivo de placa horizontal submersa com sua eficiência. Esta eficiência foi quantificada por uma razão entre a potência média disponível do escoamento sob a placa e a potência média da onda incidente, sem considerar a presença da turbina abaixo da placa. Além disso, foi avaliado o efeito da variação da geometria sobre grandezas que caracterizam o escoamento, como vazão mássica e velocidade, permitindo obter recomendações teóricas sobre a geometria do conversor que proporciona um melhor desempenho do dispositivo.

Para tanto, foram simulados quatro comprimentos de placa ( $L_P$ ) dispostos em três alturas relativas ( $X$ ) diferentes. Os comprimentos de placa foram avaliados como frações do comprimento de onda ( $L$ ) da onda incidente, ou seja, como  $L_P/L = 0,25, 0,50, 0,75$  e  $1,00$ . Já a altura relativa da placa ( $X$ ), definida pela razão entre a altura da placa ( $H_P$ ) e a profundidade da lâmina de água ( $h$ ), ou seja,  $X = H_P/h$ , foi avaliada em valores de  $88,3, 83,3$  e  $76,7\%$ . A onda incidente considerada teve características fixadas como: período de onda  $T = 3,00$  s, comprimento de onda  $L = 6,95$  m e altura de onda  $H = 0,06$  m. 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 – Hirt e Nichols, 1981; Srinivasan et al., 2011). O Método de Volumes Finitos (MVF – Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 2007) foi empregado para a solução das equações de conservação de massa e quantidade de movimento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Conversor Tipo Placa Horizontal Submersa

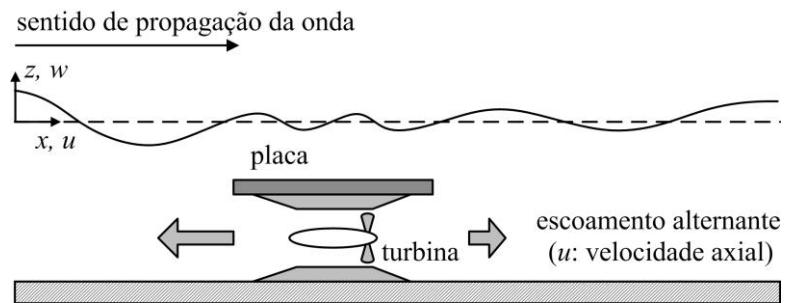
O dispositivo de placa horizontal submersa consiste de uma placa plana e imersa, horizontalmente, abaixo da superfície livre do mar. A passagem das ondas pelo dispositivo, origina um escoamento sob a placa, que alterna periodicamente de sentido, absorvendo energia das ondas incidentes. Assim, esse dispositivo pode atuar tanto como conversor de energia das ondas do mar em eletricidade, aproveitando esse escoamento 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 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 Figura 1) instalada sob a mesma (Graw, 1993a; 1993b; 1994; 1995a).



**Figura 1:** Representação do dispositivo de placa horizontal 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) a dupla funcionalidade da estrutura contribui para a redução de custos, pois, se a turbina estiver captando energia, o sistema atua como filtro de ondas e conversor de energia, mas 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 interferência visual sobre o ambiente é reduzida (Graw, 1994).

Apesar da potencialidade apresentada por Graw (1994) para o sistema de placa submersa, como um dispositivo de dupla atuação, 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 abaixo da 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, mesmo ocorrendo pulsos de maior magnitude no sentido contrário ao de propagação das ondas, 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 empregando 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, foi avaliada a influência da altura relativa da placa e da redução da área livre abaixo da placa sobre o comportamento do escoamento considerando uma placa com 1,00 m de comprimento e uma onda incidente de características fixas (período de onda  $T = 1,50$  s, comprimento de onda  $L = 3,00$  m e altura de onda  $H = 0,06$  m). Foram apresentados perfis de velocidade do escoamento sob uma placa e observado um aumento de três vezes na velocidade do escoamento, com uma redução em torno de 63 % na área abaixo da placa em

um caso analisado, porém com perda de 5,5 % na eficiência. Entre os casos sem redução da área sob a placa, os resultados indicaram uma eficiência de até 27 %.

Outro trabalho recente (Gomes et al., 2015) apresentou resultados de um estudo de variação do comprimento de uma placa horizontal submersa para cinco comprimentos diferentes a uma altura relativa fixa de 88,3 %. Os resultados obtidos, com a incidência de uma onda com as mesmas características de Seibt et al. (2014), mostraram pouca influência do comprimento da placa sobre a eficiência do dispositivo, a qual apresentou um valor em torno de 20 % para a onda considerada, independentemente do comprimento da placa.

No presente artigo foi realizado um estudo numérico bidimensional, com o mesmo modelo computacional utilizado por Seibt et al. (2014) e Gomes et al. (2015), a fim de se avaliar a influência da variação do comprimento ( $L_P$ ) e da altura relativa ( $X$ ) da placa horizontal submersa, concomitantemente, em relação a eficiência do dispositivo e ao comportamento do escoamento sob a placa.

## 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 do domínio bidimensional e sua discretização com uma 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 ferramenta 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 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  $\rho$  é a massa específica ( $\text{kg/m}^3$ ),  $u$  e  $w$  são as componentes horizontal e vertical, respectivamente, da velocidade do escoamento ( $\text{m/s}$ ),  $p$  é a pressão ( $\text{N/m}^2$ ),  $\rho g$  é o empuxo ( $\text{N/m}^3$ ) e  $\mu$  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, as quais são consideradas imiscíveis, i.e., o volume ocupado por uma fase não pode ser ocupado pela outra fase.

Nesse modelo, as frações de volume ( $\alpha_q$ ), 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  $\alpha_{água} = 0$  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 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 e podem ser escritos, conforme as Equações (5) e (6), como (Srinivasan et al., 2011):

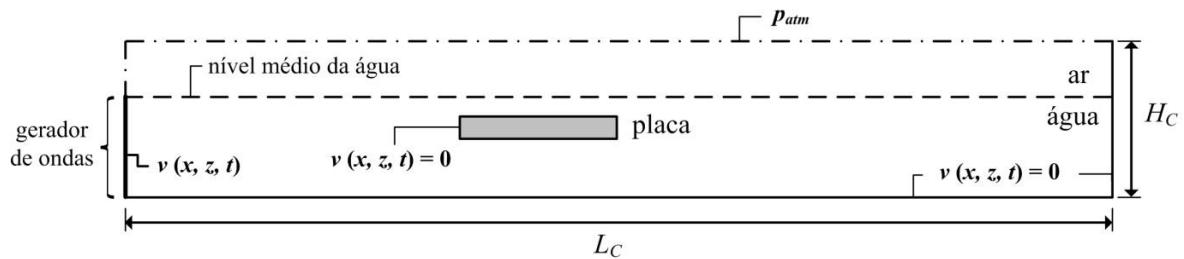
$$\rho = \alpha_{água}\rho_{água} + \alpha_{ar}\rho_{ar} \quad (5)$$

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

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.

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).



**Figura 2:** Representação das condições de contorno do domínio computacional

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 2<sup>a</sup> 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  $k = 2\pi/L$  ( $\text{m}^{-1}$ ),  $L$  é o comprimento de onda (m),  $\sigma$  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).

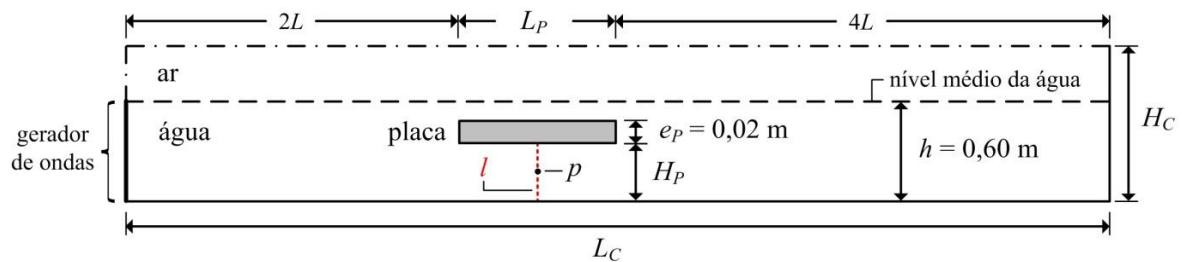
Foram adotados também os seguintes parâmetros de solução: esquema de advecção UPWIND de 1<sup>a</sup> ordem para tratamento dos termos advectivos; PRESTO para discretização espacial da pressão; GEO-RECONSTRUCTION para a discretização da fração volumétrica; PISO como método de acoplamento pressão-velocidade; fatores de sub-relaxação 0,3 e 0,7 para as equações da conservação da massa e quantidade de movimento, respectivamente.

A onda incidente considerada teve características fixadas como: período de onda  $T = 3,00 \text{ s}$ , comprimento de onda  $L = 6,95 \text{ m}$  e altura de onda  $H = 0,06 \text{ m}$ . 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  $0,001 \text{ s}$  para todos os casos.

### 2.2.2 Características do domínio computacional e da malha

Para a simulação numérica do dispositivo de placa horizontal 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  $h = 0,60 \text{ m}$ , com a presença de uma placa horizontal, de espessura  $e_P = 0,02 \text{ m}$ , abaixo da superfície da água, conforme Figura 3.

Na Figura 3, algumas das dimensões do domínio computacional foram definidas com base nas características da 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 a obtenção de uma quantidade suficiente de dados para análise.



**Figura 3:** Representação da geometria do domínio computacional

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 ( $L_P$ ) 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 submersa ( $H_P$  – conforme Figura 3). 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.

Cabe destacar que os quatro comprimentos de placa ( $L_P$ ) analisados, foram definidos com base em frações do comprimento de onda ( $L$ ) da onda incidente simulada, conforme apresentado na Tabela 1, e que o comprimento do canal ( $L_C$ ), uma vez vinculado às dimensões da onda e da placa horizontal submersa, também teve dimensões diferentes para cada caso simulado, como mostrado na Tabela 1. Além disso, as larguras do canal e da placa foram desconsideradas uma vez que o modelo numérico é bidimensional.

**Tabela 1:** Comprimentos de placa e do canal simulados ( $L = 6,95$  m)

Placa	$L_P$ (m)	$L_P/L$	$L_C$ (m)
1	7,00	1,00	48,70
2	5,20	0,75	46,90
3	3,50	0,50	45,20
4	1,70	0,25	43,40

No presente estudo, cada um dos diferentes comprimentos de placa selecionados foi avaliado em três diferentes alturas relativas ( $X$ ) da placa horizontal submersa, conforme Tabela 2.

Foram geradas, portanto, 12 malhas para o desenvolvimento deste trabalho, combinando os 4 diferentes comprimentos ( $L_P$ ) e as 3 alturas relativas ( $X$ ) da placa horizontal submersa. Com o intuito de evitar um elevado número de estudos de qualidade de malha, foram adotadas as recomendações de Ramalhais (2011) referentes à discretização do domínio computacional, que se mostraram adequadas em estudos anteriores (Seibt et al., 2013; Seibt, 2014; Seibt et al., 2015).

**Tabela 2:** Alturas relativas de placa simuladas ( $h = 0,60$  m)

Posição	$H_P$ (m)	$X = H_P/h$
1	0,53	88,3 %
2	0,50	83,3 %
3	0,46	76,7 %

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; Barreiro, 2009). Para isso, 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).

### 2.2.3 Eficiência do conversor tipo placa horizontal submersa

Para analisar o efeito da variação do comprimento e da altura relativa da placa sobre o desempenho do conversor, foi determinada a eficiência de conversão. A eficiência ( $\varphi$ ) deste conversor é definida pela Equação (9) (Graw, 1995b; Orer e Ozdamar, 2007):

$$\varphi = \frac{P_P}{P_W} \quad (9)$$

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 2<sup>a</sup> ordem, pela Equação (10), como (McCormick, 1981):

$$P_W = \left( \frac{1}{16} \rho g H^2 \right) \frac{\sigma}{k} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \left[ 1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{k^4 h^6} \right] \quad (10)$$

Já a potência média disponível sob a placa ( $P_P$ ) é calculada segundo a Equação (11) (Carter, 2005; Dizadji e Sajadian, 2011):

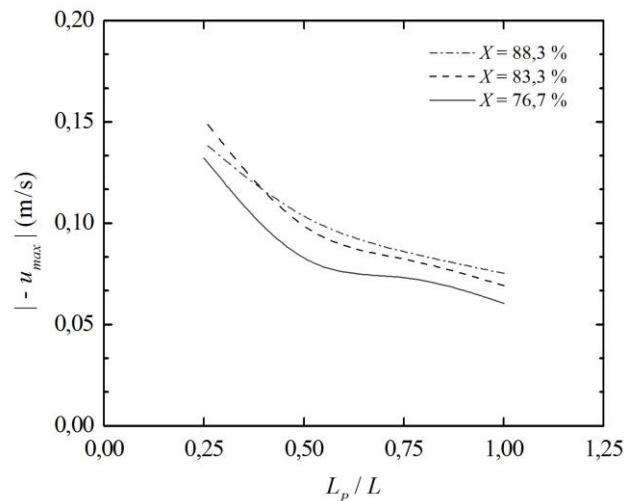
$$P_P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{-h+H_p} \left( P + \frac{1}{2} \rho u^2 \right) u dz dt \quad (11)$$

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

Um dos parâmetros analisados nas simulações foi a velocidade horizontal ( $u$ ) máxima do escoamento sob a placa horizontal submersa (no ponto  $p$ , ver Figura 3) em sentido oposto ao de propagação da onda (sentido de maior magnitude), cujo comportamento é apresentado na Figura 4.

Na Figura 4, pode-se observar um incremento significativo na magnitude das velocidades do escoamento nessa região, em torno de 2 vezes, para o menor comprimento da placa ( $L_p/L = 0,25$ ) em relação aos demais comprimentos simulados. É possível perceber, também, que para os maiores comprimentos de placa ( $L_p/L \geq 0,50$ ) as maiores velocidades ocorrem quando a placa está mais próxima à superfície da água ( $X = 88,3\%$ ), o que não ocorre para o menor comprimento de placa simulado ( $L_p/L = 0,25$ ) quando a maior velocidade ocorre para  $X = 83,3\%$ .

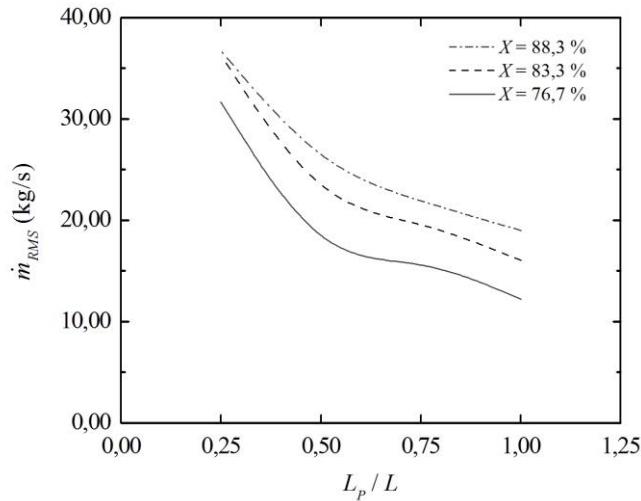


**Figura 4:** Velocidade  $u_{\max}$  sob a placa em  $p$  para cada comprimento de placa ( $L_p$ ) e altura relativa ( $X$ ) estudados

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 estas velocidades ocorrem no sentido contrário ao de propagação das ondas, portanto ( $-u$ ), razão pela qual os valores foram plotados em módulo ( $|-u_{\max}|$  - Figura 4).

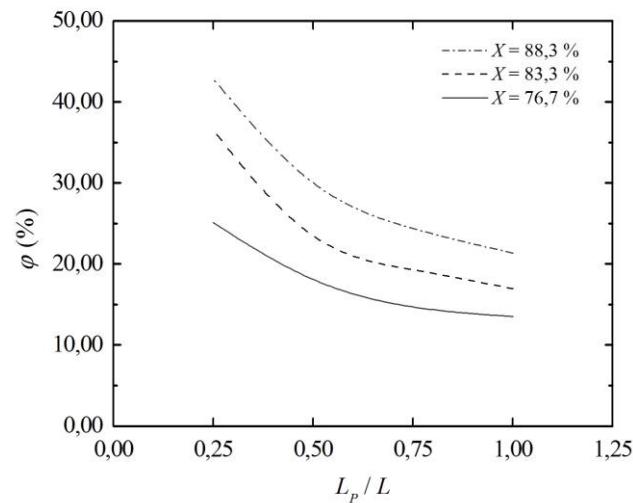
Com a análise da vazão mássica (Figura 5), observa-se que a mesma apresenta um comportamento análogo ao da velocidade, ou seja, há também um acréscimo na magnitude da vazão mássica ( $\dot{m}_{RMS}$ ) de, aproximadamente, 2 vezes para o menor comprimento de placa simulado ( $L_p/L = 0,25$ ) em relação aos maiores comprimentos. Na Figura 5 percebe-se, também, que os maiores valores de  $\dot{m}_{RMS}$  ocorrem para a maior altura relativa simulada ( $X =$

88,3 %). A vazão mássica ( $\dot{m}_{RMS}$ ) foi determinada pela média quadrática RMS (Root Mean Square), a qual foi adotada devido ao escoamento alternar constantemente de sentido.



**Figura 5:** Vazão mássica ( $\dot{m}_{RMS}$ ) sob a placa em  $l$  para cada comprimento de placa ( $L_p$ ) e altura relativa ( $X$ ) estudados

A Figura 6 apresenta o comportamento da eficiência ( $\varphi$ ) do dispositivo para cada  $X$  simulado em relação ao comprimento da placa.



**Figura 6:** Eficiência do dispositivo ( $\varphi$ ) para cada comprimento de placa ( $L_p$ ) e altura relativa ( $X$ ) estudados

Percebe-se, conforme Figura 6, um claro crescimento na eficiência do dispositivo, aproximadamente 2 vezes maior, com a redução do comprimento da placa, se comparados o maior e o menor comprimento simulados neste trabalho. Outra observação importante é o aumento da eficiência para a maior altura relativa estudada ( $X = 88,3\%$ ), evidenciando a relevância deste parâmetro.

A observação de todos esses parâmetros permite confirmar que a maior altura relativa é adequada para a maior eficiência do dispositivo de placa horizontal submersa quando não há restrição ao escoamento sob a mesma, o que já era esperado com base em Seibt et al. (2014). Entretanto, percebe-se também a importância do comprimento da placa, onde os maiores comprimentos ( $L_p/L \geq 0,50$ ) apresentam menor ganho de eficiência com a variação da altura relativa, quando comparados com o menor comprimento estudado ( $L_p/L = 0,25$ ), o que não foi observado nos casos analisados em Gomes et al. (2015). Por sua vez, a redução da altura relativa ( $X$ ) da placa horizontal submersa acarretou em uma redução dos valores de eficiência para todos os casos estudados.

#### 4. CONCLUSÕES

Este estudo permitiu avaliar os efeitos da variação do comprimento ( $L_p$ ) e da altura relativa ( $X$ ) de uma placa horizontal submersa em relação à eficiência de conversão para uma onda incidente de período  $T = 3,00$  s e altura  $H = 0,06$  m, 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, o caso de configuração  $L_p/L = 0,25$  e  $X = 83,3\%$  apresentou a maior magnitude de velocidade ( $|-u| = 0,15$  m/s), enquanto que o caso de configuração  $L_p/L = 1,00$  e  $X = 76,7\%$  apresentou a menor magnitude ( $|-u| = 0,06$  m/s). Já para a vazão mássica, o caso de configuração  $L_p/L = 0,25$  e  $X = 88,3\%$  apresentou o maior valor ( $\dot{m}_{RMS} = 36,73$  kg/s) enquanto o caso de configuração  $L_p/L = 1,00$  e  $X = 76,7\%$  apresentou a menor magnitude ( $\dot{m}_{RMS} = 12,23$  kg/s). Quanto à eficiência do equipamento, o melhor caso foi o de configuração  $L_p/L = 0,25$  e  $X = 88,3\%$ , onde  $\varphi = 42,85\%$ , já o pior caso foi o de configuração  $L_p/L = 1,00$  e  $X = 76,7\%$ , onde  $\varphi = 13,51\%$ .

Os resultados mostraram, para as configurações analisadas, que uma redução de 75 % no comprimento da placa proporcionou um acréscimo de até 20 % na eficiência, dependendo da altura da placa considerada; por sua vez, um acréscimo de 11,6 % na altura da placa levou a um ganho de até 18 % na eficiência dependendo do comprimento de placa considerado. Portanto, conclui-se que há um maior ganho de eficiência para geometrias cuja configuração combine menores comprimentos de placa ( $L_p/L < 0,50$ ) e maiores alturas relativas ( $X > 83,3\%$ ), uma vez que, entre a pior e a melhor configuração geométrica analisadas, houve um ganho de 29,34 % na eficiência.

Em estudos futuros, pretende-se analisar o efeito da variação das características da onda incidente sobre estas e outras configurações geométricas, bem como, aplicar o método Design Construtal (Bejan e Lorente, 2008) para auxiliar na ampliação do estudo e na obtenção de uma geometria de maior eficiência.

## 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.
- BARREIRO, T. Estudo da interacção de uma onda monocromática com um conversor de energia. Portugal, 2009. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Nova de Lisboa.
- BEJAN, A.; LORENTE, S. Design with Constructal Theory. Hoboken, USA: Wiley, 548p., 2008.
- 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.
- 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.
- GOMES, M.N.; LARA, M.F.E.; IAHNKE, S.L.P.; MACHADO, B.N.; GOULART, M.M.; SEIBT, F.M.; DOS SANTOS, E.D.; ISOLDI, L.A.; ROCHA, L.A.O. Numerical approach of the main physical operational principle of several wave energy converters: oscillating water column, overtopping and submerged plate. **Defect and Diffusion Forum**, Trans Tech Publications, v. 362, p. 115-171, 2015.
- 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 Universitaet – 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.

- 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. Análise Numérica do Princípio de Funcionamento do Conversor de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Placa Submersa. Rio Grande, RS, Brasil, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Universidade Federal do Rio Grande.
- 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**, v. 6, n. 6, p. 525-534, 2014.
- 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, p. 102-115, 2015.
- SEIBT, F.M.; SOUZA, J.A.; DOS SANTOS, E.D.; TEIXEIRA, P.R.F.; ISOLDI, L.A. Análise Numérica da Eficiência do Conversor de Energia das Ondas Tipo Placa Submersa. In: Proc. of XXXIV Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), Pirenópolis, GO, Brazil, pp. 1-13, 2013.
- 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.