



# REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

## ANÁLISE GEOMÉTRICA DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE DE UM DISPOSITIVO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE NA FORMA TRAPEZOIDAL<sup>1</sup>

MATEUS DAS NEVES GOMES<sup>2</sup>, LEANDRO FERRES CASSEL<sup>3</sup>, ELIZALDO  
DOMINGUES DOS SANTOS<sup>4</sup>, LIÉRCIO ANDRÉ ISOLDI<sup>5</sup>, LUIZ ALBERTO  
OLIVEIRA ROCHA<sup>6</sup>

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

<sup>2</sup>Professor do Instituto Federal do Paraná (IFPR), *Campus* Paranaguá, mateus.gomes@ifpr.edu.br .

<sup>3</sup>Aluno do curso Técnico em Mecânica do IFPR, leandro\_hp7@hotmail.com .

<sup>4</sup>Professor da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), elizaldosantos@furg.br .

<sup>5</sup>Professor da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), liercioisoldi@furg.br .

<sup>6</sup>Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), luizrocha@mecanica.ufrgs.br .

**RESUMO** – Este trabalho apresenta um estudo numérico bidimensional sobre a análise da geometria na forma trapezoidal de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica. O princípio de funcionamento é o de coluna de água oscilante (CAO). O objetivo é maximizar a potência hidropneumática absorvida pelo dispositivo quando submetido a um clima de ondas real. É empregado Design Construtal para analisar dois graus de liberdade:  $\beta$  que é o ângulo formado pela parede frontal do dispositivo CAO com a

superfície livre (ângulo da base do trapézio) enquanto o outro grau de liberdade é  $H_3$  que é a profundidade de submersão do dispositivo. A relação  $H_2/l$ , (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO) é mantida constante. As restrições do problema são a área de entrada e a área total da câmara CAO que são mantidas constantes. Para a solução numérica é empregado um código de dinâmica dos fluidos computacional, FLUENT®, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). O modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) é aplicado no tratamento da interação água-ar. Foi possível verificar a influência dos dois graus de liberdade analisados no aproveitamento da energia da onda incidente, o melhor desempenho foi obtido quando  $\beta = 30^\circ$  e  $H_3 = 9,50$  m, por outro lado o pior desempenho ocorre quando  $\beta = 80^\circ$  e  $H_3 = 10,25$  m. Isso representa um em termos de potência hidropneumática um acréscimo de cerca de sete vezes no desempenho do dispositivo.

**Palavras-Chave:** Coluna de água Oscilante, Forma trapezoidal, Modelo multifásico.

## GEOMETRIC ANALYSIS OF TWO DEGREE OF FREEDOM OF AN OSCILLATING WATER COLUMN DEVICE IN THE TRAPEZOIDAL FORM

**Abstract** – The present paper presents a numerical study about the geometric analysis of an ocean Wave Energy Converter (WEC) into electrical energy, in the trapezoidal form. The operational principle is based on the Oscillating Water Column (OWC). The main goal is to seek for the optimal geometry which maximizes the absorbed power take off (PTO) when it is subjected to a real wave characteristic. To do so, Constructal Design is employed varying the degree of freedom (DOF)  $\beta$  (angle formed by the front wall of the OWC device with the free surface) and  $H_3$  (lip submergence), while the other DOF  $H_2/l$  (ratio between height and length of chimney) is kept fixed. The chamber and total areas of OWC device are also kept fixed, being the problem constraints. For the numerical solution it is used the Computational Fluid Dynamic (CFD) commercial code FLUENT®, based on the Finite Volume Method (FVM). The multiphase Volume of Fluid (VOF) model is applied to tackle with the water-air interaction. It was possible to verify the influence of the two degree of freedom analyzed without taking advantage of the incident wave energy. The best performance was obtained

when  $\beta = 30^\circ$  e  $H_3 = 9.50$  m. On the other hand, the worst case occurs when  $\beta = 80^\circ$  e  $H_3 = 10.25$  m. One can note that the optimal shape is approximately seven times more efficient than the worst geometry, showing the applicability and relevance of the Constructal Design method in the design of OWC-WEC.

**Key words:** Oscillating Water Column, trapezoidal form, Volume of fluid.

## INTRODUÇÃO

Os países ultimamente têm investido na exploração de novas fontes de energia, e em especial nas chamadas fontes renováveis de energia. E uma dessas é a transformação da energia contida nos oceanos em energia elétrica. Segundo Cruz e Sarmento (2004), a energia contida nos oceanos pode ter origens distintas, o que gera diferentes classificações. As mais relevantes são, a energia das marés, fruto da interação dos campos gravíticos da lua e do sol; a energia térmica dos oceanos, consequência direta da radiação solar incidente; a energia das correntes marítimas, cuja origem está nos gradientes de temperatura e salinidade e na ação das marés; e, a energia das ondas, que resulta do efeito do vento na superfície do oceano.

Uma classificação possível para as diferentes tecnologias está associada ao modo de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica, isto é, ao tipo de dispositivo. Assim, existem fundamentalmente três classes principais de conversores de energia das ondas (Cruz e Sarmento, 2004), que são: coluna de água oscilante (CAO); corpos flutuantes, podendo ser de absorção pontual (*point absorbers*) ou progressivos (*surging devices*); e galgamento (*overtopping*). Esta classificação não encerra a possibilidade de existirem outros tipos de dispositivos. Um exemplo é o dispositivo que utiliza uma placa horizontal em conjunto com uma turbina, ambos submersos (Carter, 2005).

O objetivo deste trabalho é analisar a geometria de um dispositivo do tipo CAO na forma trapezoidal para o melhor aproveitamento da energia presente em um clima de ondas estabelecido. Este trabalho é semelhante ao desenvolvido em Gomes et. al (2013) e uma sequencia ao estudo de Gomes et. al (2015). É empregado Design Construtal para analisar dois graus de liberdade:  $\beta$  que é o ângulo formado pela parede frontal do dispositivo CAO com a superfície livre (ângulo da base do trapézio) enquanto o outro grau de liberdade é  $H_3$

que é a profundidade de submersão do dispositivo. A relação  $H_2/l$ , (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO) é mantida constante. As restrições do problema são a área de entrada e a área total da câmara CAO que são mantidas constantes. É importante ressaltar que este estudo é realizado de forma numérica. Espera-se que, caso o princípio se mostre adequado para a otimização geométrica de casos mais simplificados, o mesmo possa ser extrapolado para dispositivos reais a serem inseridos no mar.

A modelagem do domínio computacional (câmara e tanque de ondas) é feita no software GAMBIT® e as simulações numéricas foram realizadas com um código computacional implementado no aplicativo de dinâmica dos fluidos computacional FLUENT®, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF) (Fluent, 2006; Versteeg e Malalasekera, 2007). O modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) (Hirt e Nichols, 1981) é aplicado no tratamento da interação água-ar, semelhante ao utilizado por (Horko, 2007; Liu et al., 2008a; Liu et al., 2008b; Gomes, 2010; Liu et al., 2011; Ramalhais, 2011). O domínio computacional é representado por um tanque de ondas com um dispositivo CAO acoplado. Assim foi possível analisar o conversor sujeito a incidência de ondas regulares em escala real.

## ASPECTOS COMPUTACIONAIS

### *Princípio de funcionamento do dispositivo Coluna de Água Oscilante*

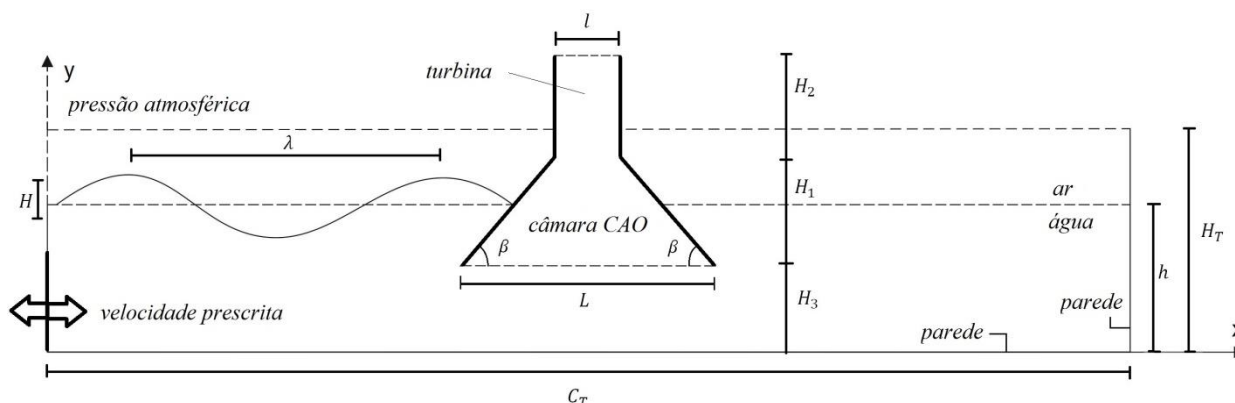
Os dispositivos de Coluna de Água Oscilante (CAO) são estruturas de concreto ocas parcialmente submersas, abertas para o mar abaixo da superfície livre da água como mostra a Fig. 1. De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), o processo de transformação da energia das ondas do mar em energia elétrica segue duas fases: quando uma onda entra na estrutura o ar que se encontrava dentro dela é forçado a passar por uma turbina, como consequência direta do aumento de pressão na "câmara de ar". Quando a onda regressa ao mar o ar passa novamente na turbina, desta vez no sentido inverso, dada a pressão inferior no interior da "câmara de ar". Para aproveitar estes movimentos opostos, normalmente, utiliza-se a turbina do tipo *Wells*, que possui a propriedade de manter o sentido de rotação independentemente do

sentido do escoamento. O grupo turbina/gerador é o responsável pela produção de energia elétrica (Cruz e Sarmiento, 2004; Nielsen et al., 2006; Twidell e Weir, 2006; Gomes, 2010).

### ***Representação Computacional***

Uma possibilidade de representação computacional da interação fluido estrutura, ou seja, da incidência das ondas oceânicas em dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica é considerar um tanque de ondas, com a inserção do dispositivo a ser analisado, conforme empregado nos trabalhos de (Horko, 2007; Liu et. al 2008a; Gomes, 2009). A técnica consiste em gerar, de forma numérica, ondas regulares (com características constantes).

Para representar o problema numa escala adequada no domínio computacional é necessário o conhecimento de algumas características do clima de ondas, como: período ( $T$ ), altura ( $H$ ) e profundidade de propagação ( $h$ ). Com estas características definidas é possível determinar o comprimento ( $C_T$ ) e a altura do tanque de ondas ( $H_T$ ). Conforme a representação esquemática apresentada na Fig. 2. Não existe uma regra geral que estabeleça as dimensões do tanque de ondas, porém algumas questões devem ser consideradas. A profundidade de propagação da onda é a mesma do tanque, representada por  $h$ . Para o comprimento do tanque é preciso considerar o comprimento da onda ( $\lambda$ ). É recomendável que o comprimento do tanque deva ser aproximadamente cinco vezes maior que o comprimento da onda. Assim garante-se a simulação numérica da onda sem efeitos de reflexão por um tempo razoável de propagação.



**Figura 1.** Representação esquemática do domínio computacional – Câmara CAO no formato trapezoidal.

Com relação à altura do tanque é preciso considerar a profundidade mais a altura da onda. Assim é possível definir que a altura do tanque seja dada pela profundidade mais pelo menos duas vezes a altura da onda. É importante destacar que a medida  $H_3$  esta relacionada ao quanto o dispositivo CAO está submerso em relação à superfície livre. O clima de ondas considerado no presente trabalho tem as seguintes características:  $T = 5,0$  s,  $H = 1,0$  m,  $\lambda = 37,6$  m,  $h = 10,0$  m,  $C_T = 188$  m,  $H_T = 13$  m e  $H_3 =$  variável (9,00; 9,25; 9,50; 9,75; 10,00; 10,25 m).

### **Condições de Contorno**

Como é possível observar na Fig. 1, o gerador de ondas numérico é posicionado no lado esquerdo do tanque de ondas. Para a geração de ondas regulares, com características constantes, é empregada a Metodologia Função, definida em Gomes et. al (2009). Esta metodologia consiste em aplicar as componentes horizontal ( $u$ ) e vertical ( $w$ ) da velocidade da onda como condição de contorno (velocidade de entrada prescrita) no modelo computacional, através de uma função definida pelo usuário, UDF (*user define function*), no FLUENT®. Essas componentes da velocidade variam em função do espaço e do tempo e são baseadas na Teoria de Stokes de 2ª ordem. Assim, as equações impostas na superfície de entrada são dadas por (McCormick, 1976; Dean e Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005):

$$u = Agk \frac{\cosh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + A^2 \omega k \frac{\cosh 2k(k + z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (1)$$

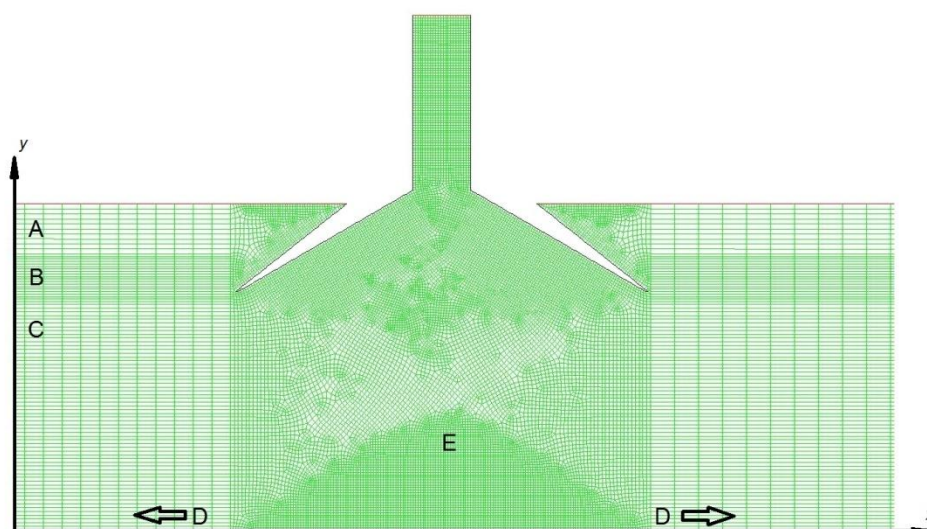
$$w = Agk \frac{\sinh(kz + kh)}{\omega \sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) + A^2 \omega k \frac{\sinh 2k(k + z)}{\cosh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (2)$$

onde:  $H$  é a altura da onda ( $m$ );  $g$  a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );  $\lambda$  é o comprimento da onda ( $m$ ),  $k$  é o número de onda dado por  $k = 2\pi/\lambda$  ( $m^{-1}$ );  $h$  é a profundidade ( $m$ );  $T$  é o período da onda ( $s$ );  $\omega$  é a frequência dada por  $\omega = 2\pi/T$  ( $Hz$ );  $x$  é a posição espacial ( $m$ );  $t$  é o tempo ( $s$ ) e  $z$  é a variação da posição entre a superfície livre da água e o fundo do mar ( $m$ ).

Com relação às outras condições de contorno, na parte superior da superfície lateral esquerda, bem como na superfície superior do tanque e da saída da chaminé da CAO é aplicada uma condição de contorno de pressão atmosférica (vide superfície tracejada nas Fig. 1). Nas demais superfícies do tanque de ondas: superfície inferior e superfície lateral direita é imposta uma condição de não-deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula. Com relação às condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso, com profundidade  $h = 10,0$  m.

### Discretização

Para a geração da malha foi adotada uma estratégia que tem como objetivo gerar uma malha mais refinada em determinadas regiões de interesse no domínio computacional, como a superfície livre por exemplo. Essa metodologia é baseada na técnica de malhas *stretched* (Mavripilis, 1997). Como pode ser observado na Fig. 3, na direção vertical o tanque de ondas é dividido em três regiões denominadas A, B e C. Na região da superfície livre da água (Região B) é adotado um refinamento com 40 volumes na direção vertical (o tamanho desse intervalo é equivalente a  $H/20$ ) e com 250 volumes na direção horizontal (intervalo equivalente a  $\lambda/50$ ). Além disso, 10 e 60 volumes são usados na direção vertical para a discretização espacial das regiões A e C, respectivamente, de acordo com Barreiro (2009) e Gomes et. al (2012a). Para completar o domínio computacional, quadriláteros com 0.1 m de lado foram utilizados na discretização do dispositivo CAO (região E).



**Figura 2.** Esquema de discretização para as diferentes regiões do domínio computacional.

## MODELO MATEMÁTICO

### *Design construtal aplicado a um dispositivo CAO na forma trapezoidal*

A Teoria *Constructal* explica como a geração de estruturas submetidas a alguma espécie de fluxo que são vistas em qualquer lugar na natureza (secção transversal de rios, pulmões, movimentação de massas na atmosfera, tecidos vascularizados entre outros) pode ser fundamentada através de um princípio do acesso aos fluxos no tempo. Este princípio é a lei *Constructal*, que afirma que para um determinado sistema persistir ao longo do tempo (sobreviver) sua configuração geométrica deve evoluir de forma a facilitar o acesso das correntes do fluxo através deste sistema (Bejan e Lorente, 2008). O Design Construtal é um método empregado para a obtenção de formas geométricas ótimas de sistemas submetidos a alguma espécie de fluxo. De acordo com este método o fluxo é maleável e a geometria é deduzida a partir de um princípio de maximização do desempenho global. Além disso, a geometria deve ser submetida a restrições globais e variada de acordo com seus graus de liberdade (Bejan, 2000). Para aplicar Design Construtal na otimização geométrica de um sistema físico é necessário um objetivo (uma grandeza a ser otimizada: vazão mássica, potência, energia e etc), graus de liberdade (parâmetros geométricos que podem variar durante

o processo de otimização) e restrições geométricas (parâmetros que são mantidos constantes ao longo do processo de otimização).

Neste trabalho é variado o grau de liberdade  $\beta$  (ângulo formado pela parede frontal do dispositivo CAO com a superfície livre - ângulo da base do trapézio, vide Fig. 1). Este grau de liberdade  $\beta$  é relacionado com as demais características geométricas da câmara CAO através da seguinte equação:

$$\tan(\beta) = \frac{2H_1}{(L-l)} \quad (3)$$

A área de entrada da câmara do dispositivo CAO ( $A_1$ ) e a área total do dispositivo CAO ( $A_2$ ) são mantidas constantes e são as restrições geométricas do problema, assim como em (Gomes et. al, 2015). A relação  $H_2/l$  (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) é mantida constante. São considerados seis diferentes valores do grau de liberdade  $H_3$  (profundidade de submersão da câmara CAO): 9,00; 9,25; 9,50; 9,75; 10,00; 10,25 m.

O objetivo é sempre levar em conta o clima de ondas para a variação da geometria do dispositivo CAO. Assim, como critério para a definição da restrição da área de entrada da câmara do dispositivo CAO ( $A_1$ ) considera-se a situação inicial em que o comprimento do dispositivo CAO ( $L$ ) é igual ao comprimento da onda incidente ( $\lambda$ ) e que a altura do dispositivo CAO ( $H_1$ ) é igual à altura da onda incidente ( $H$ ). E para determinar a restrição da área total do dispositivo CAO ( $A_2$ ) é definido que  $A_1$  representa 70 % de  $A_2$ , ou seja:  $A_2 = 1,43A_1$ .

Variando o grau de liberdade  $\beta$  é possível determinar as dimensões testadas neste trabalho, conforme apresentado na Tab. 1.

As funções objetivo a serem consideradas são a média *RMS* da: vazão mássica, pressão e potência hidropneumática.

**Tabela 1.** Variações da geometria do dispositivo CAO.

$\beta$ [°]	$l$ [m]	$H_2$ [m]	$L$ [m]	$H_l$ [m]
10	2,3214	6,9644	29,2976	2,3783
20	2,3214	6,9644	20,4599	3,3009
30	2,3214	6,9644	16,3061	4,0370
40	2,3214	6,9644	13,5878	4,7267
50	2,3214	6,9644	11,4712	5,4521
60	2,3214	6,9644	9,60327	6,3062
70	2,3214	6,9644	7,75438	7,4633
80	2,3214	6,9644	5,64879	9,4350

### **Modelo multifásico Volume of fluid (VOF)**

O método *Volume of Fluid* VOF (Hirt e Nichols, 1981) é utilizado nesse trabalho. O método VOF é um modelo multifásico usado para a solução de escoamentos compostos de dois ou mais fluidos imiscíveis. Nesta formulação todas as fases são definidas e o volume ocupado por uma fase não pode ser ocupado por outra fase. Assim, para representar as fases contidas em cada volume de controle é necessário o conceito da fração de volume ( $\alpha$ ). Consequentemente, é necessário que a soma de todas as fases em cada célula seja sempre igual a um. No modelo numérico apresentado neste trabalho somente duas fases são consideradas: a água e o ar. Portanto, as células com valores de  $\alpha_{\text{água}}$  entre 0 e 1 contém a interface entre água e ar (neste caso  $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$ ). As que possuem  $\alpha_{\text{água}} = 0$  estão sem água e completas de ar ( $\alpha_{\text{ar}} = 1$ ); e, por sua vez, as que apresentam  $\alpha_{\text{ar}} = 0$  estão cheias de água ( $\alpha_{\text{água}} = 1$ ).

Além disso, quando o método VOF é empregado, apenas um único conjunto de equações, formado pelas equações de quantidade de movimento e de continuidade, é aplicado a todos os fluidos componentes do escoamento. Então, a fração de volume de cada fluido em

cada célula (volume de controle) é considerada em todo o domínio computacional através da equação de transporte para a fração volumétrica. Assim, o modelo é composto pela equação de continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

a equação da fração volumétrica:

$$\frac{\partial (\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

E as equações de quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (6)$$

onde:  $\rho$  é a massa específica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ ),  $t$  é o tempo (s),  $\vec{v}$  é o vetor velocidade do escoamento (m/s),  $p$  é a pressão estática ( $\text{N/m}^2$ ),  $\mu$  é a viscosidade ( $\text{kg/(ms)}$ ),  $\vec{\tau}$  é o tensor de tensões ( $\text{N/m}^2$ ) e  $\vec{g}$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ).

Uma vez que as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas para a mistura de ar e água, é necessário calcular valores médios para a massa específica e a viscosidade, respectivamente (Srinivasan et al., 2011):

$$\rho = \alpha_{\text{agua}} \rho_{\text{agua}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (7)$$

$$\mu = \alpha_{\text{agua}} \mu_{\text{agua}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (8)$$

## MODELO NUMÉRICO

Para a solução das equações de conservação da massa e quantidade de movimento, foi empregado um código comercial baseado no Método de Volumes Finitos - MVF (FLUENT, 2006). Para todas as simulações foi considerado o esquema de advecção *upwind* para tratamento dos termos advectivos, enquanto a discretização espacial para a pressão foi realizada através do método PRESTO e o método GEO-RECONSTRUCTION para a fração

volumétrica. Quanto ao acoplamento pressão-velocidade foi empregado o método PISO. Além disso, empregaram-se os fatores de sub-relaxação para as equações da conservação da massa e quantidade de movimento de 0.3 e 0.7, respectivamente. Para a solução do sistema de equações gerado após a discretização é utilizado o método Gauss Seidel com multigrid algébrico. Maiores detalhes sobre a metodologia numérica podem ser obtidos em Patankar (1980) e Versteeg e Malalasekera (2007).

Todas as soluções foram realizadas usando computadores com 4 processadores Intel Xeon com 8.0 Gb de memória RAM. Para reduzir o tempo de processamento das simulações foi empregada a técnica do processamento paralelo disponibilizada pelo software FLUENT® que emprega biblioteca de passagem de mensagens MPI. O tempo de processamento de cada simulação é de aproximadamente 2 h.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A verificação do modelo computacional foi realizada comparando a elevação da superfície livre ao longo do tempo, numa posição específica, obtida de forma numérica, com a respectiva solução analítica, que é definida por (Dean e Darlymple, 1991):

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) + \frac{A^2 k \cosh(kh)}{4 \sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos 2(kx - \omega t) \quad (9)$$

onde:  $A$  é a amplitude da onda (m), dado por  $H/2$ .

Na Fig. 3 é possível comparar qualitativamente a propagação da onda, apresentando uma boa concordância entre as soluções numérica e analítica. Durante o intervalo  $15 \text{ s} \leq t \leq 30 \text{ s}$ , depois da estabilização da onda numérica, a diferença máxima encontrada foi de 5,00 %, verificando o modelo computacional para a geração da onda. O avanço no tempo é definido por:  $T / 500$ . Cabe destacar que validações e verificações do modelo VOF aplicado a energia das ondas do mar, e principalmente dispositivos do tipo CAO, podem ser encontradas em Horko (2007), Liu et al. (2008a), Liu et al. (2008b), Gomes et al (2009), Gomes (2010), Ramalhais (2011), Liu et al. (2011) e Gomes et al (2012a).

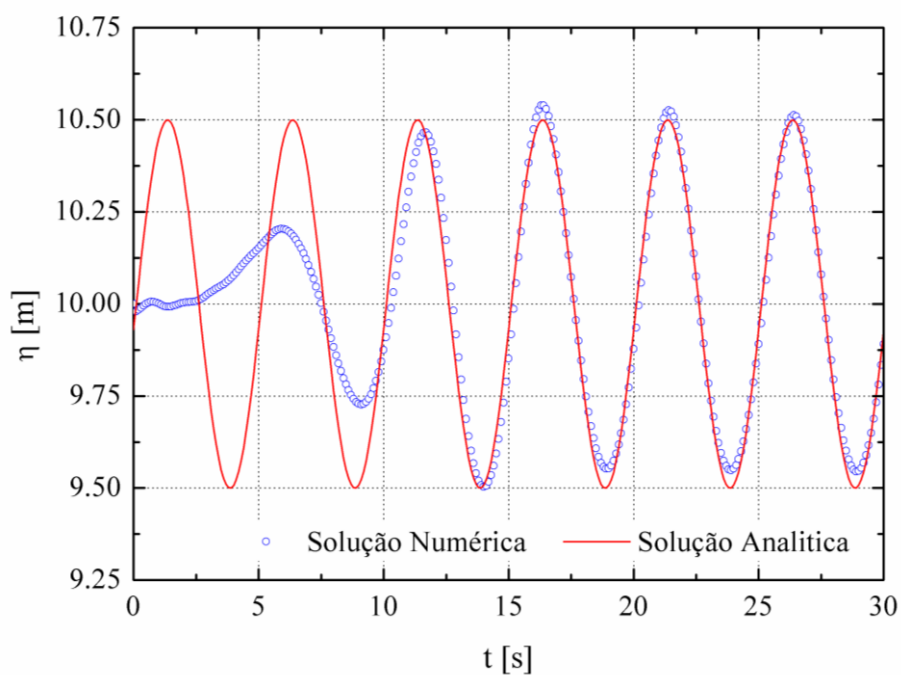
Conhecendo-se a vazão mássica e a pressão é possível calcular a potência hidropneumática através da seguinte expressão (Dizadji e Sajadian, 2011):

$$P_{hyd} = \left( P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (10)$$

onde:  $P_{ar}$  é a pressão estática na chaminé do dispositivo CAO (Pa),  $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\dot{m}$  é a vazão mássica de ar no duto da turbina ( $\text{kg/s}$ ) e  $v_{ar}$  é a velocidade do ar no duto da turbina ( $\text{m/s}$ ), que pode ser dada por:

$$v_{air} = \frac{\dot{m}}{A \rho_{air}} \quad (11)$$

sendo  $A$  a área da secção transversal da chaminé ( $\text{m}^2$ ).

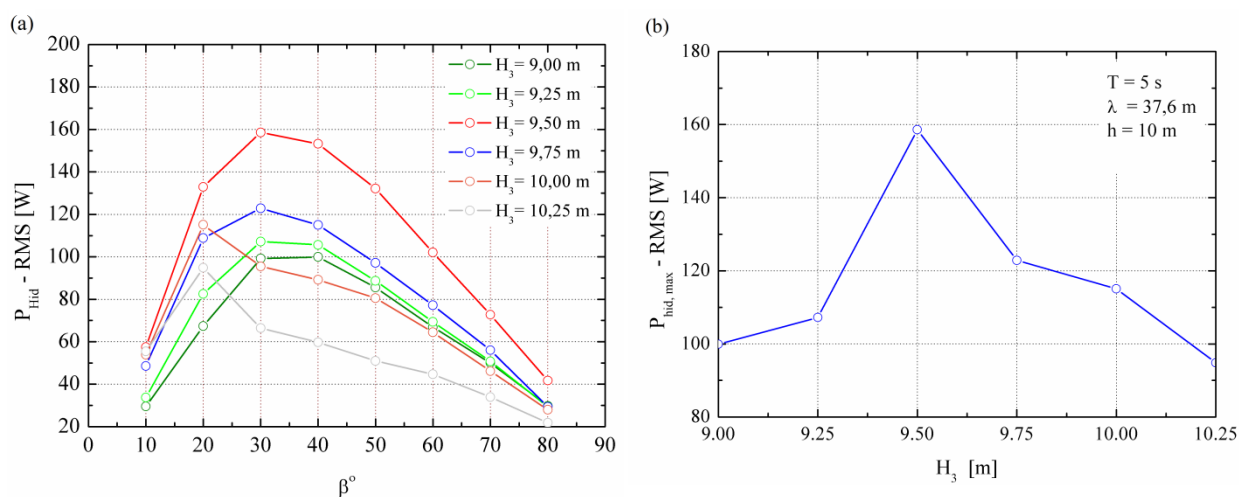


**Figura 3.** Elevação da superfície livre em  $x=50$  m.

Na Fig. 4a é possível observar os valores médios, média *Root Mean Square* - RMS, para a potência hidropneumática no dispositivo CAO considerando a variação dos graus de liberdade  $\beta$  e  $H_3$ . Os resultados apresentados na Fig. 4a indicam que quando  $\beta = 30^\circ$  e  $H_3 = 9,50$  m tem-se a maior média RMS para a potência hidropneumática. Essa inclinação das paredes da câmara CAO (vide Fig. 1) é o equivalente a uma relação de  $(H_1/L)_0 = 0,24$ . Na Tab. 1 tem-se para  $\beta = 30^\circ$  que  $L = 16,3061$  m e  $H_1 = 4,0370$  m. Relacionando estes valores com o clima de ondas considerado pode-se concluir, aproximadamente, que  $L \sim \lambda / 2$  e  $H_1 \sim 4H$ . Deste modo é possível verificar a seguinte relação teórica para o caso ótimo:

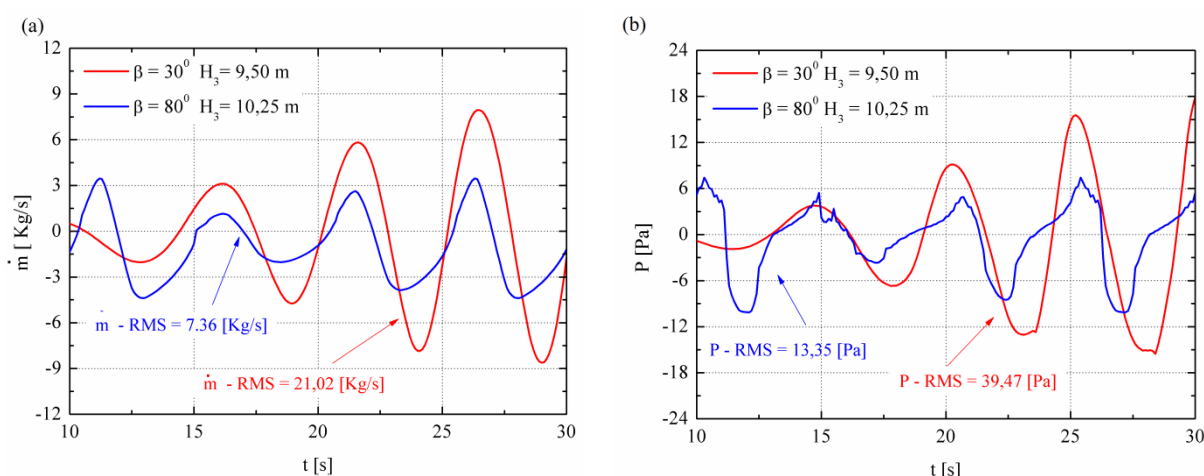
$$\left(\frac{H_1}{L}\right)_o \cong 8 \frac{H}{\lambda} \quad (12)$$

De uma forma geral, conforme apresentado na Fig. 4a a média RMS da potência hidropneumática ocorre quando  $\beta = 30^\circ$  exceto quando a profundidade de submersão  $H_3$  coincide com a região da superfície livre e acima da mesma,  $H_3 = 10,00$  m e  $H_3 = 10,25$  m, respectivamente. Na Fig. 4b é apresentado a maximização da média RMS da potência hidropneumática. Este resultado corrobora o fato de que a combinação  $\beta = 30^\circ$  e  $H_3 = 9,50$  conduz a um desempenho ótimo global do sistema CAO.



**Figura 4.** Potência Hidropneumática: (a) média RMS considerando a variação de  $\beta$  e  $H_3$ , (b) maximização da potência em relação a profundidade de submersão.

Como pode ser visto na Eq. (10) a potência hidropneumática é uma composição da vazão mássica e da pressão. Deste modo, otimizar dispositivos CAO significa encontrar um arranjo geométrico que possibilite a maximização da vazão mássica e da pressão. Na Fig. 5a é apresentado o comportamento transiente da vazão mássica para a situação em que  $\beta = 30^\circ$  com  $H_3 = 9,50$  m e  $\beta = 80^\circ$  com  $H_3 = 10,25$  m. O comportamento em ambas as situações é simétrico, o que é desejável para o bom funcionamento da turbina do tipo *wells*, entretanto uma variação na inclinação das paredes do dispositivo CAO ocasiona diferenças instantâneas de até aproximadamente 5 kg/s. De maneira semelhante, para o comportamento transiente da pressão na Fig. 5b, é possível observar que podem ocorrer diferenças instantâneas de até 11 Pa.



**Figura 5.** Comportamento transiente para os arranjos geométricos de câmara CAO  $\beta = 30^\circ$  com  $H_3 = 9,50$  m e  $\beta = 80^\circ$  com  $H_3 = 10,25$  m da: (a) vazão mássica e (b) pressão.

De acordo com os resultados apresentados, sobretudo na Fig. 5, fica evidente a pertinência da aplicação e Design Construtal no projeto de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica. Como pode ser visto na Fig. 5a uma redistribuição geométrica conduz a um aumento de até 185%, um aumento cerca de três vezes, em termos de vazão mássica. De forma semelhante para a pressão, considerando a Fig. 5b, ocorre um aumento de até 195%, um aumento cerca de três vezes.

## CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico com o objetivo de determinar uma geometria ótima para um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de água oscilante (CAO), cujo formato da câmara CAO é um trapézio. Para tanto, o método Design Construtal foi usado para definir as diversas variações das geometrias, permitindo definir qual arranjo geométrico (na forma trapezoidal) que possibilita um melhor desempenho do sistema CAO. Assim, o principal objetivo foi a obtenção de uma recomendação teórica sobre os valores do grau de liberdade  $\beta$  (ângulo formado pela parede frontal do dispositivo CAO com a superfície livre - ângulo da base do trapézio) e  $H_3$  (profundidade de submersão do dispositivo CAO) que permitem obter valores de potência hidrodinâmica mais elevados para um dispositivo CAO, quando sujeito a incidência de ondas com período de 5 s e comprimento de onda incidente igual a 37.6 m.

O valor ótimo de  $\beta$  combinado  $H_3$ , isto é, o valor de  $\beta$  e  $H_3$  que geram o valor máximo RMS para a potência hidropneumática para o caso de uma câmara CAO é obtido quando  $\beta_o = 30^\circ$  o equivalente a  $(H_1/L)_o = 0.24$  e  $H_{3,max} = 9,50$  m.

Durante o processo de otimização ficou evidente que uma simples redistribuição geométrica faz com que o dispositivo CAO tenha um desempenho melhor, mostrando a aplicabilidade do método Design Construtal neste tipo de problemas de engenharia. Estes resultados são muito promissores, pois fornecem uma recomendação teórica sobre a geometria ideal de um dispositivo CAO, que permite a maximização do aproveitamento das ondas incidentes. Além disso, de acordo com a formulação de Constructal adotada, é possível relacionar as dimensões do dispositivo CAO com as características das ondas incidentes. Assim, se o clima de ondas é conhecido, é possível conceber o sistema CAO para uma região específica atingindo o seu melhor desempenho.

Por fim, outro aspecto a ser ressaltado é que com a câmara CAO no formato trapezoidal as recirculações de ar tendem a não ocorrer, propiciando que o escoamento do ar pela estrutura não sofra perdas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal do Paraná (IFPR), à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), à Universidade Federal de Rio Grande (FURG), e ao CNPq pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

BARREIRO, T. G. **Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.

BEJAN, A.; ZANE, J. P. Design in Nature: How the Constructal Law Governs Evolution in Biology, Physics, Technology, and Social Organization. **Published in the United States by Doubleday**. 2012.

BEJAN, A.; LORENTE, S. Constructal Law of Design and Evolution: Physics, Biology, technology, and Society. **Journal of Applied Physics**, 113: 151301-1 – 151301-20. 2013.

CARTER, R. W. **Wave Energy Converters and a Submerged Horizontal Plate**. Master Thesis, Master of Science in Ocean and Resources Engineering, University of Hawaii, Manoa, Honolulu, 2005.

CHAKRABARTI, S. K. **Handbook of offshore engineering**. Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 1. 2005. 661p.

CRUZ, J. M. B. P.; SARMENTO, A. J. N. A. Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais. Alfragide, Portugal: **Instituto do Ambiente**, 2004. 65p.

DEAN, R. G., DALRYMPLE, R. A. Water wave mechanics for engineers and scientists. **World Scientific** 2: 1991. 353p.

DIZADJI N.,SAJADIAN S. E. Modeling and optimization of the chamber of OWC system, **Energy**, Vol. 36, pp. 2360 – 2366, 2011.

FLUENT (version 6.3.16), ANSYS, Inc., 2006.

GOMES, M.. DAS N., OLINTO, C.R., ROCHA, L. A. O, SOUZA, J.A. & ISOLDI, L. A., , Computational Modeling of the Air-Flow in an Oscillating Water Column System, **20th International Congress of Mechanical Engineering**. 2009.

GOMES, M. DAS N. **Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna d'Água Oscilante de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica**. PPGMC-FURG, 2010. 209p. (Dissertação de Mestrado).

GOMES, M. DAS N.; ISOLDI, L. A.; SANTOS E. D. & ROCHA, L. A. O. Análise de Malhas para Geração Numérica de Ondas em Tanques, **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. São Luiz, MA. 2012. 1-10.

GOMES, M. DAS N., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O. Two-Dimensional Geometric Optimization of an Oscillating Water Column Converter of Real Scale, **22nd International Congress of Mechanical Engineering**. 2013.

GOMES, M. N., BONAFINI, B. L., CASSEL, L. F., ISOLDI, L. A., SANTOS. E. D., ROCHA, L. A. O. Otimização geométrica de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar do tipo coluna de água oscilante na forma trapezoidal. In: **Proceedings XXXVI Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2015)**, Rio de Janeiro, 2015.

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

HORKO, M. **CFD Optimization of an Oscillating Water Column Energy Converter**. Science and Engineering, School of Mechanical Engineering, University of Western, Australian. 2007 (Dissertação de mestrado).

LIU, Z.; HYUN B.; HONG, K. Application of Numerical Wave Tank to OWC Air Chamber for Wave Energy Conversion. **International Offshore and Polar Engineering Conference**, 2008a. .

LIU, Z.; HYUN B.; JIN, J. Numerical prediction for overtopping performance of OWEC. **Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering**, v. 11, n.1, , 2008b, p. 35-41.

LIU, Z.; HYUN B.; HONG, K. Numerical study of air chamber for oscillating water column wave energy convertor. **China Ocean Eng.**, v.25 2011. p.169-178.

MAVRIPLIS, D. J. Unstructured Grid Techniques. **Annual Reviews Fluid Mechanics**. 29. 473-514. 1997.

MCCORMICK, M. E. **Ocean engineering wave mechanics**. John Wiley & Sons, USA, New York, 1976.

NIELSEN, F. G., ANDERSEN, M., ARGYRIADIS, K., BUTTERFIELD, S., FONSECA, N., KUROIWA, T., BOULLUEC, M. L. E., LIAO, S. J., TURNOCK, S. R., WAEGTER, J. **Ocean wind and wave energy utilization**, ISSC, Southampton, 2006.

PATANKAR, S., V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. McGraw-Hill, Estados Unidos, 1980. 196p.

RAMALHAIS, R. DOS S. **Estudo numérico de um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2011.

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

TWIDELL, J., AND WEIR, T. **Renewable Energy Resources**, Taylor & Francis, London, 2006.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**, Malaysia: Pearson. 2007.