



# REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

## APLICAÇÃO DO MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL NA AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA POTÊNCIA HIDROPNEUMÁTICA DE UM DISPOSITIVO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE COM REGIÃO DE TRANSIÇÃO TRAPEZOIDAL<sup>1</sup>

YURI THEODORO BARBOSA DE LIMA<sup>2</sup>, LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA<sup>3</sup>,  
MATEUS DAS NEVES GOMES<sup>4</sup>, ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS<sup>5</sup>, LIÉRCIO  
ANDRÉ ISOLDI<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup> Mestre em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, yuri\_vo@hotmail.com.

<sup>3</sup> Professor Dr. no Departamento de Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS, luizrocha@mecanica.ufrgs.br.

<sup>4</sup> Professor Dr. do Instituto Federal do Paraná, *Campus* Paranaguá, mateus.gomes@ifpr.edu.br.

<sup>5</sup> Professor Dr. do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica na Universidade Federal do Rio Grande- FURG, elizaldosantos@furg.br, liercioisoldi@furg.br.

**RESUMO:** O presente trabalho apresenta um estudo numérico bidimensional sobre a região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé de um dispositivo conversor do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO). O objetivo é maximizar a potência hidropneumática, considerando uma geometria trapezoidal na região de transição do dispositivo CAO, situada entre a câmara hidropneumática e a chaminé. Os resultados são comparados através do valor de potência hidropneumática obtido para as diferentes configurações geométricas. O Design Construtal, associado ao método de busca exaustiva, foi empregado para definir a geometria

que maximiza a potência hidropneumática. Os graus de liberdade estudados foram o ângulo de inclinação da parede entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO ( $\alpha$ ), a razão entre altura e comprimento da chaminé do dispositivo ( $H_2/l$ ) e a profundidade de submersão do dispositivo ( $H_3$ ). O domínio computacional é representado por um tanque de ondas com o dispositivo CAO acoplado. O software FLUENT foi empregado para a solução numérica das equações, baseada no Método dos Volumes Finitos (MVF). A construção da geometria e a geração da malha foram realizadas no software GAMBIT. Na interação entre as fases ar e água, foi aplicado o método Volume of Fluid (VOF). Os resultados encontrados mostram um potência de 587,31 W para o caso de melhor desempenho, enquanto que 46,14 W determinam a potência para o caso de mais baixo desempenho. Estes resultados apresentam uma diferença de 92,14 % em relação ao mais alto e o mais baixo desempenho de potência hidropneumática.

**Palavras-chave:** Design Construtural, Trapezoidal, CAO.

**APPLICATION OF THE CONSTRUCTIONAL DESIGN METHOD IN THE  
NUMERICAL EVALUATION OF THE HYDROPNEUMATIC POWER OF A  
OCEAN WAVE ENERGY CONVERTER DEVICE OF THE OSCILLATING WATER  
COLUMN TYPE WITH TRAPEZOIDAL TRANSITION REGION**

**ABSTRACT:** The present work presents a two-dimensional numerical study about the transition region between the hydropneumatic chamber and the chimney of an Oscillating Water Column (OWC) converter device. The aim is to maximize the hydropneumatic power, considering a trapezoidal geometry in the transition region of the OWC device, located between the hydropneumatic chamber and the chimney. The results are compared by the hydropneumatic power value obtained for the different geometric configurations. The Constructal Design, associated to an exhaustive search method, was used to define a geometry that maximizes the hydropneumatic power. The considered degrees of freedom were the inclination angle of the wall between the hydropneumatic chamber and the OWC device's chimney ( $\alpha$ ), the ratio between height and length of the device's chimney ( $H_2/l$ ) and the submersion depth of device ( $H_3$ ). The computational domain is represented by a wave tank with the OWC device coupled. The software FLUENT was used for the numerical solution of the equations, based on the Finite Volume Method (FVM). The geometry's construction and the generation of the mesh were realized in the GAMBIT software. In the interaction between

the air and water phases, the Volume of Fluid (VOF) method was used. The results indicate a power of 587.31 W for the case of better performance, while 46.14 W determine the case of lower power. These results presents a difference of 92.14% in relation to the highest and the lowest performance of hydropneumatic power.

**Key Words:** Constructal Design, Trapezoidal, OWC

## 1. INTRODUÇÃO

Uma vez que o consumo de energia tem aumentado consideravelmente ao longo das últimas décadas, associado ao fato de que os métodos tradicionais de transformação de energia (especialmente os ligados a queima de combustíveis fósseis) estarem causando impactos ambientais, a busca por novas fontes de energia tem sido intensificadas (Clément et al., 2002).

Baseados nestes aspectos, muitos países estão investindo em pesquisa e exploração de novas fontes energéticas, em especial as chamadas fontes renováveis de energia. Uma dessas fontes de energia que tem merecido destaque é a transformação da energia contida nos oceanos em energia elétrica (Clément et al., 2002).

A energia contida nos oceanos pode ter origens diferentes. Para realizar a transformação de energia das ondas regulares em energia elétrica, existem diversos tipos de conversores com diferentes classificações. Os dispositivos podem ser classificados quanto ao seu local de instalação: dispositivos costeiros (*onshore*), em regiões com profundidades de até 20 m, e que são geralmente presos ao fundo; dispositivos próximos à costa (*nearshore*), situados em regiões com profundidades entre 20 e 50 m, que podem ser presos ao fundo ou flutuantes e dispositivos afastados da costa (*offshore*), situados em regiões com profundidades maiores que 50 m, são geralmente flutuantes.

A classificação dos conversores de energia das ondas quanto ao seu princípio de funcionamento pode ser: Coluna de Água Oscilante (CAO), Galgamento e Corpos Oscilantes (Cruz e Sarmiento, 2004). Entre as diferentes tecnologias de conversão de energia das ondas regulares em energia elétrica, a que tem mais se destacado, em número de projetos, é a baseada no princípio CAO.

Este trabalho utiliza a modelagem computacional e o método Design Construtal, associado ao método de busca exaustiva, para simular numericamente o princípio de funcionamento de um conversor do tipo CAO. Busca-se, ainda avaliar a influência que a região de transição trapezoidal possui sobre o escoamento do ar pelo interior do dispositivo CAO, comparar com os resultados já obtidos por Lima et al., (2015a) e maximizar a conversão de energia das ondas regulares em energia elétrica.

Considera-se uma geometria bidimensional, onde as restrições para o problema são: a área de entrada da câmara hidropneumática ( $A_E$ ) e a área da câmara hidropneumática somada à área da chaminé ( $A_T$ ), as quais são mantidas constantes.

O método Design Construtal é baseado na Teoria Construtal desenvolvida por Adrian Bejan (Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012). A teoria Construtal explica deterministicamente como são geradas as formas de fluxo na natureza (bacias hidrográficas, pulmões, circulação atmosférica, forma de animais, tecidos vasculares, etc.) com base em um princípio evolutivo de acesso, de forma fácil, ao fluxo no tempo.

Os trabalhos utilizando Design Construtal para o estudo da geometria de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica vem ganhando destaque, dentre eles tem-se as pesquisas desenvolvidos por: Gomes et al., (2009b); Gomes et al., (2012b); Gomes et al., (2013); Gomes (2014); Lopes et al., (2011); Oliveira et al., (2012); Espinel et al., (2014a); Espinel et al., (2014b); Espinel (2014); Lima et al., (2015a) e Lima et al., (2015b).

Para a modelagem computacional do princípio de funcionamento do conversor CAO, o domínio computacional (dispositivo CAO acoplado a um tanque de ondas) é discretizado no *software* GAMBIT<sup>®</sup>, enquanto as simulações numéricas foram desenvolvidas utilizando-se um código de dinâmica de fluidos, FLUENT<sup>®</sup>, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF) (Fluent, 2009; Maliska, 2004). O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é aplicado no tratamento da interação água-ar (Gomes et al. 2012; Liu et al. 2008a; Ramalhais, 2011).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

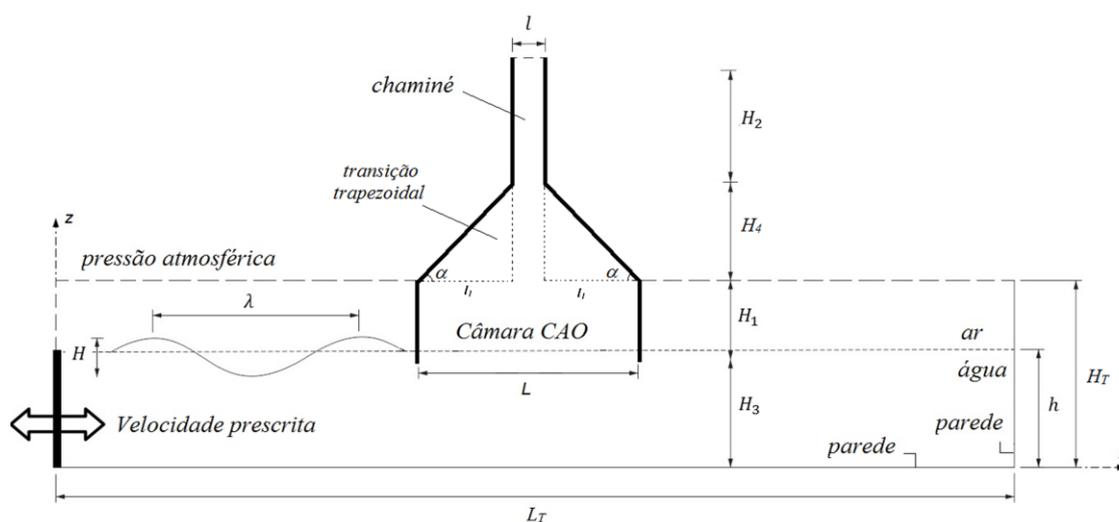
### 2.1 Princípio de Funcionamento de um Dispositivo CAO

Os dispositivos do tipo Coluna de Água Oscilante são estruturas ocas parcialmente submersas, abertas para o mar abaixo da superfície livre da água como pode ser observado na Figura 1.

O processo de transformação de eletricidade 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 hidropneumática. 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 hidropneumática.

Para se ter o aproveitamento do escoamento nos dois sentidos normalmente são utilizadas turbinas do tipo *Wells*, as quais apresentam a propriedade de manterem o mesmo sentido de rotação das suas pás, independente do sentido do escoamento. O conjunto turbina e gerador é o responsável pela geração de energia elétrica (Cruz e Sarmento, 2004).

A câmara CAO é o dispositivo mais avançado em quantidade e duração de protótipos testados no mar, havendo inclusive algumas, centrais piloto instaladas. O mecanismo CAO, pode ser representado por quatro componentes principais: câmara hidropneumática, chaminé, turbina e gerador. Com relação às suas dimensões, as mesmas devem adequar-se para o tipo de onda presente no local da instalação (Gomes, 2014; Conde e Gato, 2008).



**Figura 1.** Representação esquemática do domínio computacional (Lima et al., 2015).

## 2.2 Domínio Computacional

O esquema do domínio computacional bidimensional apresentado é composto pelo dispositivo CAO inserido em um tanque de ondas. As características da onda são definidas por: período da onda ( $T$ ), altura da onda ( $H$ ) e profundidade da superfície livre ( $h$ ), onde é possível determinar o comprimento do tanque ( $L_T$ ) e a altura do tanque de ondas ( $H_T$ ) apresentado na Figura 1.

As dimensões do dispositivo são a altura da câmara ( $H_1$ ), profundidade de submersão do dispositivo ( $H_3$ ), a altura da chaminé ( $H_2$ ), comprimento da chaminé ( $l$ ), comprimento da câmara ( $L$ ) e altura da região de transição ( $H_4$ ). Na modelagem computacional de um tanque de ondas com um dispositivo CAO acoplado alguns aspectos, como comprimento e a altura da onda a ser gerada, devem ser levados em conta.

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 recomendado que o comprimento do tanque seja, aproximadamente, cinco vezes maior que o comprimento da onda. Assim garante-se a simulação numérica da onda sem efeito de reflexão por um tempo razoável de propagação. A altura do tanque deve ser igual à profundidade mais três vezes a altura da onda (Gomes, 2014).

## 2.3 Condições de Contorno

No presente trabalho, a onda incidente é gerada no lado esquerdo do tanque de ondas, local onde o gerador de ondas numérico é posicionado, como pode ser observado na Figura 1, com a mesma em escala real e sendo consideradas as seguintes características:  $T = 5,0$  s,  $H = 1,0$  m,  $\lambda = 37,6$  m,  $h = 10,0$  m,  $L_T = 188$  m,  $H_T = 13$  m.

Para a geração da onda regular, a Metodologia Função (Gomes et al., 2009) é aplicada. Esta metodologia, consiste na criação de um função definida pelo usuário, UDF (*User Define Function*), no *software* FLUENT.

A UDF separa o perfil de velocidade da onda em componentes horizontal e vertical, com base na Teoria de Stokes de 2ª ordem (Lima et al., 2015). Assim, as equações impostas na região de entrada são dadas por (McCormick, 1976; Dean & Dalrymple, 1991; Chakrabati, 2005):

$$u = \frac{H}{2} gk \frac{\cosh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left( \frac{H}{2} \right)^2 \omega k \frac{\cosh 2k(k + z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (\text{Equação 1})$$

$$v = \frac{H}{2} gk \frac{\sinh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left( \frac{H}{2} \right)^2 \omega k \frac{\sinh 2k(k + z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (\text{Equação 2})$$

onde  $H$  é a altura da onda incidente (m);  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );  $k$  é o número de ondas dado por  $k = 2\pi/\lambda$  ( $\text{m}^{-1}$ ),  $h$  é a profundidade (m),  $T$  é o período de onda (s),  $\omega$  é a frequência dada por  $\omega = 2\pi/T$  (rad/s),  $x$  é a coordenada que representa a direção principal (m),  $t$  é o tempo (s) e  $z$  é a coordenada normal (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 na Figura 1).

Nas demais superfícies são impostas condições de não deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula respectivamente. Com relação às condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso, com profundidade  $h = 10,0$  m.

## 2.4 Formulação com Design Construtal

O Design Construtal é um método que relacionando graus de liberdade, restrições e função objetivo, busca avaliar a influência da geometria no desempenho de um determinado sistema (Bejan e Zane, 2012). Se um método de busca exaustiva for associado ao método Design Construtal, todas as geometrias possíveis serão testadas e então será possível determinar a geometria ótima que maximiza o desempenho do sistema em um determinado intervalo de busca.

A Lei Construtal mostra qual é a tendência da natureza e com isso permite obter uma melhor condição de fluxo. Usando essa lei é possível projetar processos de forma orgânica e dinâmica para obter melhores ou mais eficientes resultados (Bejan e Zane, 2012).

No presente trabalho a função objetivo é maximizar a potência hidropneumática do conversor CAO. As restrições para o problema são a área de entrada da câmara hidropneumática ( $A_E$ ) e a área total da câmara CAO ( $A_T$ ), que são mantidas constantes e podem ser calculadas através das seguintes relações, respectivamente:

$$A_E = H_1 L \text{ (Equação 3)}$$

$$A_T = H_1 L + H_2 l \text{ (Equação 4)}$$

Um critério é adotado para a definição da restrição da área de entrada da câmara do dispositivo CAO ( $A_E$ ). 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 ( $H$ ) (Gomes, 2014).

E, para determinar a restrição da área da câmara hidropneumática somada à área da chaminé ( $A_T$ ), é definido que  $A_E$  representa 70 % de  $A_T$ , ou seja:  $A_T = 1,43 A_E$ . Neste estudo tem-se que  $A_E = 37,6 \text{ m}^2$  e  $A_T = 53,76 \text{ m}^2$ .

Os graus de liberdade analisados são o ângulo de inclinação da parede entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO ( $\alpha$ ), a razão entre altura e comprimento da chaminé do dispositivo ( $H_2/l$ ) e a profundidade de submersão do dispositivo ( $H_3$ ), o grau de liberdade  $H_1/L$  (razão entre altura e comprimento da câmara hidropneumática) é mantido constante, onde  $H_1/L = 0,1346$ , segundo a recomendação obtida em Gomes (2014).

É importante destacar que a dimensão  $H_3$ , indica quanto o dispositivo CAO está submerso em relação à superfície livre e varia conforme os seguintes valores: 10,25 m, 10,00 m, 9,75 m, 9,50 m e 9,25 m.

A área do trapézio entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo não se mantém constante, uma vez que  $l$  varia para cada simulação.

Ao variar o ângulo de inclinação ( $\alpha$ ) é possível dimensionar a geometria do dispositivo CAO através da seguinte relação e respeitando as condições que seguem:

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{H_4}{l_1} \text{ (Equação 5)}$$

$$L = 2l_1 + l \text{ (Equação 6)}$$

Sendo os comprimentos  $L$  e  $l$  calculados, respectivamente, por:

$$L = \left[ \frac{A_E}{(H_1/L)} \right]^{1/2} \quad (\text{Equação 7})$$

$$l = \left[ \frac{A_4 - A_E}{(H_2/l)} \right]^{1/2} \quad (\text{Equação 8})$$

onde as alturas  $H_1$  e  $H_2$  são calculadas, respectivamente, por:

$$H_1 = L \left( \frac{H_1}{L} \right) \quad (\text{Equação 9})$$

$$H_2 = l \left( \frac{H_2}{l} \right) \quad (\text{Equação 10})$$

## 2.5 Modelo Volume of Fluid

O modelo *Volume of Fluid* (VOF) consiste em reproduzir a interação entre os fluidos envolvidos na simulação numérica do dispositivo do tipo CAO, que são o ar e a água neste caso. Neste modelo todas as fases são definidas e o volume ocupado por uma fase não pode ser ocupado por outra.

O modelo utiliza o conceito de fração volumétrica ( $\alpha$ ) para encontrar como as fases são distribuídas ao longo do volume de controle. Como mais do que uma fase não pode ocupar o mesmo volume ao mesmo tempo, a fração volumétrica em cada célula deve ser a soma de  $\alpha_{ar}$  e  $\alpha_{água}$  e sempre ser igual a um ( $\alpha_{ar} + \alpha_{água} = 1$ ).

No modelo VOF, as equações de continuidade e quantidade de movimento são aplicadas a todos os fluidos que compõem o escoamento e a fração de volume de cada fluido em cada célula é considerada em todo o domínio computacional através da equação de fração volumétrica. As equações de continuidade, fração volumétrica e quantidade de movimento são, respectivamente, definidas por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{Equação 11})$$

$$\frac{\partial (\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \quad (\text{Equação 12})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla (\mu \vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (\text{Equação 13})$$

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

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (\text{Equação 14})$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (\text{Equação 15})$$

## 2.6 Modelo Numérico

Para a solução numérica das equações de conservação da massa e quantidade de movimento, foi empregado um código comercial baseado no Método de Volumes Finitos – MVF (FLUENT, 2009). Para todas as simulações foi considerado o esquema de advecção upwind para tratamento dos termos advectivos. A discretização espacial para a pressão foi realizada através do método PRESTO e o método GEO-RECONSTRUCTION foi aplicado para a fração volumétrica.

Quanto ao acoplamento pressão-velocidade foi empregado o método PISO. 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 um computador com processador Intel Core i7 e 8,0 Gb de memória RAM, utilizando processamento em série. O tempo de processamento de cada simulação foi de aproximadamente 4h. O passo de tempo utilizado foi de 0,01 segundos para um total de 30 segundos. O problema em questão se trata de um escoamento transiente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A verificação da presente solução com o modelo VOF consiste em gerar a onda em um tanque de ondas e observar a sua variação na superfície livre da água, ou seja, a sua amplitude, para posteriormente comparar com a equação analítica para a variação da superfície livre da água em um dado ponto do tanque de ondas.

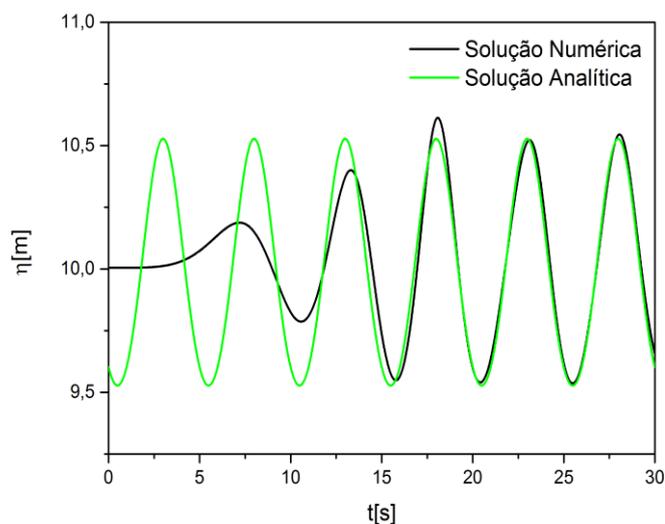
A comparação da solução numérica com a solução analítica foi proposta por Dean e Dalrymple (1991). A equação analítica da superfície livre é definida por:

$$\eta(x,t) = A \cos(kx - \omega t) + \frac{A^2 k \cosh(kh)}{4 \operatorname{senh}^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos 2(kx - \omega t) \quad (\text{Equação 16})$$

onde  $A$  é a amplitude da onda (m), dado por  $H/2$ ,  $x$  é a posição (m),  $t$  é a variação do tempo (s),  $k$  e  $\omega$  são respectivamente o número de onda ( $\text{m}^{-1}$ ) e a frequência da onda (rad/s).

Na Figura 2, foram comparados os resultados obtidos numericamente com os obtidos pela Equação 16 na posição  $x = 22,5$  m. A verificação da solução numérica foi realizada no intervalo entre 20 e 30 s onde a onda numérica está estável e ainda não há reflexão da mesma.

A diferença relativa entre as soluções numérica e analítica foi medida instantaneamente, e a média das diferenças foi 2,61%, onde o valor mínimo obtido foi 0,0019% e o valor máximo 5,86%. Estes resultados indicam a acurácia do modelo.



**Figura 2.** Elevação da superfície livre da água ao longo do tempo.

Para a geração da malha foi adotada uma estratégia que tem como objetivo construir 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). Para completar o domínio computacional, quadriláteros com 0,1 m de lado foram utilizados na discretização do dispositivo CAO.

Neste trabalho foram avaliadas a vazão mássica (na saída da chaminé), a pressão (no interior da câmara), a eficiência e a potência hidropneumática. Os valores médios foram calculados empregando a média aritmética para problemas transientes *Root Mean Square* (RMS) (Marjani et al., 2006):

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (\text{Equação 17})$$

onde  $x$  representa a grandeza que se deseja calcular a média RMS.

A potência hidropneumática é calculada por (Dizadji e Sajadian, 2011):

$$P_{hid} = \left( P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (\text{Equação 18})$$

onde:  $P_{ar}$  é a pressão estática na chaminé do dispositivo CAO (Pa),  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\dot{m}$  é a taxa de vazão mássica atravessando a chaminé (kg/s),  $v_{ar}$  é a velocidade do ar na chaminé (m/s) dada por:

$$v_{ar} = \frac{\dot{m}}{A\rho_{ar}} \quad (\text{Equação 19})$$

Na Equação 19,  $A$  representa uma área em corte transversal da chaminé ( $\text{m}^2$ ). Como o estudo realizado é bidimensional a terceira dimensão é considerada unitária.

As expressões que derminam a pressão estática, pressão total, vazão mássica, eficiência e potência da onda incidente podem ser encontradas em Gomes (2014).

Ao todo foram analisadas cento e cinquenta configurações geométricas para o caso em que a região de transição apresenta a forma trapezoidal. Todas as dimensões foram calculadas através das Equações 5-10, onde somente o ângulo  $\alpha$ ,  $H_2/l$  e  $H_3$  variam.

Para a variação dos cinco valores de  $H_3$ , foi associado um valor de  $H_2/l$  e consequentemente relacionado a este valor temos um ângulo  $\alpha$ , o qual apresenta um valor com melhor desempenho para a potência hidropneumática. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência dos melhores casos encontrados para os diferentes valores de  $H_3$ .

A Figura 3a mostra o efeito de  $H_2/l$  e  $\alpha$  na potência hidropneumática para o grau de liberdade  $H_3 = 9.75$  m. Nesta figura pode-se verificar que existe um valor que maximiza a potência hidropneumática. O procedimento é repetido para outros valores de  $H_3$  e os resultados são condensados na Fig. 3b.

Analisando esses resultados é possível verificar que, diferente do que se encontra em Lima et al., (2015a), a variação dos cinco ângulos para cada caso de  $H_2/l$  resulta em oscilações de potência hidropneumática não se concentrando os resultados de maior potência somente no ângulo de cinco graus.

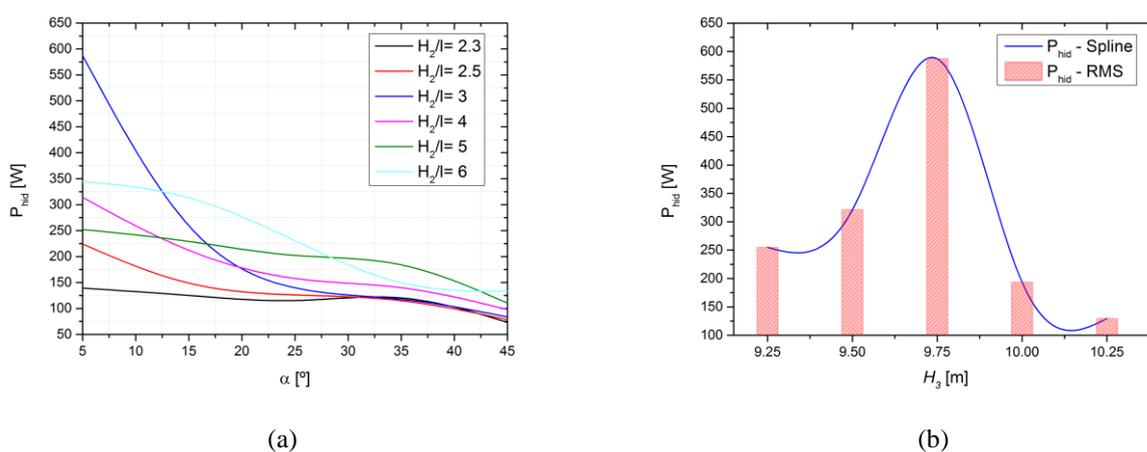
Os resultados encontrados para pressão e vazão mássica, mostram que a diminuição da profundidade faz com que a pressão aumente e a vazão mássica também, mas variações grandes no ângulo entre a região de transição e a câmara hidropneumática levam a oscilações das mesmas, não acompanhando um aumento linear da potência hidropneumática.

Um detalhe que deve ser lembrado é que a área da chaminé do dispositivo permanece constante em todos os casos estudados, mudando somente seu formato em função da diminuição de  $l$ .

Verifica-se através da Tabela 1 que os valores com maior potência hidropneumática para as variações de  $H_3$  concentram-se, em sua grande maioria, no ângulo de  $5^\circ$  e em relação ao grau de liberdade  $H_2/l$  os resultados encontrados ficam em geral próximos ao valor de  $H_2/l = 6$ , mesmo este não sendo o caso de melhor desempenho.

Os resultados se mostram diferente do encontrado em Lima et al., (2015a), uma vez que no trabalho do autor citado foi variado somente um grau de liberdade, o qual era o ângulo  $\alpha$ , mas a influência da variação geométrica da chaminé e profundidade de submersão do dispositivo causam alterações significativas na potência hidropneumática no decorrer do aumento do ângulo  $\alpha$ , mostrando que conforme o ângulo aumenta, menor fica a potência hidropneumática em virtude da diminuição da pressão no interior da câmara.

Para o cálculo da potência hidropneumática (Ver Equação 18) a vazão mássica e a pressão influenciam diretamente, pode-se notar que o caso com maior vazão mássica se apresenta para  $H_2/l = 3$  ( $\dot{m} = 13,62$  kg/s), mas a pressão ( $P = 1202,41$  Pa) associada a este grau de liberdade não é a de maior valor. Portanto conclui-se, que para pequenas variações da razão  $H_2/l$  tanto vazão mássica quanto pressão aumenta até certo valor de  $H_3$  e as mesmas influenciam na potência hidropneumática.



**Figura 3.** Variação da potência hidropneumática: (a) Efeito  $H_2/l$  e  $\alpha$  para  $H_3 = 9,75$ ; (b) Valores de melhor desempenho como função de  $H_3$ .

Entretanto, quando se tem a inclinação de  $\alpha = 5^\circ$ ,  $H_2/l = 3$  e  $H_3 = 9,75$  m existem pequenas regiões de recirculação de ar no interior da câmara hidropneumática, tanto na fase

de compressão quanto na de descompressão. Os resultados obtidos mostram que a máxima potência hidropneumática de 587,31 W é obtida para os graus de liberdade  $H_2/l = 3$ ,  $\alpha = 5^\circ$  e  $H_3 = 9,75$  m em contra partida o caso de mais baixo desempenho encontrado em todas as configurações geométricas testadas foi  $H_2/l = 2,5$ ,  $\alpha = 45^\circ$  e  $H_3 = 10,25$  m resultando em uma potência hidropneumática de 46,13 W.

Associando o resultado com a fenomenologia do problema estudado, obtêm-se recomendações teóricas referente aos valores que maximizam a potência hidropneumática do dispositivo estudado, assim tem-se:  $\alpha \cong 5H$ ,  $H_3 \cong \lambda/4$  e  $H_2/l \cong (\lambda + 4H)/6$ .

Assim, o resultado com melhor desempenho mostra um ganho de 92,14 % em relação ao caso com menor desempenho de potência hidropneumática.

**Tabela 1.** Resultados com melhor desempenho para todos os valores de  $H_3$ .

$H_3$ [m]	$H_2/l$	$\alpha$ [°]	$\dot{m}$ [Kg/s]	$p$ [Pa]	$P_{hid}$ [W]	$\varepsilon$ [%]
10,25	6	5	9,53	1205,17	129,30	24,00
10,00	5	5	11,49	1188,97	193,50	35,58
9,75	3	5	13,62	1202,41	587,31	42,37
9,50	6	5	12,76	1204,09	312,25	60,98
9,25	6	25	11,49	1189,42	254,89	39,22

De uma maneira geral é possível observar que estas variações geométricas na região de transição são pertinentes, uma vez que conduzem a melhores aproveitamentos da potência da onda incidente. Sendo assim, o método Design Construtal apresenta-se como uma ferramenta de extrema relevância no estudo de geometrias otimizadas para os conversores do tipo CAO.

#### 4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico com o objetivo de analisar a forma geométrica da região de transição entre a câmara CAO e a chaminé de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO).

A região de transição na forma trapezoidal foi usada como referência. Para tanto, o método Design Construtal foi usado para definir as diversas variações da geometria, permitindo definir qual arranjo geométrico que possibilita um melhor desempenho do sistema CAO, possibilitando ainda analisar a influência deste tipo de região de transição sobre o escoamento de ar pelo interior do dispositivo CAO.

Assim, o principal objetivo foi à obtenção de uma recomendação teórica acerca dos valores dos graus de liberdade que maximizassem a potência hidropneumática. Os graus de liberdade analisados foram: o ângulo de inclinação da parede entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO ( $\alpha$ ), a razão entre altura e comprimento da chaminé do dispositivo ( $H_2/l$ ) e a profundidade de submersão do dispositivo ( $H_3$ ).

A análise dos resultados apresentados mostra que os valores de potência hidropneumática em função de  $H_3$ ,  $H_2/l$  e  $\alpha$  respectivamente se mostram diferentes dos encontrados em pesquisas anteriores onde se variou menos graus de liberdade. A variação dos cinco ângulos para cada caso de  $H_2/l$  resulta em oscilações de potência hidropneumática, não concentrando os resultados de maior potência somente no ângulo de cinco graus como é encontrado em trabalhos anteriores.

Os resultados encontrados para pressão e vazão mássica, mostram que a diminuição da profundidade faz com que a pressão aumente e a vazão mássica também, mas somente até certo valor de  $H_3$  e esses dois fatores influenciam diretamente no cálculo da potência hidropneumática. Um detalhe que deve ser lembrado é que a área da chaminé do dispositivo permanece constante em todos os casos estudados, mudando somente seu formato em função da diminuição de  $l$ .

A aplicabilidade do método Design Construtal para a otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas foi evidenciada, uma vez que os resultados indicam um melhor desempenho do dispositivo. Em um paralelo com a Teoria Construtal é possível avaliar a evolução da configuração geométrica que conduz para o melhor aproveitamento.

Assim, no presente estudo, ocorreu a variação dos graus de liberdade que determinam a região de transição. Portanto, o método de Design Construtal se apresenta como uma ferramenta de extrema relevância no desenvolvimento deste tipo de análise. Para estudos futuros é interessante avaliar outros tipos de forma geométrica na região de transição bem como realizar um estudo tridimensional da mesma região de transição analisada no presente trabalho.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), à Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná (IFPR) pelo apoio e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEJAN, A.; LORENTE, S., Constructal Law of Design and Evolution: Physics, Biology, technology, and Society. **Journal of Applied Physics**, Vol. 113, pp.151301-1 – 151301-20, 2008.

BEJAN, A. e ZANE, J., *Design in Nature*, **Doubleday**, 2012.

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

CLÉMENT, A., Wave energy in Europe: current status and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, p. 405-431, 2002.

CONDE, J. M. P.; GATO, L. M. C., Numerical Study o Fair-flow in na Oscillanting Water Column Wave Energy Converter, **Renewable Energy**, v. 33, pp 2637-2644, 2008.

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

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

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

ESPINEL, M. F., GOMES, M das N, ROCHA, L. A. O., DOS SANTOS, E., ISOLDI, L. A., Numerical Modeling and Constructal Design Applied to the Performance Improvement of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter. **15<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT 2014)**, Belém, PA, Brazil, 2014a.

ESPINEL, M. F., GOMES, M das N, ROCHA, L. A. O., DOS SANTOS, E., ISOLDI, L. A., Modelagem Computacional e Otimização da Conversão de Energia com Constructal Design de um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante. **XXXV Iberian Latin-American Congresso in Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2014)**, Fortaleza, CE, Brazil, 2014b.

ESPINEL, M. F., **Estudo Numérico Bidimensional com Aplicação de Constructal Design para a Otimização da Geometria e da Profundidade de Submersão de um Dispositivo Conversor das Ondas do Mar do Tipo Coluna de Água Oscilante**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

FLUENT Inc., **FLUENT 12.0 Theory Guide**, 2009.

GOMES, M. das N., OLINTO, C. R., ROCHA, L. A. O., SOUZA, J. A.; ISOLDI, L. A., *Computational Modeling of a Regular Wave Tank*, **Engenharia Térmica**, Vol. 8, No.1, pp. 44-50, 2009.

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*, **20<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering**, 2009b.

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, pp. 1-10, 2012.

GOMES, M. das N., BONAFINI, B. L., ISOLDI, L. A., NASCIMENTO, C., DOS SANTOS, E. D., ROCHA, L. A. O., *Two-Dimensional Geometric Optimization of an Oscillating Water*

*Column Converter in Laboratory Scale*, **Engenharia Térmica**, Vol. 11, No. 1-2, pp. 30-36, 2012b.

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. das N., **Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante**, Tese de Doutorado, PROMEC-UFRGS, Porto Alegre, RS, 2014.

HIRTH, C.T., NICHOLS, B. D., *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries*. **Journal of Computational Physics**, Vol. 39, No. 1, pp. 201-225, 1981.

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

LIMA, Y.T.B; ROCHA, L.A.O; PLAMER, C.B.; ISOLDI, L.A.; SANTOS, E.D.; GOMES, M.N., Análise numérica com constructal design da forma geométrica na região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante. Proceedings of the **XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, ABMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2015a.

LIMA, Y.T.B; ROCHA, L.A.O; ISOLDI, L.A.; SANTOS, E.D.; GOMES, M.N., Análise numérica com constructal design da forma geométrica na região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante. Proceedings of the **XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, ABMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2015b.

LIU, Z., HYUN, B., e HONG, K., *Application of Numerical Wave Tank to OWC Air Chamber for Wave Energy Conversion*, **International Offshore and Polar Engineering Conference**, Vancouver, BC, Canada, pp. 350-356, 2008a.

LIU, Z., HYUN, B., JIN, J., *Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC*, **Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering**, Vol. 11, No. 1, pp. 35-41, 2008b.

LOPES, N., SANT'ANNA, F. S. P., GOMES, M. N., SOUZA, J. A., TEIXEIRA, P. R. de F., DOS SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., Constructal Design Optimization of the Geometry of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter (OWC-WEC). **proceedings Constructal Law Conference**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil, 2012.

MALISKA, C. R., *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*, **LTC-Livros Técnicos e Científicos**, Rio de Janeiro, Brasil, 453 p., 2004.

MARJANI, A. E., CASTRO, F., BAHAJI, M., FILALI, B., *3D Unsteady Flow Simulation in na OWC Wave Converter Plant*, **Proceedings International Conference on Renewable Energy and Power Quality**, Mallorca, Espanha, 2006.

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

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

OLIVEIRA, L., TEIXEIRA, P. R. F., SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A., Constructal design applied to the geometric optimization of the hydropneumatic chamber dimension of na oscillating water column wave energy device, **proceedings of the 11th Young symposium on experimental solid mechanics**, Brasov, Romania, 2012.

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

RAMALHAIS, R. dos S., **Estudo Numérico de um Dispositivo de Conversão da Energia das Ondas do Tipo Coluna de Água Oscilante (CAO)**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2011.

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

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

ZHANG, Y., ZOU, Q. P., GREAVES, D., Air-water two-phase flow modelling of hydrodynamic performance of an oscillating water column device, **Renewable Energy**, v. 41, pp. 159-170, 2012.