



08 a 11 de Outubro de 2018  
Instituto Federal Fluminense  
Búzios - RJ

## DISPOSITIVOS COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE ACOPLADOS COM VOLUMES DE ENTRADA DISTINTOS: UM ESTUDO NUMÉRICO DA GEOMETRIA USANDO DESIGN CONSTRUTAL

**Yuri Theodoro Barbosa de Lima**<sup>1</sup> – yuri\_vo@hotmail.com

**Luiz Alberto Oliveira Rocha**<sup>1</sup> – laorocho@gmail.com

**Mateus das Neves Gomes**<sup>2</sup> – mateus.gomes@ifpr.edu.br

**Elizaldo Domingues dos Santos**<sup>3</sup> – elizaldosantos@furg.br

**Liércio André Isoldi**<sup>3</sup> – liercioisoldi@furg.br

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PROMEC - UFRGS – Porto Alegre, RS, Brasil

<sup>2</sup> Instituto Federal do Paraná, Campus Paranaguá - Paranaguá, PR, Brasil

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande, Escola de Engenharia, Rio Grande, RS, Brasil

**Resumo.** *O presente trabalho apresenta um estudo numérico bidimensional da conversão de energia elétrica das ondas do mar através do dispositivo Coluna de Água Oscilante (CAO) com volumes de entrada diferentes. O Design Construtal é aplicado, associado ao método de busca exaustiva, para determinar a geometria que apresenta a mais alta potência hidropneumática. A função objetivo é a maximização da energia convertida pelo dispositivo. As restrições do problema são: os volumes de entrada ( $V_{E1}, V_{E2}$ ), os volumes totais ( $V_{T1}, V_{T2}$ ) e a razão entre os volumes de entrada ( $\phi$ ). Os graus de liberdade analisados foram  $H_1/L_1$ ,  $H_2/L_2$ ,  $H_4/l_1$  e  $H_5/l_2$ . No presente trabalho o grau de liberdade  $H_6$  é mantido constante. A solução numérica das equações foi baseada no Método dos Volumes Finitos (MVF). Na interação entre as fases ar e água foi aplicado o método Volume of Fluid (VOF).*

**Keywords:** *Coluna de Água Oscilante, Design Construtal, Energia das Ondas.*

### 1. INTRODUÇÃO

Os recursos energéticos provenientes de energias renováveis são considerados como uma alternativa à demanda excessiva de energia mundial (Nazarpour, 2013). A energia renovável marinha (ERM) é uma alternativa viável, uma vez que os oceanos cobrem cerca de 71% da superfície da terra e contém 97,2 % da água total do planeta (Clément et al., 2002). Baseado nisso, pode-se classificar a energia presente nos oceanos através da sua origem (Tolmasquim, 2016).

As ondas do mar são uma consequência da transferência de energia dos ventos ao longo de uma faixa na superfície do oceano. A energia contida nas ondas é, portanto, uma forma de energia solar concentrada (Tolmasquim, 2016). Entre as várias técnicas disponíveis para extrair energia das ondas, o dispositivo de Coluna de Água Oscilante (CAO) é reconhecido internacionalmente como uma das tecnologias mais desenvolvidas (Falcão & Henriques, 2014).

No presente trabalho, foi utilizado o modelo multifásico VOF (*Volume of Fluid*) no tratamento da interação água-ar, esta metodologia foi, proposta por Hirt e Nichols (1981). Uma gama de pesquisadores já utilizou o método numérico VOF para simulação de conversores de energia das ondas, destacando-se: Conde e Gato (2008), Gomes (2014), Lisboa et al. (2016) e Elhanafi et al. (2017).

As simulações numéricas realizadas nesta investigação, foram desenvolvidas usando um código de dinâmica de fluidos computacional, baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF), através do *software* FLUENT® (Ansys, 2016; Versteeg e Malalasekera, 2007). O domínio computacional consiste de dois dispositivos acoplados localizados em um tanque de ondas.

A otimização geométrica dos dispositivos CAO acoplados e a maximização da potência hidropneumática, se realizam através da associação do método Constructal Design e do método de otimização busca exaustiva (Lima et al., 2017). No presente trabalho, o objetivo é analisar a influência da variação geométrica da câmara hidropneumática, da chaminé e de volumes de entrada distintos para os dispositivos CAO acoplados.

O método Constructal Design é baseado na teoria Constructal, que explica deterministicamente com são criadas as formas de fluxo na natureza (bacias hidrográficas, pulmões, vasos sanguíneos, etc.) baseada no princípio evolucionário de acesso, mais fácil, ao fluxo no tempo (Bejan e Lorente, 2008).

Os trabalhos utilizando Constructal Design no estudo de otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas vem ganhando destaque, dentre eles tem-se as pesquisas desenvolvidas por: Martins et al. (2016); Barbosa (2016); Lima et al. (2017) e Gomes et al. (2017).

Considerando uma geometria bidimensional, as restrições do presente estudo são: os volumes de entrada ( $V_{E1}, V_{E2}$ ), os volumes totais ( $V_{T1}, V_{T2}$ ) e a razão entre os volumes de entrada ( $\phi$ ). Os graus de liberdade considerados são:  $H_1/L_1$  (razão entre altura e largura da câmara hidropneumática do primeiro dispositivo),  $H_2/L_2$  (razão entre altura e largura da câmara hidropneumática do segundo dispositivo),  $H_4/l_1$  (razão entre altura e largura da chaminé do primeiro dispositivo) e  $H_5/l_2$  (razão entre altura e largura da chaminé do segundo dispositivo). No presente trabalho o grau de liberdade  $H_6$  (profundidade de submersão do dispositivo) é mantido constante e igual à  $H_6 = 9,86$  m, a definição da geometria pode ser verificada na Fig. 1.

## 2. DISPOSITIVO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE (CAO) – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Em geral, dois critérios podem ser usados para classificar sistemas de extração de energia das ondas: localização de instalação e método de conversão de energia (Barreiro, 2009; Falcão, 2008). O primeiro critério leva em consideração a localização do dispositivo em relação à costa, agrupam-se desta forma em dispositivos costeiros (*onshore*), próximos da costa (*nearshore*) e afastados da costa (*offshore*) (Cruz e Sarmento, 2004).

Segundo Elhanafi et al (2017), grande parte dos estudos sobre dispositivos CAO concentram-se no mesmos localizados em terra (*onshore*) e próximos da costa (*nearshore*),

pois estão diretamente conectados ao fundo do mar e pela facilidade de transmissão da energia convertida.

O segundo critério classifica os dispositivos em relação ao seu princípio de conversão da energia, dentre eles destacam-se CAO (Coluna de Água Oscilante), corpos oscilantes (Absorção pontual) e dispositivos de galgamento (Teixeira et al., 2013). Os dispositivos Coluna de Água Oscilante são estruturas ocas, parcialmente submersas e abertas para o mar abaixo da superfície livre da água. A Fig. 1, além de ilustrar o dispositivo apresenta suas características físicas como: câmara hidropneumática e chaminé.

Segundo Cruz e Sarmiento (2004), o processo de geração de eletricidade segue duas fases: quando a onda passa pela estrutura, o ar que se encontrava dentro da mesma é forçado a passar por uma turbina que se encontra na chaminé, isto ocorre devido ao aumento da pressão no interior da câmara hidropneumática. Quando a onda completa a passagem pela estrutura, o ar passa novamente pela turbina, desta vez no sentido inverso, dada a pressão inferior no interior da câmara hidropneumática.

### 3. MODELAGEM COMPUTACIONAL

#### 3.1 Domínio Computacional

O domínio computacional bidimensional apresentado nesta pesquisa, consiste de dois dispositivos CAO acoplados com volumes de entrada distintos. Para reproduzir a interação da estrutura com as ondas oceânicas, o mesmo foi inserido em um tanque de ondas, como pode ser observado na Fig. 1.

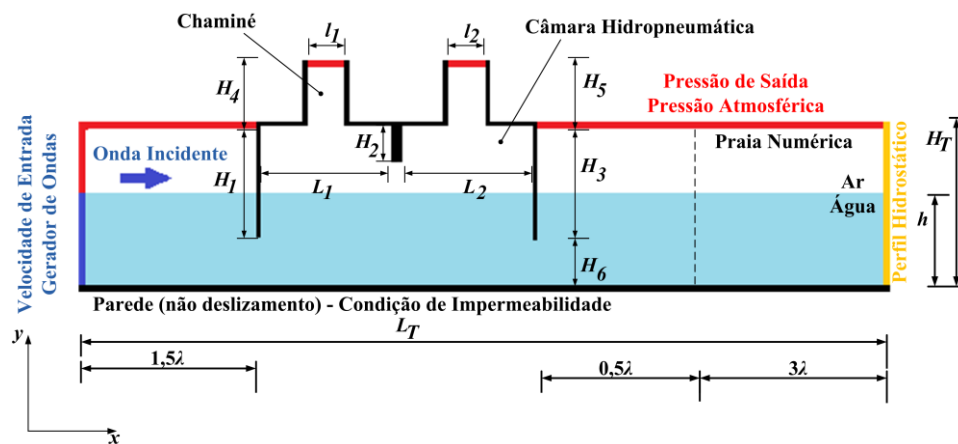


Figura 1- Representação do domínio computacional.

Alguns aspectos como altura e comprimento da onda a ser gerada devem ser levados em consideração, pois através dos mesmos representa-se o problema em uma escala adequada para o domínio computacional. Assim, define-se um período ( $T$ ) e altura ( $H$ ) para a onda gerada, com uma profundidade em relação a superfície livre ( $h$ ). Através da definição destes parâmetros é possível definir a largura ( $L_T$ ) e altura ( $H_T$ ) do tanque de ondas.

O comprimento  $L_T$  é definido através do comprimento de onda ( $\lambda$ ) utilizado, o parâmetro  $H_T$  é determinado pela altura da onda ( $H$ ) e a profundidade ( $h$ ). Segundo, Gomes (2014) recomenda-se que a altura  $H_T$  seja dada, pelo menos, pela profundidade ( $h$ ) mais três vezes a altura da onda. A onda regular e em escala real considerada na presente investigação, seguem as seguintes características:  $T = 7,5$  s,  $H = 1$  m,  $\lambda = 65,4$  m,  $h = 10$  m,  $H_T = 14$  m,  $L_T = 327$  m e  $H_6 = 9,86$  m.

### 3.2 Condições de Contorno

Como pode ser visto na Fig. 1, o gerador de ondas numérico se encontra posicionado a esquerda do tanque de ondas. Para a onda regular utilizada no presente trabalho, utilizou-se a metodologia de geração de ondas disponível no *software* FLUENT®, em que define-se a teoria de ondas a ser utilizada (neste caso Stokes de 2ª ordem), altura da onda e comprimento de onda através do submodelo da metodologia multifásica VOF chamado, *open channel wave BC* [Ansys, 2016]. Para definir a elevação da superfície livre utilizou-se a equação que segue (Dean e Dalrymple, 1991):

$$\eta(x,t) = A \cos(kx - \omega t) + \frac{A^2 k \cosh(kh)}{4 \operatorname{sen}^3(kh)} [2 + \cosh(2kh) \cos 2(kx - \omega t)] \quad (1)$$

em que:  $A$  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 o número de onda ( $\text{m}^{-1}$ ) e a frequência da onda (rad/s), respectivamente.

Com relação às outras ondições de contorno, na parte superior da superfície lateral esquerda, bem como a superfície superior do tanque e das saídas das chaminés dos dispositivos é aplicada uma condição de pressão atmosférica (pressão de saída). Na parte inferior do tanque é aplicado a condição de não deslizamento e impermeabilidade (parede). A superfície direita apresenta uma condição de perfil hidrostático.

A condição inicial imposta, considera o fluido em repouso, com profundidade  $h = 10$  m. Para isso, a metodologia *flat*, presente no *software* ANSYS, é utilizada para inicializar o domínio computacional através da Eq. 1 com tempo  $t = 0$  s.

Para auxiliar na redução da reflexão da onda, foi inserida uma região de praia numérica. Esta metodologia baseia-se na adição de um termo sumidouro ( $S$ ) na equação da conservação da quantidade do movimento para realizar o amortecimento das ondas incidentes. A formulação matemática é apresentada na Eq. (2) (Zwart et al., 2007; Park et al., 1999).

$$S = - \left[ C_1 \rho V + \frac{1}{2} C_2 \rho |V| V \right] \left[ 1 - \frac{z - z_{fs}}{z_b - z_{fs}} \left( \frac{x - x_s}{x_e - x_s} \right) \right]^2 \quad (2)$$

em que  $C_1$  e  $C_2$  são os coeficientes de amortecimento linear e quadrático, respectivamente. O termo  $\rho$  é a massa específica,  $V$  é a velocidade,  $z$  é a posição vertical,  $z_{fs}$  e  $z_b$  são as posições verticais da superfície livre e do fundo,  $x$  é a posição horizontal,  $x_s$  e  $x_e$  são as posições horizontais do início e do fim da praia numérica. Lisboa et al., (2016), recomenda assumir os valores de  $C_1 = 20$  e  $C_2 = 0$ .

### 3.3 Geração da Malha

Para a geração da malha computacional, foi utilizada a metodologia *stretched* (Mavripilis, 1997). Esta estratégia adota a definição de regiões mais refinadas que outras, sendo estas regiões de interesse da investigação como a superfície livre, a Fig. 2 exemplifica o método.

O tanque de ondas dividido em quatro regiões, a região A representa o domínio antes dos dispositivos CAO e está dividida verticalmente em três sub-regiões:  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ . A região da superfície livre da água (região  $A_2$ ) é adotado um refinamento de 40 volumes na direção  $y$  e 120 volumes na direção  $x$ . Além disso, 110 e 30 volumes são usados na direção  $y$  e para a

discretização espacial das regiões  $A_3$  e  $A_1$ , respectivamente, como seguem as recomendações de Barreiro (2009).

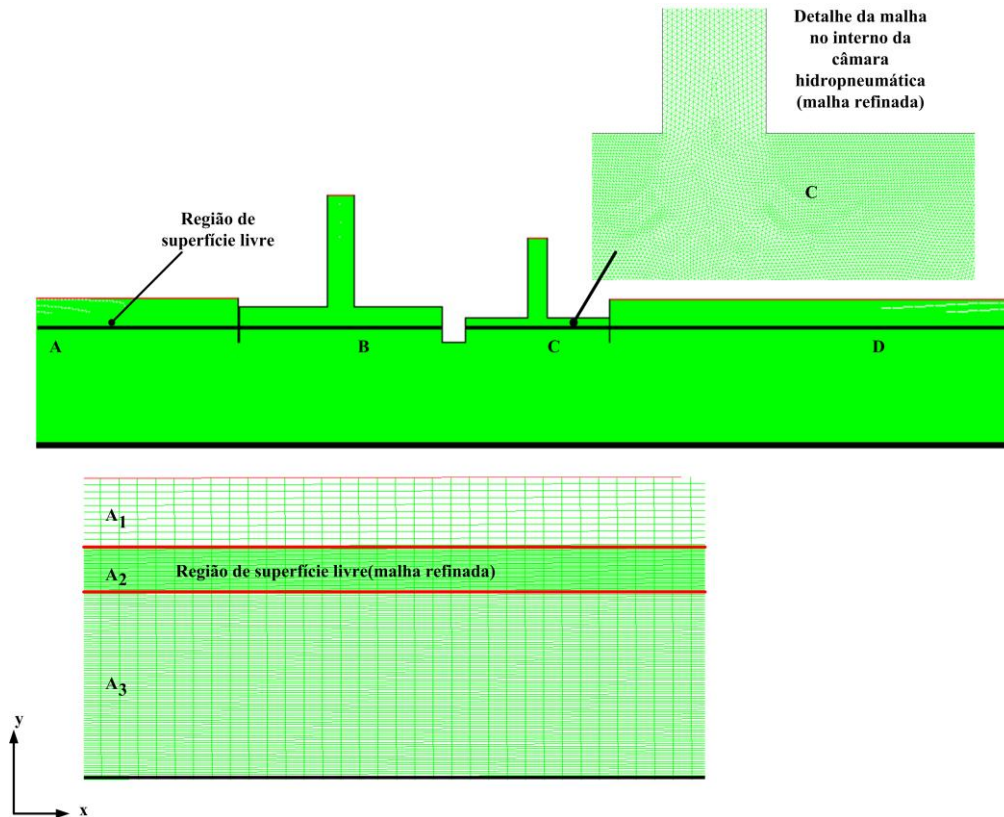


Figura 2- Malha definida para o problema estudado e detalhes da mesma.

A região D apresenta uma malha com 200 volumes horizontais e a região onde encontram-se os dispositivos CAO (região B e C) possuem 620 volumes horizontais e pode-se verificar, no detalhe, um maior refinamento na região interna dos dispositivos.

#### 4. MODELO MATEMÁTICO E NUMÉRICO

O modelo utilizado nas simulações foi o *Volume of Fluid* (VOF), o mesmo consiste em reproduzir a interação entre os fluídos de trabalho envolvidos na simulação numérica, neste caso a água e o ar. O modelo VOF leva em consideração o conjunto de equações formado pela conservação de massa, momento e uma equação para o transporte de fração volumétrica (Hirt e Nichols, 1981).

O equacionamento do modelo utilizado é composto pela equação de conservação de massa com duas fases (ar e água):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3)$$

A equação da conservação de momento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (4)$$

E a equação da fração volumétrica:

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

no qual:  $\rho$  é a massa específica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ ),  $t$  é o tempo (s),  $\bar{v}$  é o vetor velocidade do fluido (m/s),  $p$  é a pressão estática ( $\text{N/m}^2$ ),  $\mu$  é a viscosidade ( $\text{kg/m.s}$ ),  $\bar{\tau}$  é o tensor das tensões ( $\text{N/m}^2$ ) e  $\bar{g}$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ).

Na formulação do modelo VOF, todas as fases são definidas e o volume ocupado por uma fase não pode ser ocupado por outra. Assim, para representar as fases, define-se o conceito de fração volumétrica ( $\alpha$ ), na qual a mesma representa ambas as fases (água e ar) dentro de um volume de controle.

Consequentemente, é necessário que a soma de todas as fases em cada célula seja sempre igual a um. Desta forma, células com  $\alpha_{\text{água}}$  entre 0 e 1 contém a interface entre água e ar ( $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$ ). Se  $\alpha_{\text{água}} = 0$  a célula se encontra sem água e completa de ar ( $\alpha_{\text{ar}} = 1$ ) e o mesmo vale para a célula completa de água e sem ar.

Como as equações de conservação de massa e momento são resolvidas para a mistura de ar e água, é necessário calcular os valores médios para a massa específica e a viscosidade, respectivamente (Srinivasan et al., 2011).

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (6)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (7)$$

A solução da equação de conservação de massa e momento é feita através do Método dos Volumes Finitos (MVF). Para todas as simulações, foi considerado o esquema de advecção *upwind* de primeira ordem para tratamento dos termos advectivos, enquanto que a discretização espacial para a pressão foi realizada através do método PRESTO e o método GEO-RECONSTRUCTION para a fração volumétrica. O acoplamento pressão-velocidade foi empregado o método PISO (Patankar, 1980; Versteeg et al., 2007).

Todas as simulações foram realizadas usando um computador com processador Intel Xeon® com 32 Gb de memória RAM, utilizando processamento em paralelo.

Uma forma de avaliar o modelo VOF aplicado à simulação numérica de dispositivos conversores de energia das ondas é comparar a elevação transiente da superfície livre numérica com a respectiva solução analítica na mesma posição, calculada pela Eq. 1.

A Fig. (3a) apresenta a comparação da onda analítica e numérica, a diferença relativa entre as soluções foi medida instantaneamente, e a média das diferenças foi de, aproximadamente, 1,48 %. O erro máximo encontrado foi em torno de 5,44 % para o tempo total de 225s, indicando a acurácia do modelo utilizado.

A Fig. (3b) representa um intervalo do tempo total apresentado na Fig. (3a), onde pode-se verificar que os máximos e mínimos da solução numérica e analítica estão muito próximos.

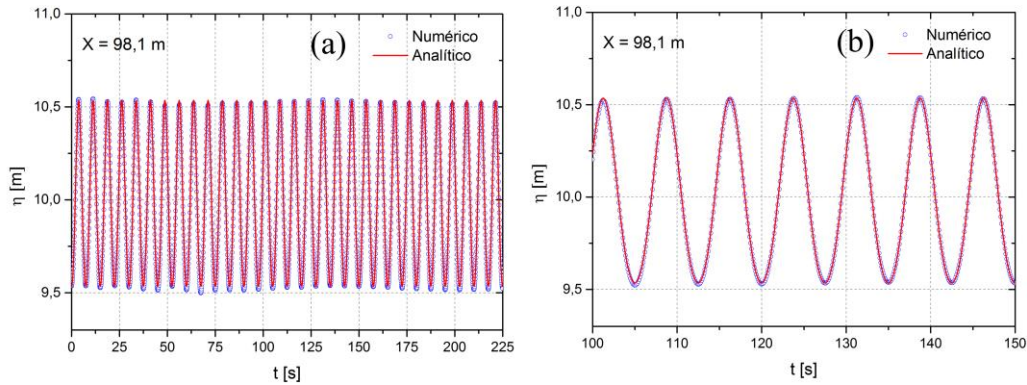


Figura 3- Elevação da superfície livre numérica e analítica.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Formulação com Design Construtal

O Design Construtal é um método que relaciona graus de liberdade, restrições e função objetivo, buscando avaliar a influência da geometria no desempenho de um determinado sistema (Bejan e Zane, 2012). Associando o método Design Construtal ao método de busca exaustiva, pode-se testar todas as geometrias possíveis para o presente trabalho e assim determinar a que maximiza o desempenho do sistema em um determinado intervalo de busca.

O problema em questão, pode ser considerado multi objetivo, um vez que as funções a serem consideradas são a média RMS das seguintes grandezas: vazão mássica, pressão e potência hidropneumática. As restrições são: o volume de entrada do primeiro dispositivo posicionado ( $V_{E1}$ ), o volume de entrada do segundo dispositivo posicionado ( $V_{E2}$ ), o volume total do primeiro ( $V_{T1}$ ) e segundo ( $V_{T2}$ ) dispositivo e a razão entre os volumes de entrada ( $\phi$ ). Segue a formulação das mesmas:

$$V_{E1} = H_1 L_1 L \quad (8)$$

$$V_{E2} = H_2 L_2 L \quad (9)$$

$$V_{T1} = V_{E1} + H_4 l_1 L \quad (10)$$

$$V_{T2} = V_{E2} + H_5 l_2 L \quad (11)$$

$$\phi = \frac{V_{E1}}{V_{E2}} \quad (12)$$

A dimensão  $L$ , presente nas equações acima, é mantida constante e igual a um, pois o problema é considerado bidimensional. Usando como referência o clima de ondas, considera-se que  $L_1 = \lambda$  e  $H_1 = H$ , definindo a restrição  $V_{E1}$  (Gomes, 2014). O segundo volume de entrada é determinado por  $V_{E2} = V_{E1}/2$ .

Para determinar os volumes totais, é definido que  $V_{E1}$  representa 70% do  $V_{T1}$ , o mesmo vale para  $V_{T2}$ . Ou seja,  $V_{T1} = 93,4 \text{ m}^3$  e  $V_{T2} = 46,7 \text{ m}^3$ . As outras restrições do problema seguem os seguintes valores:  $V_{E1} = 65,4 \text{ m}^3$ ,  $V_{E2} = 32,7 \text{ m}^3$  e  $\phi = 2$ .



Os graus de liberdade analisados são:  $H_1/L_1$  (razão entre altura e largura da câmara hidropneumática do primeiro dispositivo),  $H_2/L_2$  (razão entre altura e largura da câmara hidropneumática do segundo dispositivo),  $H_4/l_1$  (razão entre altura e largura da chaminé do primeiro dispositivo) e  $H_5/l_2$  (razão entre altura e largura da chaminé do segundo dispositivo). O grau de liberdade  $H_6$  (profundidade de submersão do dispositivo) é mantido constante e igual à  $H_6 = 9,86$  m.

Através das equações anteriores é possível obter as formulações que determinam as larguras ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $l_1$  e  $l_2$ ) e as alturas ( $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_4$  e  $H_5$ ) do problema estudado. As formulações para o segundo dispositivo seguem as mesmas equações, onde as componentes do primeiro dispositivo devem ser substituídas pela do segundo.

$$L_1 = \left[ \frac{V_{E1}}{\left( \frac{H_1}{L_1} \right) L} \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$l_1 = \left[ \frac{V_{T1} - V_{E1}}{\left( \frac{H_4}{l_1} \right) L} \right]^{1/2} \quad (14)$$

$$H_1 = L_1 \left( \frac{H_1}{L_1} \right) \quad (15)$$

$$H_4 = l_1 \left( \frac{H_4}{l_1} \right) \quad (16)$$

## 5.2 Caso Estudado

Ao todo foram avaliadas sessenta e três configurações geométricas: sete variações de  $H_1/L_1$  e  $H_2/L_2$  e nove variações de  $H_4/l_1$  e  $H_5/l_2$ . Para calcular os valores médios de pressão, vazão mássica e potência hidropneumática, a média RMS (*Root Mean Squad*) foi utilizada, sua formulação pode ser consultada em Marjani et al., (2006).

A pressão dentro da câmara hidropneumática tem uma relação diretamente proporcional com a potência hidropneumática. Conforme ocorre o aumento da altura e diminuição da largura das duas câmaras, nota-se que no caso de maiores larguras das câmaras e chaminés, associado as menores alturas, das mesmas, apresentam a maior pressão dentro do dispositivo, isto pode ser verificado na Fig, 4A.

A Fig. 4B apresenta as diferentes variações de vazão mássica e nota-se que o caso de mais alta pressão apresenta a mais baixa vazão mássica, em função da diminuição da velocidade do ar na chaminé, fato este que pode ser verificado através da Eq. (18). A vazão mássica, segue uma tendência inversa da pressão.

Através da pressão e da vazão mássica é possível calcular a potência hidropneumática através da expressão que segue (Dizadji e Sajadian, 2011):



$$P_{hid} = \left( P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (17)$$

no qual:  $P_{ar}$  é a pressão estática na chaminé do dispositivo (Pa),  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\dot{m}$  é a taxa de vazão mássica ( $\text{kg/s}$ ),  $v_{ar}$  é a velocidade do ar na chaminé ( $\text{m/s}$ ) dada por:

$$v_{ar} = \frac{\dot{m}}{A\rho_{ar}} \quad (18)$$

em que:  $A$  representa a área da sessão transversal da chaminé ( $\text{m}^2$ ). As expressões que determinam pressão estática, pressão total, fluxo de massa e potência da onda incidente podem ser encontradas em Gomes (2014). A Fig. 4C apresenta a potência hidropneumática RMS para os diferentes valores de graus de liberdade analisados. Como a pressão influencia de forma diretamente proporcional a potência, nota-se que o caso de mais alta potência hidropneumática está associado ao de mais alta pressão.

Assim, o caso de mais alta potência hidropneumática apresentou a seguinte combinação dos graus de liberdade:  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = 0,0229$  ( $H_1 = 1,22$  m,  $H_2 = 0,87$  m,  $L_1 = 53,4$  m e  $L_2 = 37,6$  m) e  $H_4/l_1 = H_5/l_2 = 2,3$  ( $H_4 = 8,1$  m,  $H_5 = 5,7$  m,  $l_1 = 3,5$  m e  $l_2 = 2,5$  m), obtendo um total de 24677,7 W ou 24,7 kW de potência hidropneumática.

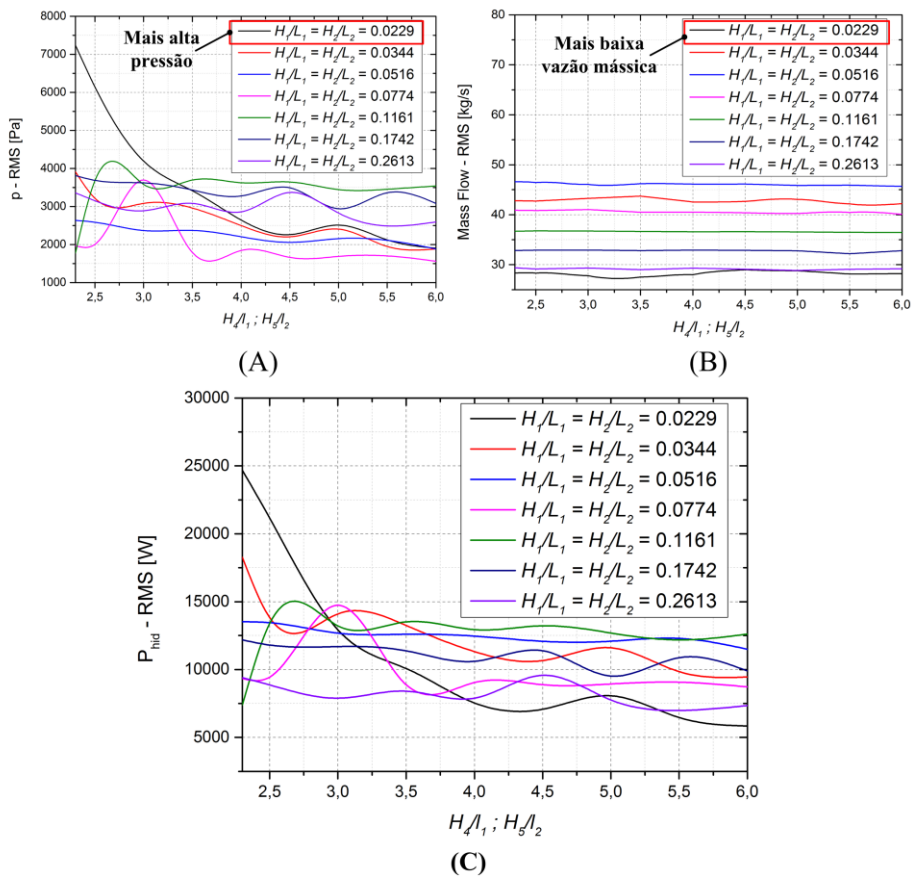


Figura 4- Para os diferentes casos estudados: (A) Pressão, (B) Vazão Mássica e (C) Potência Hidropneumática.

O caso de mais baixo desempenho apresentou configurações iguais a:  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = 0,0229$  e  $H_4/l_1 = H_5/l_2 = 6$  ( $H_4 = 12,9$  m,  $H_5 = 9,2$  m,  $l_1 = 2,3$  m e  $l_2 = 1,5$  m), obtendo um total de 5841,1 W ou 5,8kW de potência hidropneumática. Comparando os resultados obtidos para a mais alta e mais baixa potência hidropneumática, observa-se um ganho de 18,6 kW, cerca de 76,3 % de aumento.

## 6. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico do efeito da geometria sobre a potência hidropneumática, aplicando-se volumes de entrada diferentes para dois dispositivos CAO acoplados.

A análise dos resultados apresentados mostra que a maior potência hidropneumática ocorre no caso de maior largura ( $L_1$  e  $L_2$ ) e menor altura ( $H_1$  e  $H_2$ ) da câmara hidropneumática para ambos os dispositivos avaliados, o mesmo vale para as chaminés dos dispositivos. O caso de mais baixa potência encontra-se quando ainda se tem a menor razão entre larguras e alturas  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = 0,0229$ , mas as definições da chaminé são as maiores alturas ( $H_4$  e  $H_5$ ) e menores larguras ( $l_1$  e  $l_2$ ).

Os resultados mostram que a maior potência hidropneumática encontra-se para  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = 0,0229$  e  $H_4/l_1 = H_5/l_2 = 2,3$ , obtendo um total de 24677,7 W ou 24,7 kW. O caso de mais baixa potência apresenta  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = 0,0229$  e  $H_4/l_1 = H_5/l_2 = 6$ , tendo um total de 5841,1 W ou 5,8kW.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e CNPq. Agradecimentos a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e ao Instituto Federal do Paraná (IFPR).

## REFERÊNCIAS

- Ansys (2016), *Theory Guide FLUENT 2016*.
- Barbosa, D. V. E. (2016), *Análise Numérica de Dispositivos de Extração de Energia das Ondas do Tipo Galgamento*, Dissertação de mestrado, Engenharia Oceânica/FURG, Rio Grande.
- Barreiro, T. G. (2009), *Estudo da interação de uma onda monocromática com u conversor de energia*, Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia/ Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Bejan, A.; Lorente, S. (2008), *Design with Constructal Theory*, Wiley, Hoboken.
- Bejan, A.; Zane, J. (2012), *Design in Nature*, Doubleday (ed.), USA.
- Clément, A. (2002), *Wave energy in Europe: current status and perspectives*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 6, 405-431.
- Conde, J. M. P.; Gato, L. M. C. (2008), *Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter*, Renewable Energy, vol 33, 2637-2644.
- Cruz, J. e Sarmiento, A. (2004), *Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais*, Instituto do Ambiente (ed.), Amadora.
- Dean, R. G.; Dalrymple, R. A. (1991), *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific, vol 2.
- Dizadji, N.; Sajadian, S. E. (2011), *Modeling and optimization of the chambre of OWC system*, Energy, vol 36, 2360-2366.
- Elhanafi, A.; Macfarlane, G.; Fleming, A.; Leong, Z. (2017), *Experimental and numerical investigations on the hydrodynamic performance of a floating-moored oscillating water column wave energy converter*, Applied Energy, vol 205, 369-390.
- Falcão, A. F. O. (2008), *The development of wave energy utilization*, International energy agency implementing agreement on ocean energy system, Annual Report.

- Falcão, A. F. O e Henriques, J. C. (2014), *Model-prototype similarity of oscillating-water-column wave energy converters*, International Journal of Marine Energy, vol 6, 18-34.
- Gomes, M. N. (2014), "*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.
- Gomes, M. N.; Deus, M. J.; Santos, E. D.; Isoldi, L. A.; Rocha, L. A. O. (2017), *The Choice of Geometric Constraints Value Applied in the Constructal Design for Oscillating Water Column Device*, XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Santa Catarina, 1-17.
- Hirth, C. T. e Nichols, B. D. (1981), *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries*. Journal of Computational Physics, vol 39, 201-225.
- Lima, Y. T. B.; Rocha, L. A. O.; Gomes, M. N. G.; Isoldi, L. A.; Santos, E. D. (2017), *Numerical evaluation of hydropneumatic power for two oscillating water column (OWC) devices coupled using constructal design*, XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Santa Catarina.
- Lisboa, R. C.; Teixeira, P. R. F.; Didier, E. (2016), *Regular and Irregular Wave Propagation Analysis in a Flume with Numerical Beach Using a Navier-Stokes Based Model*, Defect and Diffusion Forum, vol 372, 81-90.
- Marjani, A. E.; Castro, F.; Behaji, M.; Filali, B. (2006), *3D Unsteady Flow Simulation in OWC Wave Converter Plant*, In Proceedings International Conference on Renewable Energy and Power Quality, Mallorca, Espanha.
- Martins, J. (2016), *Design Construtal de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real para Diferentes Áreas de Construção e Ondas Monocromáticas*. Dissertação de mestrado, Engenharia Oceânica/FURG, Rio Grande
- Mavripilis, D. J. (1997), *Unstructured Grid Techniques*, Annual Reviews Fluid Mechanics, vol 29, 473-514.
- Nazarpour, E. (2013), *Ocean's Renewable Power and Review of Technologies: Case Study Waves*, New Developments in Renewable Energy, Hasan Arman, IntechOpen, Capítulo 12.
- Park, J.; Kim, M.; Mitaya, H. (1999), *Fully non-linear free surface simulations by a 3D viscous numerical wave tank*, International Journal for Numerical Methods in Fluid, vol 29, 685-703.
- Patankar, S. V. (1980), *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill (ed.), USA.
- Srinivasan, A. J.; Salazar K. (2011), *Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology*, Applied Mathematical Modeling, vol 35, 3710-3730.
- Teixeira, P. R. F.; Davyt, D. P.; Didier, E.; Ramalhais, R. (2013), *Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier-Stokes equations*, Energy, vol 61, 513-530.
- Tolmasquim, A. (2016), *Energia Renovável Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*, Interciência (ed.), Rio de Janeiro, Brasil.
- Versteeg, H. K.; Malalasekera, W. (2007), *An Introduction to Computational Fluid Dynamics-The Finite Volume Method*, Person (ed.), England.
- Zwart, P.; Godin, P.; PeManrose, J.; Rhee, S. (2007), *Ship Hull Simulations with a Coupled Solution Algorithm*, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Symposium on Practical Designs of Ships and Others Floating Structures, Houston, Texas.

## OSCILLATING WATER COLUMN DEVICES COUPLED WITH DIFFERENT VOLUMES OF ENTRANCE: A NUMERICAL STUDY OF GEOMETRY USING CONSTRUCTAL DESIGN

**Abstract.** *The present work presents a two dimensional numerical study of the conversion of electric energy from the sea waves through the device Oscillating Water Column (CAO) with different entrance volumes. The Constructal Design is applied, associated to the exhaustive search method, to determine the geometry that presents the highest hydropneumatic power. The objective function is to maximize the energy converted by the device. The constraints of the problem are: the entrances volumes ( $V_{E1}, V_{E2}$ ), the total volumes ( $V_{T1}, V_{T2}$ ) and the ration between the entrances volumes ( $\phi$ ). The degrees of freedom analyze are:  $H_1/L_1$ ,  $H_2/L_2$ ,  $H_4/l_1$  and  $H_5/l_2$ . In the present work the degree of freedom  $H_6$  is kept constant. The numerical solution of the equations was based on the Finite Volume Method (FVM). In the interaction between the air and water phases, the method Volume of Fluid (VOF) is employed.*

**Keywords:** *Oscillating Water Column, Constructal Design, Wave Energy.*