

Article

Aplicação de design construtal para a análise geométrica de um dispositivo coluna de água oscilante no formato de duplo trapézio submetido a ondas regulares

Picanço, C.E. ^{1,*}, Oliveira, D.M. ², Cunha, M. ³, Isoldi, L. A. ⁴, Santos, E. D. ⁵, Rocha, L. A. ⁶ and Gomes, M.N. ⁷

¹ IFPR; cezar151802@gmail.com

² IFPR; danielemelodeoliveira@outlook.com

³ IFPR; Marcel_Cunha@hotmail.com

⁴ FURG; liercioisoldi@furg.br

⁵ FURG; elizaldosantos@furg.br

⁶ UNISINOS; luizor@unisinos.br

⁷ UFRGS; mateus.gomes@ifpr.edu.br

* Correspondence: cezar151802@gmail.com.

Received: 14/12/2018; Accepted: 05/01/2019; Published: 06/03/2019

Resumo: O presente artigo aborda numericamente a forma geométrica de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) no formato de um duplo trapézio. O sistema foi submetido a incidência de ondas regulares com períodos iguais a: $T = 3,0$ s, $T = 7,5$ s e $T = 15,0$ s, respectivamente. O objetivo é maximizar a potência hidropneumática disponível. Para a análise computacional é empregado um código de dinâmica dos fluidos computacional baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é aplicado no tratamento da interação água-ar. O domínio computacional é representado por um tanque de ondas com o dispositivo CAO acoplado. É empregado o *Design Construtal* para a avaliação geométrica. O grau de liberdade analisado foi H_1/L (razão entre a altura e o comprimento de entrada da câmara hidropneumática). As restrições do problema são a área de entrada da câmara hidropneumática e a área total da câmara CAO que são mantidas constantes e a razão L_1/L (razão entre largura da câmara CAO e a largura de entrada da câmara), que foi predeterminada como uma constante c com valores específicos: 1,25 / 1,50 / 1,75. A partir dos dados obtidos são analisados: fator de amplificação, vazão mássica, pressão e potência hidropneumática. Os resultados indicam que a análise de configuração geométrica de dispositivo CAO conduz ao máximo aproveitamento da potência hidropneumática disponível, sendo que o caso de maior desempenho obtido para a potência hidropneumática, quando $H_1/L = 0,0230$, é cerca de 1200 vezes maior que o pior resultado obtido nesse estudo.

Palavras-chave: *Design Construtal*. Coluna d'água oscilante (CAO). *Volume of Fluid*. Ondas regulares. Energia das ondas.

Application of constructal design for the geometric analysis of a oscillating water column device in the form of double trapezium subjected to regular waves

Abstract: The present article numerically addresses the geometric shape of a sea wave energy converter in electrical energy of the type Oscillating Water Column (OWC) in the form of a double trapezoid. The system was subjected to the incidence of regular waves with periods equal to: $T = 3.0$ s, $T = 7.5$ s e $T = 15.0$ s, respectively. The goal is to maximize the hydropneumatic power available. For computational analysis, a computational fluid dynamics code based on the Finite Volume Method (FVM). The Multiphase Volume of Fluid (VOF) model is applied in the treatment of water-air interaction. The computational domain is represented by a wave tank with the coupled OWC device. The

Construtal Design is used for the geometric evaluation. The degree of freedom analyzed was H_1/L (ratio between the height and the entrance length of the hydropneumatic chamber). The constraints of the problem are the hydropneumatic chamber inlet area and the total area of the OWC chamber which are kept constant and the ratio L_1/L (ratio between the width of the OWC camera and the input width of the camera), which was predetermined as a constant c with specific values: 1.25 / 1.50 / 1.75. From the obtained data are analyzed: amplification factor, mass flow, pressure and hydropneumatic power. The results indicate that the geometric configuration analysis of CAO device leads to maximum utilization of available hydropneumatic power, and the case of higher performance obtained for hydropneumatic power, when $H_1/L = 0.0230$, is about 1200 times greater than the worst result obtained in this study.

Palavras-chave: Design Construtal. Oscillating Water Column (OWC). Volume of Fluid. Regular waves. Wave energy.

1. Introdução

Atualmente, muito se discute a respeito de fontes de energias. A matriz energética mundial tem como base fontes de energias primárias, tais como o petróleo e o carvão mineral, que são as principais. Outra questão em pauta diz respeito a conservação ambiental, atrelado a isso estão as grandes demandas energéticas devido ao aumento populacional e ao desenvolvimento industrial e tecnológico (Torres, 2012).

As fontes renováveis de energia ganham destaque nesse cenário, como a energia eólica, hidroelétrica, solar e a energia contida nos oceanos. A energia proveniente dos oceanos, pode ser convertida em energia elétrica de diversas maneiras, dentre os principais tipos de conversores estão os do tipo corpos flutuantes, os de galgamento e os dispositivos tipo coluna de água oscilante (CAO) (Cruz e Sarmiento, 2004).

O presente trabalho tem como objetivo analisar a geometria e dimensões de um dispositivo conversor de energia do tipo CAO na forma de um duplo trapézio, com o propósito de maximizar a potência hidropneumática disponível.

Para analisar a geometria do dispositivo CAO, foi empregado o método Design Construtal baseado na Teoria *Constructal* (Bejan e Lorente, 2008). A modelagem computacional foi baseada no método *Volume of Fluid* VOF (Hirt e Nichols, 1981). Esse método é geralmente empregado em escoamentos multifásicos com dois os mais fluidos emissíveis, no caso água e ar.

2 Aspectos computacionais

2.1 Princípio de Funcionamento do Dispositivo CAO

Os dispositivos de conversão de energias das ondas em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante, são estruturas ocas de material rígido, como concreto por exemplo, que são posicionadas na água de forma que uma fração de altura total fica abaixo da linha da água.

Seu princípio de funcionamento se baseia em uma diferença de pressão criada no momento em que a onda incide no dispositivo, forçando o ar presente dentro câmara CAO passar pela turbina. No momento em que a onda passa por toda a estrutura da câmara hidropneumática, o ar passa novamente pela turbina, porém no sentido oposto. Afim de aproveitar esse duplo fluxo de ar, um tipo especial de turbina é usado, que tem como principal característica manter o sentido de rotação, independentemente do sentido de escoamento do ar, tal tipo de turbina é conhecida como *Wells* (vide Fig. 1) (Cruz e Sarmiento, 2004; Nielsen et al., 2006; Twidell e Weir, 2006; Gomes, 2010).

No presente trabalho o efeito da turbina é desconsiderado, por motivos de simplificações do modelo computacional.

2.2 Representação Computacional

Uma forma de analisar a interação do fluido com a estrutura, é considerar que o dispositivo a ser analisado está em um tanque de ondas (vide Fig. 1) conforme os trabalhos de Horko (2007); Liu et al. (2008); Gomes (2009). Há vários estudos considerando tanques de ondas numéricas, os quais são submetidos a um regime de ondas regulares, isto é, ondas com período (T), altura (H), comprimento de onda (λ) e profundidade de propagação (h) bem definidos Horko (2007); Liu et al. (2008); Gomes et al. (2009), Gomes (2010), Gomes (2014).

Uma vez que essas características estão definidas, é possível determinar as dimensões do tanque de ondas, como o comprimento (C_T) que é de aproximadamente 5λ , altura (H_T) de pelo menos $2H+h$ e profundidade (h), vide Fig. 1. A profundidade do tanque é a mesma de propagação da onda h (Gomes et al.,2012).

No presente trabalho, três regimes de ondas são considerados: onda 1 com $T = 3,0$ s e $\lambda = 14,03$ m; Onda 2 com $T = 7,5$ s e $\lambda = 65,35$ m e Onda 3 com $T = 15,0$ s e $\lambda = 144,04$ m. Ambas com uma altura $H = 1,5$ m e com profundidade de propagação $h = 10$ m.

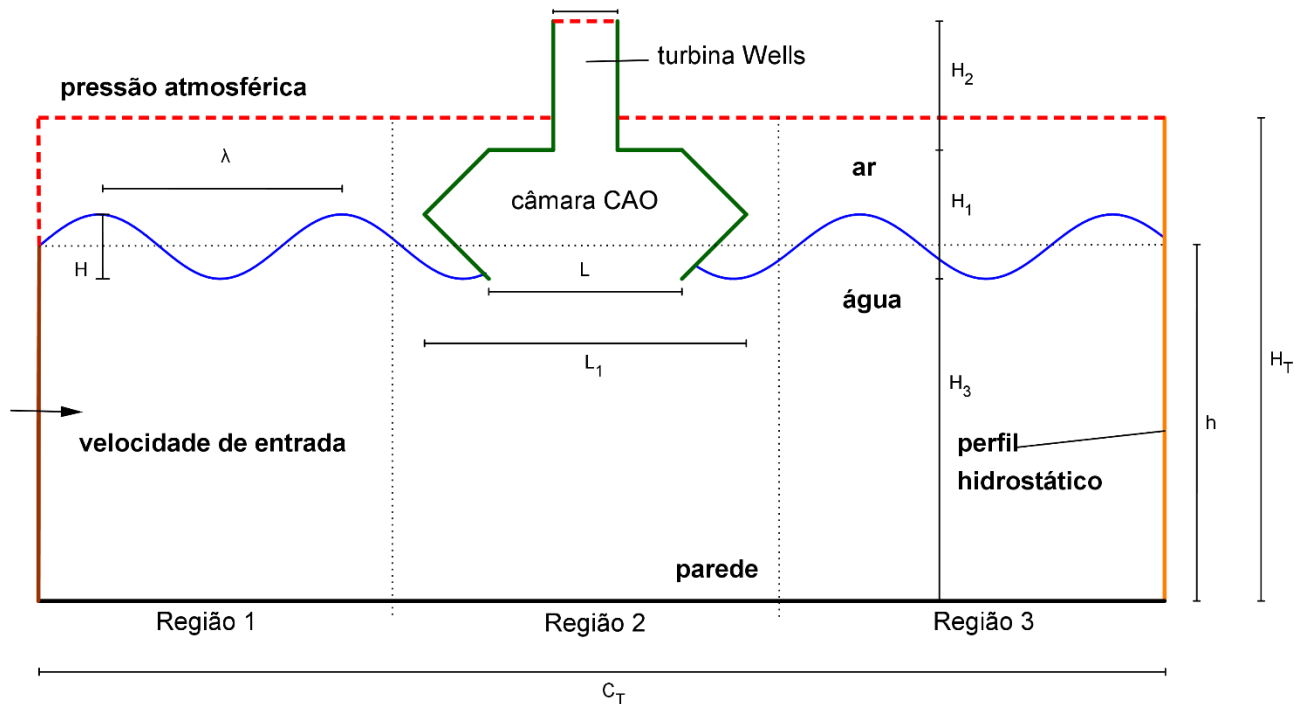


Figura 1. Representação do domínio computacional – Câmara CAO no formato de duplo trapézio.

2.3 Condições de contorno

Na Fig. 1 é possível observar que a geração da onda ocorre na região da esquerda do tanque de ondas, através de uma condição de velocidade prescrita, semelhante ao empregado em Gomes et al. (2009). Nesta metodologia são usadas como condições de contorno as componentes horizontal (u) e vertical (w) da velocidade de entrada da onda, já implementadas no FLUENT.

As componentes da velocidade, são baseadas na Teoria de Stokes de 2ª ordem, são funções dependentes do espaço e do tempo. Dessa forma as equações impostas na superfície de entrada são dadas por (McCormick, 1976; Dean e Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005):

$$u = \frac{H g k}{2 \omega} \frac{\cosh(kz+kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3 H^2 \omega k}{16} \frac{\cosh 2k(k+z)}{\text{sen}^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \tag{1}$$

$$w = \frac{H g k}{2 \omega} \frac{\text{senh}(kz+kh)}{\omega \text{senh}(kh)} \text{sen}(kx - \omega t) + \frac{3 H^2 \omega k}{16} \frac{\text{senh} 2k(k+z)}{\text{cos}^4(kh)} \text{sen} 2(kx - \omega t) \tag{2}$$

onde: H é a altura da onda (m); g a aceleração da gravidade (m/s^2); k é o número de onda dado por $k = 2\pi/\lambda$ (m^{-1}), onde λ é o comprimento da onda (m); h é a profundidade (m); T é o período da onda (s); ω é a frequência dada por $\omega = 2\pi/T$ (rad.s^{-1}); 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).

Na superfície lateral esquerda superior, assim como na parte superior do tanque e na saída da chaminé do dispositivo CAO (vide superfícies tracejadas vermelhas na Fig. 1), é aplicada uma condição de contorno de pressão atmosférica. Já nas paredes do dispositivo CAO (linhas verdes) e no fundo do tanque, é imposta a condição de não deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula. Na linha da direita (linha laranja na Fig. 1), é adotado um perfil hidrostático como condição de contorno. Entre o dispositivo e essa linha está inserida uma praia numérica que tem como objetivo eliminar a reflexão das ondas dentro do tanque. A utilização do método da praia numérica consiste

em adicionar termos de sumidouro nas equações de momento em uma dada região do tanque. Esses termos são dados por (Lisboa *et al*, 2016; Dizadji & Sajadian, 2011):

$$S = - \left[C_1 \rho V + \frac{1}{2} C_2 \rho |V|V \right] \left(1 - \frac{z-z_{fs}}{z_b-z_{fs}} \right) \left(\frac{x-x_s}{x_e-x_s} \right)^2 \quad (3)$$

onde C_1 e C_2 são os coeficientes de amortecimento linear e quadrático, respectivamente; ρ é a massa específica do fluido; V é a velocidade; z é a posição normal; z_{fs} é a posição vertical da superfície livre e z_b a posição vertical do fundo; x representa a posição horizontal, enquanto que x_s marca o início e x_e o fim da praia numérica, e S é o termo de sumidouro. Seguindo as recomendações de Lisboa *et al*, (2016), $C_1 = 20$ e $C_2 = 0$. Com relação às condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso, com profundidade $h = 10,00$ m.

2.4 Malha

Para a discretização do domínio computacional, foi utilizada a estratégia de gerar uma malha mais refinada em regiões de maior interesse, como na superfície livre, região na qual a onda irá se propagar, de acordo com o indicado em Gomes (2014). Esta estratégia é baseada na técnica de malhas *stretched* (Mavriplis, 1997).

Como pode ser visto na Fig. 2 a região 2 e a área da superfície livre são regiões de interesse computacional. Quadriláteros com 0,1m de lado foram utilizados na região 2 para a discretização do dispositivo CAO.

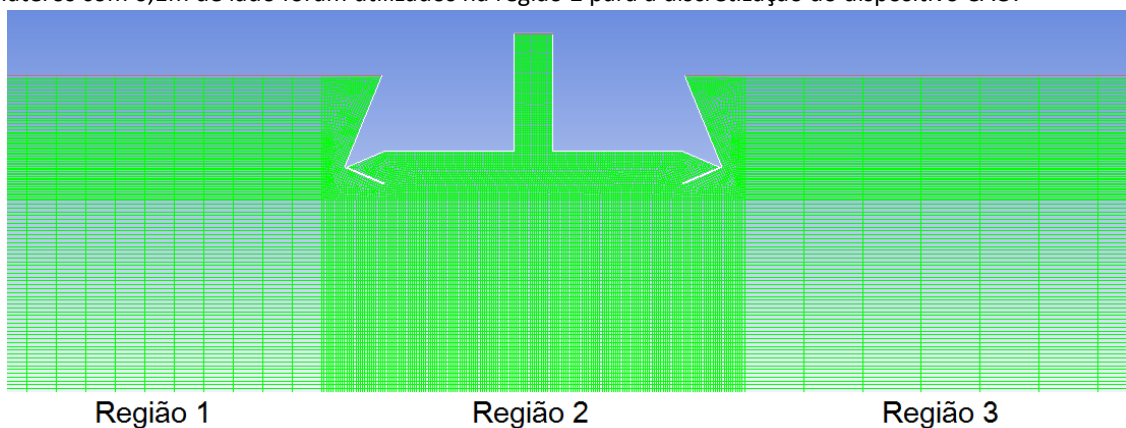


Figura 2. Discretização da malha para as diferentes regiões do domínio computacional.

3. Modelo matemático

3.1 Design Constructal aplicado a um dispositivo CAO na forma de duplo trapézio

A teoria *Constructal*, de forma sucinta, explica a formação de estruturas sujeitas a algum tipo de fluxo, alguns exemplos de tais estruturas podem ser vistos no *design* de uma árvore, pulmões, artérias, até mesmo a forma de um peixe pode ser explicada pela teoria *Constructal*, que se baseia na premissa que para um sistema submetido a algum tipo de fluxo sobreviver, este tem que evoluir de forma a facilitar o acesso das correntes de fluxo (Bejan e Lorente, 2008).

O *Design Constructal* é um método usado para otimizar formas geométricas submetidas a algum tipo de fluxo. Segundo essa teoria, o fluxo é adaptável e a geometria ótima é prevista a partir de um princípio de maximização global. Outro aspecto dessa teoria, a geometria deve ser submetida a restrições globais e variadas de acordo com seu grau de liberdade (Bejan, 2000).

Para empregar o *Design Constructal* na avaliação geométrica de um sistema físico, é preciso um parâmetro de performance (grandeza a ser avaliada: vazão mássica, potência, energia, etc), graus de liberdade (parâmetro geométrico que pode variar durante a otimização do processo) e restrições geométricas (parâmetros que são mantidos constantes durante o processo de avaliação).

O objetivo desse trabalho é, através do *I*, analisar a forma geométrica e as dimensões de dispositivo CAO de modo a maximizar a potência hidropneumática. Para contemplar todas as geometrias possíveis foi utilizado a busca exaustiva.

Os graus de liberdade usados foram H_3 (profundidade de submersão da câmara CAO), $(H_2/l) = 3$ (razão entre altura e comprimento da chaminé) e (H_1/L) (razão entre a altura e comprimento de entrada da câmara CAO),

somente (H_1/L) varia, os outros graus de liberdade foram mantidos fixos. A área de entrada (A_E) do dispositivo CAO (área dos trapézios), corresponde a 70% da área total conforme indicado em Gomes (2014) e é dada por:

$$A_E = \frac{(L+L_1)}{2} H_1 \quad (4)$$

A área total é dada por:

$$A_T = A_E + H_2 l \quad (5)$$

A partir da Eq. (4) é possível obter uma equação que determina a dimensão para o comprimento (L) da câmara CAO:

$$L = \left[\frac{2A_E}{(1+c)\left(\frac{H_1}{L}\right)} \right]^{1/2} \quad (6)$$

Onde c é uma constante de proporcionalidade entre L_1 e L : de forma que, vide Fig. 1:

$$L_1 = c L \quad (7)$$

no qual a constante c assumia três valores iguais para as três ondas: $c = 1,25$, $c = 1,50$ e $c = 1,75$.

A altura da câmara hidropneumática H_1 pode ser obtida através da Eq. (6):

$$H_1 = L \left(\frac{H_1}{L} \right) \quad (8)$$

E a partir da Eq. (5) é possível obter as equações que determinam as dimensões para o diâmetro (l) e altura (H_2) da chaminé, respectivamente:

$$l = \left[\frac{A_T - A_E}{\left(\frac{H_2}{l}\right)} \right]^{1/2} \quad (9)$$

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

É importante destacar que a profundidade de submersão H_3 é mantida constante, $H_3 = 9,25m$, em todos os casos. O objetivo é levar em consideração as características físicas da onda, com base nisso há a variação da geometria do dispositivo CAO. Portanto como critério para a definição da restrição da área de entrada da câmara hidropneumática (A_E) considera-se uma situação inicial em que o comprimento do dispositivo CAO (L) é igual ao comprimento da onda incidente (λ) e que a altura do dispositivo CAO (H_1) é igual à altura da onda incidente (H).

As grandezas objetivo a serem consideradas ao longo deste trabalho são a média RMS das seguintes: vazão mássica, pressão e potência hidropneumática.

3.2 Modelo Volume of Fluid

Nesse trabalho é empregado o método *Volume of Fluid* VOF (Hirt e Nichols, 1981). 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 (α). Conseqüentemente, 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:

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

a equação da fração volumétrica:

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

e as equações de quantidade de movimento:

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

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

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \tag{14}$$

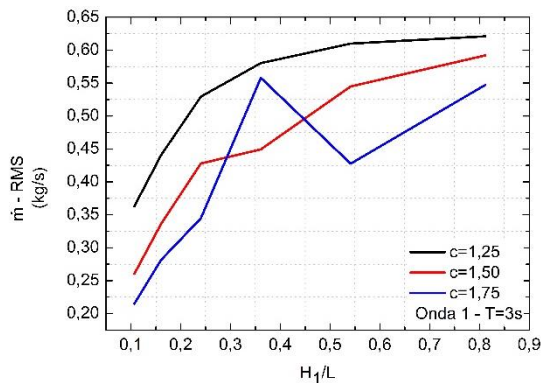
$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \tag{15}$$

Para solucionar as equações da conservação da massa e da quantidade de movimento foi empregado um código baseado no Método de Volumes Finitos – MVF (ANSYS, 2016). Para todas as simulações, o método PRESTO foi utilizado para a discretização espacial da pressão, enquanto que o método *GEO-RECONSTRUCTION* foi utilizado para a fração volumétrica. O método PISO foi utilizado para o acoplamento pressão-velocidade. Para solucionar o sistema de equações gerado após a discretização foi utilizado o método *Gauss Seidel* com *multigrid* algébrico.

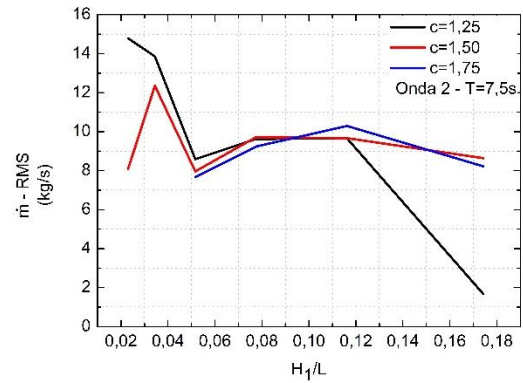
4. Resultados e discussões

No total foram analisadas 54 configurações geométricas diferentes obtidas através das Eqs. (3) e (9), sendo 6 variações de H_1/L para cada constante c , isso para cada uma das três ondas.

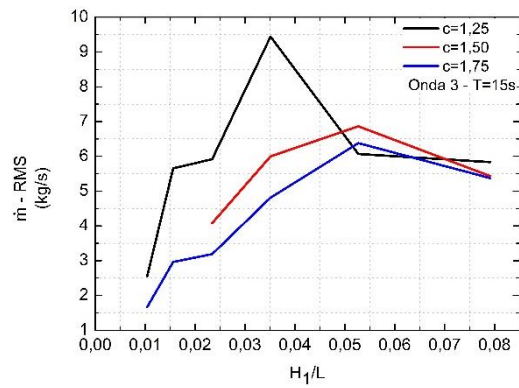
Para calcular os valores médios da vazão mássica, pressão, e potência hidropneumática foi considerada a média RMS (*Root Mean Square*). A Fig. 3 apresenta a vazão mássica RMS (\dot{m}) considerando a variação de H_1/L para as três ondas. Nota-se que a vazão mássica para a onda 2 foi mais elevada comparado as outras ondas, isso ocorreu para uma constante $c = 1,25$ (linha preta), quando a razão H_1/L foi igual a 0,0230.



(a)



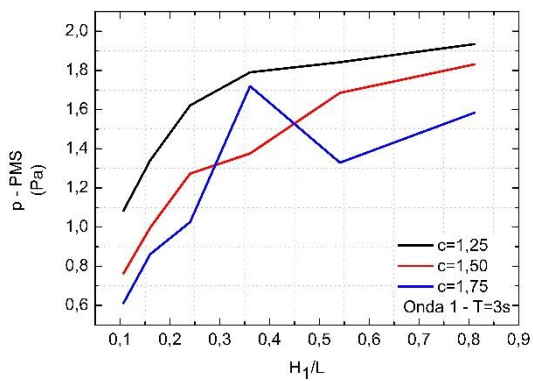
(b)



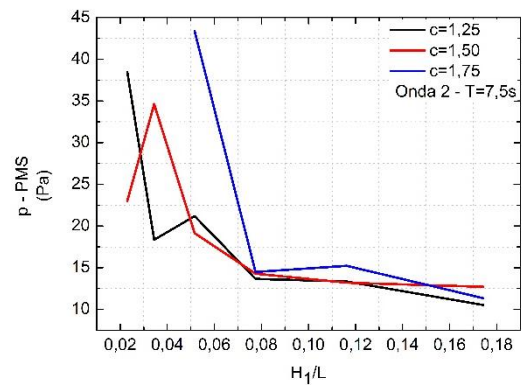
(c)

Figura 3. Vazão mássica – RMS por variação H_1/L para a (a) onda 1, (b) onda 2 e (c) onda 3.

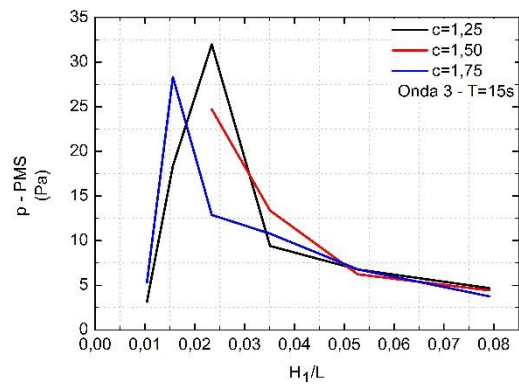
Na Fig. 4 é apresentada a pressão RMS pela variação de H_1/L para as três ondas. Percebe-se que para a onda 2 houve uma maior pressão na câmara CAO, quando a mesma incidiu sobre um dispositivo cuja a constante $c = 1,75$ (linha azul) e $H_1/L = 0,0516$.



(a)



(b)



(c)

Figura 4. Pressão – RMS por variação H_1/L para a (a) onda 1, (b) onda 2 e (c) onda 3.

Quanto a potência hidropneumática RMS gerada no dispositivo CAO, é apresentada na Fig. 5 e novamente o regime de onda 2 ganha destaque, quando o mesmo incide em um dispositivo no qual a constante $c = 1,25$, lembrando que c é uma constante de proporcionalidade entre L_1 (Largura da câmara CAO) e L (Largura de entrada da câmara CAO), o maior registro de potência ocorreu quando $H_1/L = 0,0230$.

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

$$P_{Hid} = \left(P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \left(\frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \right) \tag{16}$$

onde: P_{ar} é a pressão estática na chaminé do dispositivo CAO (Pa); ρ_{ar} é a massa específica do ar (kg/m^3); \dot{m} é a vazão mássica de ar na chaminé (kg/s) e v_{ar} é a velocidade do ar na chaminé (m/s), dada por:

$$v_{ar} = \frac{\dot{m}}{A \rho_{ar}} \tag{17}$$

Com base na Fig. 5 é possível notar o maior valor da constante c , resultou, em maioria, no menor valor de potência hidropneumática gerada no dispositivo CAO.

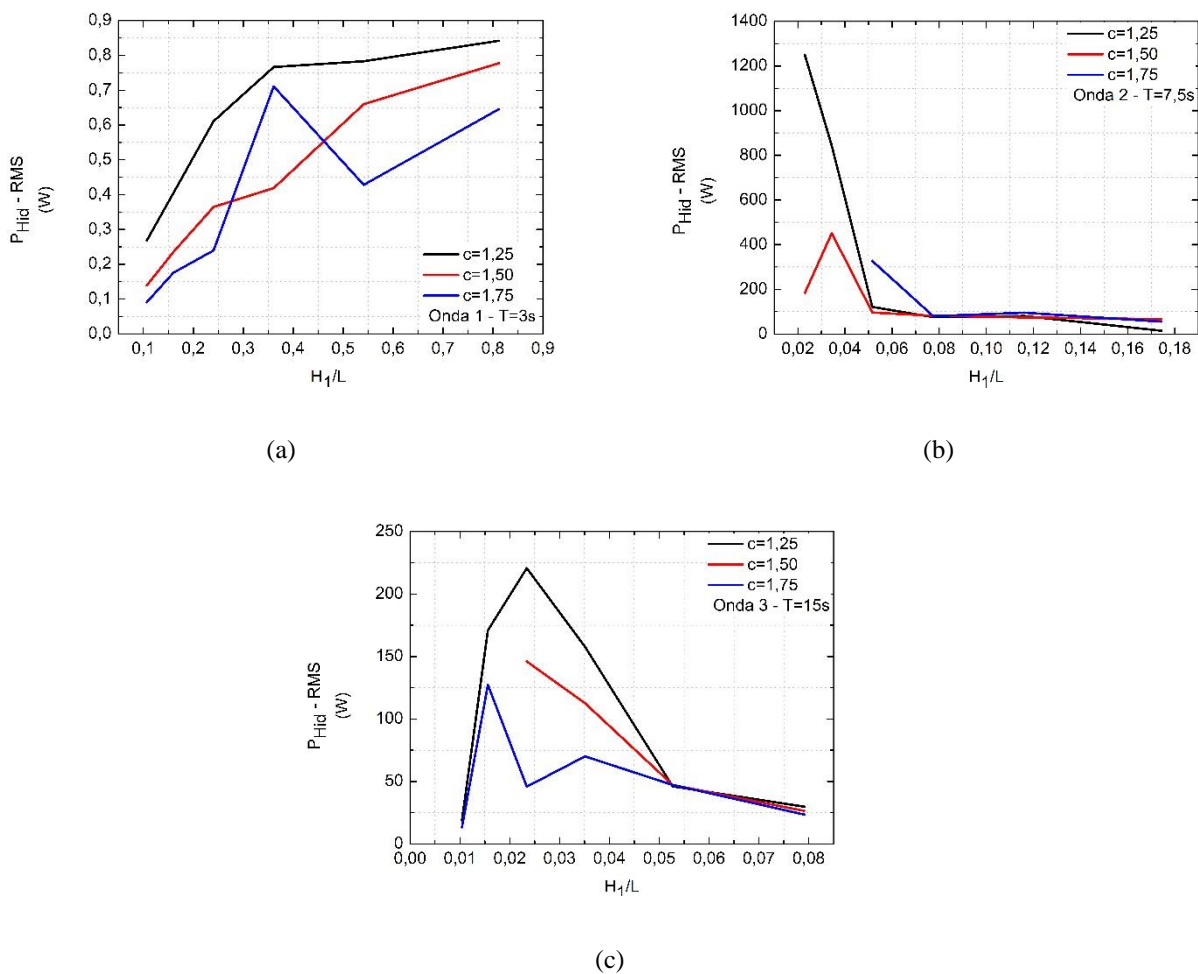


Figura 5. Potência hidropneumática – RMS por variação H_1/L para a (a) onda 1, (b) onda 2 e (c) onda 3.

Quanto maior o valor de c menor é o ângulo formado entre os dois trapézios na região central da câmara e isso impõe uma resistência maior ao escoamento. Pois quando L é próximo de L_1 , o escoamento é facilitado, reduzindo as resistências e assim conduzindo ao caso ótimo.

5. Conclusões

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico com o objetivo de analisar a influência das dimensões da câmara hidropneumática na forma de duplo trapézio, submetido a três diferentes regimes de ondas regulares, visando a maximização da potência hidropneumática. Para a análise geométrica foi empregado o *Design Constructal*. Para a análise computacional foi usado um código de dinâmica dos fluidos computacional baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é aplicado no tratamento da interação água-ar.

Para os regimes de ondas e parâmetros assumidos, os resultados indicam os dispositivos CAO sobre incidência da onda 2 teve um melhor desempenho no que diz respeito a maximização da potência hidropneumática. Em trabalhos futuros serão realizados novos estudos com novos regimes de ondas e parâmetros geométricos diferentes afim de encontrar formas e dimensões ideais para o dispositivo conversor de energia das ondas em energia elétrica tipo coluna d'água oscilante.

Referências

1. Ansys (2016), "Theory Guide FLUENT 2016".
2. Bejan, A., Lorente, S., 2008. Design with Constructal Theory. Wiley, Hoboken.
3. Carter, R. W., 2005. Wave Energy Converters and a Submerged Horizontal Plate. Master Thesis, Master of Science in Ocean and Resources Engineering, University of Hawaii, Manoa, Honolulu.
4. Bejan, A., 2000. Shape and Structure, from Engineering to Nature. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
5. Chakrabarti, S. K., 2005. Handbook of offshore engineering. vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 661 p.
6. Cruz, J. M. B. P., Sarmento, A. J. N. A., 2004. Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais. Ed. Instituto do Ambiente, Amadora, 61 p.
7. Dizadji N., Sajadian S. E., (2011), "Modeling and optimization of the chamber of OWC system", Energy, Vol. 36, pp. 2360 – 2366.
8. Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1991, Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. vol. 2, World Scientific.
9. Gomes, M. das N. ; Olinto, C. R. ; Rocha, L. A. O. ; Souza, J. A. e Isoldi, L. A., 2009. Computational modeling of a regular wave tank. Engenharia Térmica, v. 8, p. 44-50.
10. Gomes, M. das N., 2010. Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna d'Água Oscilante de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil.
11. 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 em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil.
12. Hirt, C.W. , Nichols, B.D., 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Journal of Computational Physics, vol. 39, n. 1, pp. 201-225.
13. Horko, M., 2007. CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy converter. Tese de Mestrado em Engenharia e Ciência, Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Western, Austrália, 145 p.
14. Liu, Z.; Hyun B.; Hong, K., 2008. Application of Numerical Wave Tank to OWC Air Chamber for Wave Energy Conversion. International Offshore and Polar Engineering Conference.
15. 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, 327, 81-90.
16. Mavriplis, D. J., 1997. Unstructured Grid Techniques. Annual Reviews Fluid Mechanics , Vol. 29, pp: 473-514.
17. McCormick, M. E., 1976. Ocean engineering wave mechanics. John Wiley & Sons, USA, New York.
18. 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., 2006, Ocean wind and wave energy utilization, ISSC, Southampton.
19. Torres, R. M., 2012. Energia solar Fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
20. Twidell, J., and Weir, T., 2006, Renewable Energy Resources, Taylor & Francis, London.
21. Srinivasan, V., Salazar, A. J., Saito, K., 2011. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. Applied Mathematical Modeling, vol. 35, n. 8, pp. 3710-3730.