

APLICAÇÃO DE DESIGN CONSTRUTAL PARA ANÁLISE GEOMÉTRICA DE UM DISPOSITIVO CAO COM FORMATO DE DUPLO TRAPÉZIO SUBMETIDO A UM ESPECTRO DE PIERSON-MOSKOWITZ

Matheus José de Deus¹; Leandro Coqueiro Souza²; Marlon de Oliveira Alves da Silva³; Cândida Helena Alves Pereira do Amaral⁴; Elizaldo Domingues dos Santos⁵; Liércio André Isoldi⁶; Luiz Alberto Oliveira Rocha⁷; Mateus das Neves Gomes⁸

Resumo

Este trabalho aborda um estudo sobre a análise da geometria de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica. O princípio de funcionamento considerado é o de Coluna de Água Oscilante (CAO) no formato de um duplo trapézio. O objetivo é maximizar a potência hidropneumática disponível no dispositivo CAO quando submetido a um espectro de ondas do tipo Pierson-Moskowitz. O espectro considerado neste estudo contém 15 componentes de onda com período de pico igual a $T_S = 7,5$ s e altura significativa igual a $H_S = 1,5$ m. Para a simulação numérica, é empregado o modelo *Volume of Fluid* (VOF), aplicado no tratamento da interação água-ar. O domínio computacional é representado por um tanque de ondas com o dispositivo CAO acoplado. Para a avaliação geométrica é empregado o Design Construtal. 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, área total do dispositivo CAO que são mantidas constantes. A razão L_1/L foi pré-determinada como uma constante c assumindo valores específicos: 1,25, 1,50 e 1,75. São considerados três cenários de avaliação: i) considerando a frequência mínima do espectro, ii) considerando a frequência de pico do espectro e iii) considerando a frequência máxima do espectro. Os resultados indicam que a análise de configuração geométrica de dispositivo CAO conduz ao máximo aproveitamento da potência hidropneumática disponível, levando a diferenças médias de cerca de 40 W.

Palavras-chave: Simulação Numérica; coluna de água oscilante; energia das ondas do mar. Pierson-Moskowitz; *Constructal Design*.

Abstract

This paper analyses a sea waves energy converter geometry. The working principle is the Oscillating Water Column (OWC) in a double trapeze shape. The goal is to maximize hydropneumatic power available in the OWC device when a Pierson-Moskowitz spectrum is employed. The considered spectrum has 15 wave components with a peak period $T_S = 7,5$ s and significant height $H_S = 1,5$ m. For the numerical simulations the *Volume of Fluid* (VOF) model is employed when the water-air interactions occur. The computational domain is represented

¹Graduando em Licenciatura em Física do Instituto Federal do Paraná – IFPR – Campus Paranaguá. E-mail: matheus.pgua@hotmail.com.

²Mestrando em Ciência, Tecnologia e Sociedade do IFPR – Campus Paranaguá. E-mail: leandrocoqueirosouza@gmail.com.

³Mestrando em CTS do IFPR – Campus Paranaguá. E-mail: marlon_941@live.com.

⁴Mestranda em CTS do IFPR – Campus Paranaguá. E-mail: lunahlan@gmail.com.

⁵Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande (FURG). E-mail: elizaldodossantos@furg.br.

⁶Doutor em Engenharia Mecânica, FURG. E-mail: liercioisoldi@furg.br.

⁷Doutor em Engenharia Mecânica, UNSINOS. E-mail: laorocha@gmail.com.

⁸Doutor em Engenharia Mecânica, Professor do Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Sociedade do IFPR – Campus Paranaguá. E-mail: mateus.gomes@ifpr.edu.br.

by a wave tanks with the OWC device. The Constructal Design is used for the geometric evaluation. The degree of freedom analyzed is H_1/L (height and length of the hydropneumatic chamber ratio). The problem restrictions are the surface entrance and total surface of the OWC device, which are constants. The L_1/L ratio was pre-determined as a constraint c with discrete values: 1,25, 1,50 e 1,75. Three scenarios are evaluated: i) minimum spectrum frequency, ii) peak spectrum frequency and iii) maximum spectrum frequency. The results show the OWC device that leads to the better performance, with differences around 40 W between best and worst power.

Keywords: Numerical simulation; oscillating water column; sea wave energy; Pierson-Moskowitz; *constructal Design*.

Introdução

A energia é um dos fatores fundamentais para satisfazer as necessidades do homem, sejam elas: aquecimento, iluminação, transporte, entre outras (SILVA, 2006). Diante desse contexto, observa-se o uso predominante das fontes de energia não renováveis, que podem ser classificadas em combustíveis fósseis e energia nuclear.

As fontes de energia de combustíveis fósseis, obtidas por meio de carvão petróleo e gás, são as mais utilizadas desde as máquinas a vapor, que têm como desvantagem a geração de gases poluentes. Segundo Kemerich et al. (2014), a utilização de combustíveis fósseis contribui para a poluição, lançando grande quantidade de fuligem contaminante no ar fazendo deles grandes responsáveis por geração de chuva ácida, mudanças climáticas, intensificação do efeito estufa e aumento de doenças respiratórias.

Já a energia nuclear utiliza o urânio como combustível e produz materiais radioativos que podem durar milhares de anos, causando grandes danos para a população e o meio ambiente (GOLDEMBERG e LUCON, 2007).

De acordo com Dantas (2015), em vista de suas vantagens, fontes de energia renováveis estão em crescente avanço, pois no atual cenário onde busca-se o desenvolvimento sustentável, tais fontes possuem a peculiaridade de ser menos agressivas à natureza, diminuindo assim os impactos ambientais.

Portanto, cada vez mais é necessário pesquisas a respeito de formas alternativas e renováveis de energia (GOZGOR *et al.*, 2018; KAYGUSUZ, 2007).

Neste cenário, uma possibilidade são os dispositivos que produzem energia elétrica a partir do movimento das ondas do mar. Uma das formas é através de um dispositivo cujo princípio de funcionamento é o de Coluna de Água Oscilante (CAO) (KAYGUSUZ, 2007).

Os dispositivos Coluna de Água Oscilante (CAO) são estruturas em que uma parte é submersa na água, aberta para o mar abaixo da superfície livre, enquanto a outra é aberta à atmosfera. A transformação de energia, segundo Cruz e Sarmiento (2004), acontece de duas

maneiras: quando uma onda incide na estrutura o ar que se encontrava dentro dela é forçado a passar por uma turbina devido ao aumento de pressão no interior da câmara; ou quando a onda regressa ao mar, completando a passagem pelo dispositivo, o ar passa novamente na turbina no sentido inverso devido à diminuição de pressão no interior da câmara. Por conta de serem movimentos opostos, é recomendado que a utilização de turbinas do tipo Wells, devido à sua propriedade de sempre manter o sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento. Quando a turbina é ligada num gerador, então ocorre a produção de energia elétrica (CRUZ e SARMENTO, 2004; NIELSEN *et al.*, 2006; TWIDELL e WEIR, 2006; GOMES, 2010).

Para estudos numéricos destes dispositivos tem sido empregado o método *Volume of Fluid* (VOF), proposto por Hirt e Nichols (1981). Esse método é recomendado para escoamentos multifásicos em que há dois ou mais fluidos com uma interface muito bem definida, que no presente estudo são o ar e a água. Versteeg e Malalasekera (2007) propõe a solução das equações deste modelo matemático através do Método dos Volumes Finitos (MVF).

Em problemas que envolvem análise geométrica uma estratégia que pode ser empregada é o Design Construtal que é baseado na Teoria Construtal desenvolvida por Adrian Bejan (BEJAN, 2000; BEJAN e LORENTE, 2008; BEJAN e ZANE, 2012; BEJAN e LORENTE, 2013).

Em Gomes *et al.* (2013) e Gomes (2014) o Design Construtal foi empregado para a análise geométrica de dispositivos do tipo CAO no formato retangular, considerando a incidência de ondas monocromáticas e regulares. Nos trabalhos de Gomes *et al.* (2016) e Gomes *et al.* (2018) o Design Construtal foi empregado na análise da configuração geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar do tipo Coluna de água Oscilante, no formato retangular, considerando a incidência de um espectro de ondas do tipo Pierson-Moskowitz.

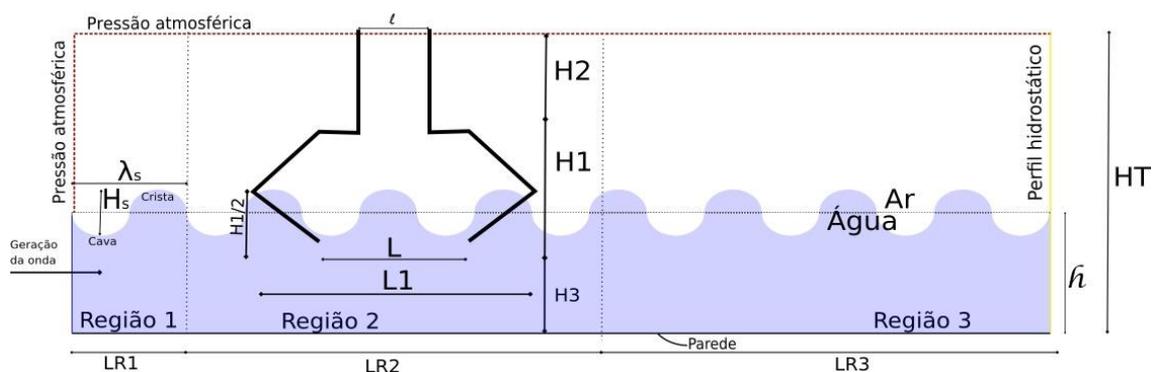
O objetivo deste trabalho é similar ao de Gomes *et al.* (2016), no entanto é considerando um dispositivo CAO no formato de um duplo trapézio. São analisadas numericamente diferentes configurações geométricas para então maximizar a potência hidropneumática disponível pelo dispositivo CAO quando submetido a um espectro de ondas do tipo Pierson-Moskowitz.

1 Descrição do Problema Computacional

O fenômeno físico da incidência de ondas em estruturas como os dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, pode ser representado computacionalmente através de um tanque de ondas, como indicado na Fig. 1.

Figura 1 - Representação esquemática do domínio computacional.

Domínio Computacional



Fonte: Os autores.

1.1 Espectro de Ondas de Pierson-Moskowitz

O espectro de ondas de Pierson-Moskowitz é representado por uma função de distribuição de energia que depende da altura significativa da onda (H_s) e da frequência angular de pico (ω_p) (Ansys, 2016). Para o espectro de Pierson-Moskowitz, assume-se que a onda está em equilíbrio com o vento, onde a densidade espectral é (CHAKRABARTI, 2005):

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{\omega^5} e^{-\left(\frac{5\omega_p^4}{4\omega^5}\right)} \quad (1)$$

onde $H_s = 1,5 \text{ m}$ é a altura significativa, ω é a frequência angular da onda, em rad/s e ω_p é a frequência angular de pico, em rad/s , que pode ser determinada por:

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} \quad (2)$$

onde T_p é o período significativo, em segundos, que nesse estudo foi adotado como $T_p = 7,5 \text{ s}$.

De acordo com Ansys (2016) é possível determinar o intervalo de frequências de modo que o mesmo compreenda a região de maior energia da onda, sendo o recomendável dado por:

$$\omega_{\min} = 0,5 \omega_p \quad (3)$$

$$\omega_{\max} = 2,5 \omega_p \quad (4)$$

Na tabela 1 é possível observar as características das ondas representativas do espectro de ondas considerado, Onda 1 – referente ao limite máximo das frequências consideradas e por consequência menor comprimento de onda, Onda 2 – referente à frequência de pico calculada através da Eq. 2 considerando o período de pico do espectro e Onda 3 - referente ao limite mínimo das frequências consideradas e por consequência maior comprimento de onda.

Tabela 1 - configuração do espectro

	$\omega(rad/s)$	$T(s)$	$\lambda(m)$
Onda 1 (mínimo)	2,0943	3,00	14,03
Onda 2 (pico)	0,8377	7,50	65,35
Onda 3 (máximo)	0,4188	15,00	144,04

Fonte: Elaborada pelos autores.

Analiticamente, a elevação da superfície livre é calculada por (ELANGO VAN, 2011):

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{n_0} \zeta_{a_n} \cos(k_n x - \omega_n t + \varepsilon_n) \quad (5)$$

onde (ζ) representa a amplitude da componente da onda, k_n é o número de onda da componente (rad/m), x é a posição espacial (m), ω_p é a frequência da onda, t é o tempo (s), ε_n é o ângulo de fase randômico (rad), n_0 é o número de componentes harmônicas da onda, neste estudo são consideradas 15 componentes de ondas no intervalo de frequências definido. Essa equação é idêntica à de uma onda regular, com exceção do ângulo de fase randômico, o que torna a onda irregular (ELANGO VAN, 2011).

O número de onda pode ser calculado através da relação de dispersão, dada por (DEAN e DALRYMPLE, 1991):

$$\omega^2 = g k_n \tanh(k_n h) \quad (6)$$

1.2 Condições de contorno e condição inicial

Como observa-se na Fig. 1, através de uma condição de velocidade prescrita, o gerador de ondas é posicionado do lado esquerdo do tanque. Numericamente, para a geração de ondas irregulares consideram-se as componentes de onda do espectro da Eq. (5) e as componentes verticais (w) e horizontais (u) do espectro de ondas que são dadas por (DEAN e DALRYMPLE, 1991; CHAKRABARTI, 2005):

$$u = \zeta_{a_n} g k_n \frac{\cosh(k_n z + k_n h)}{\omega_n \cosh(k_n h)} \cos(k_n x - \omega t) \quad (7)$$

$$w = \zeta_{a_n} g k_n \frac{\sinh(k_n z + k_n h)}{\omega_n \sinh(k_n h)} \sin(k_n x - \omega t) \quad (8)$$

Na linha da direita (linha amarela 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 afundamento nas equações de momento em uma dada região do tanque. Esses termos são dados por (LISBOA *et al*, 2016; DIZADJI e SAJADIAN, 2011):

$$S = - \left[C_1 \rho \mathbf{V} + \frac{1}{2} C_2 \rho |\mathbf{V}| \mathbf{V} \right] \left(1 - \frac{z - z_{fs}}{z_b - z_{fs}} \right) \quad (9)$$

onde C_1 e C_2 são os coeficientes de amortecimento linear e quadrático, respectivamente; ρ é a massa específica do fluido; \mathbf{V} é a velocidade; z é a posição coordenada vertical; z_{fs} é a coordenada vertical da superfície livre e z_b a coordenada 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 momento de afundamento. Seguindo as recomendações de Lisboa *et al* (2016), $C_1 = 20$ e $C_2 = 0$.

Na superfície lateral esquerda superior, assim como na parte superior do tanque e na saída da chaminé do dispositivo CAO é aplicada uma condição de contorno de pressão atmosférica. Já nas paredes do dispositivo CAO e na parede inferior do tanque de ondas, é imposta a condição de não deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula.

Inicialmente, no instante $t = 0$ s, o tanque de ondas está ajustado com profundidade de 10 metros em todo o seu domínio.

1.3 Dimensionamento do domínio computacional

O tanque numérico de ondas considerado neste trabalho é dividido em três regiões, vide Fig. 1: Região 1 – onde ocorre a propagação do espectro de ondas, Região 2 – onde está localizado o dispositivo CAO e a Região 3 – onde acontece o amortecimento da onda através de uma praia numérica.

O comprimento da Região 1 é dado por $LR_1 = 1,5 \lambda_S$, onde λ_S é calculado a partir do período de pico do espectro de ondas e apresentado na Tab. 1. O comprimento da Região 2 é calculado por $LR_2 = 2,2 + L$, onde L é o comprimento da câmara CAO, vide Fig. 1. E o comprimento da Região 3 é dado por $LR_3 = 2 \lambda_S$. A altura do tanque de ondas é H_T é igual a 14,0 m. O dimensionamento da câmara CAO será apresentado na sequência.

2 Modelo Matemático e Numérico

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 ($\alpha_{\text{água}} = 1$).

No modelo *VOF*, as equações de conservação da massa, momento e transporte de fração volumétrica são empregadas quando há dois fluidos imiscíveis, ar e água neste caso. Para resolvê-las, utiliza-se o Método dos Volumes Finitos (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007). A equação da conservação da massa é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (10)$$

onde ρ é a densidade da mistura (kg/m^3) e \vec{v} é o vetor velocidade do fluxo (m/s). A equação da conservação do momento é:

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\tau) + \rho g \quad (11)$$

onde p é a pressão (Pa) e τ é o tensor de deformação (N/m^2).

Neste estudo, as frações de volume α representam as fases dentro do problema. Assim, a equação para as frações de volumes é

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

As densidades e viscosidade da mistura são dadas por:

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (13)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (14)$$

Para a solução numérica dessas equações utilizou-se o método PRESTO para discretizar o momento e a pressão. Para o acoplamento pressão-velocidade, foi empregado o método PISO, enquanto que o GEO-RECONSTRUCTION foi utilizado na fração volumétrica.

3 Estudo de Caso

3.1 Design Construtal aplicado a dispositivos CAO no formato de duplo trapézio

O Design Construtal é um método usado para analisar formas geométricas submetidas a algum tipo de fluxo. Segundo tal teoria, o fluxo é adaptável e a geometria ótima é prevista a partir de um princípio de maximização global. Outro aspecto dessa teoria, é que 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 nesse trabalho é, através do Design Construtal, analisar diferentes configurações geométricas de dispositivos CAO no formato de duplo trapézio de modo a maximizar a potência hidropneumática disponível no espectro de ondas considerado.

O grau de liberdade analisado foi H_1/L (razão entre a altura e comprimento de entrada da câmara CAO), enquanto H_3 (profundidade de submersão da câmara CAO) foi mantido constante, com valor de $9,75m$ em todos os casos. H_2/l , que é a razão entre altura e comprimento da chaminé, também foi mantidos fixos com valor igual a 3.

A área de entrada (A_E) do dispositivo CAO, uma das restrições do problema (área dos trapézios), corresponde a 70% da área total conforme indicado em Gomes (2014) e é dada por:

$$A_E = \frac{(L+L_1)}{2} H_1 \quad (15)$$

A área total (A_T) do dispositivo CAO, outra restrição geométrica do problema, é dada por:

$$A_T = A_E + H_2 l \quad (16)$$

A partir da Eq. (15) é possível obter uma equação que determina a dimensão para o comprimento (L) da câmara CAO:

$$L = \left[\frac{2A_E}{(1+c)\left(\frac{H_1}{L}\right)} \right]^{1/2} \quad (17)$$

onde c é uma constante de proporcionalidade entre L_1 e L , de forma que:

$$L_1 = c L \quad (18)$$

Neste trabalho foram considerados os seguintes valores para a constante c : $c = 1,25$, $c = 1,50$ e $c = 1,75$. A altura da câmara hidropneumática H_1 pode ser obtida através da Eq. 17:

$$H_1 = L \left(\frac{H_1}{L} \right) \quad (19)$$

E a partir da Eq. (16) é possível obter as equações que determinam as dimensões para o diâmetro (l) e altura (H_2) da chaminé, respectivamente:

$$l = \left[\frac{A_T - A_E}{\left(\frac{H_2}{l}\right)} \right]^{1/2} \quad (20)$$

$$H_2 = l \left(\frac{H_2}{l} \right) \quad (21)$$

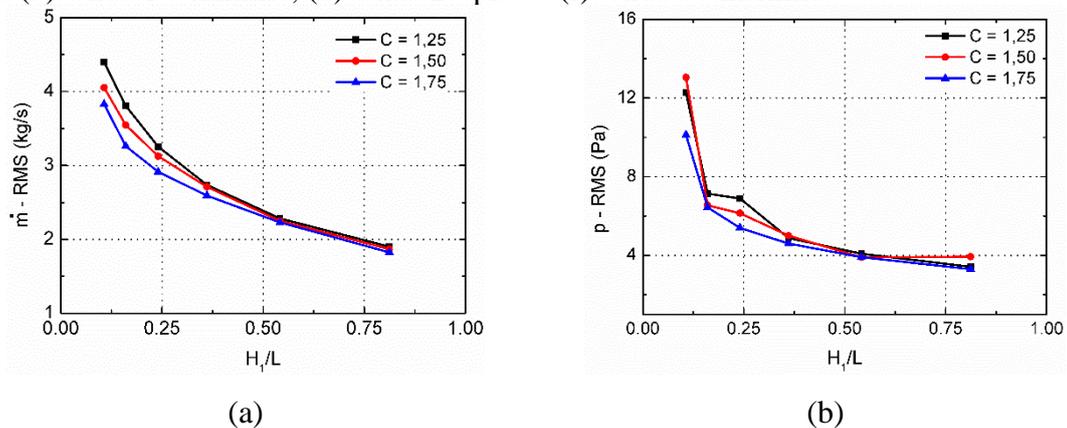
O objetivo é levar em consideração as características do espectro para assim encontrar o arranjo geométrico que conduza à máxima potência hidropneumática disponível. Portanto como critério para a definição da restrição da área de entrada da câmara hidropneumática (A_E) consideram-se três cenários iniciais baseados nas características apresentadas na Tab. 1, em que o comprimento do dispositivo CAO (L) é igual ao comprimento da onda incidente (λ), que de acordo com apresentado na tab. 1 pode assumir três diferentes valores neste estudo, e que a altura do dispositivo CAO (H_I) é igual à altura significativa do espectro de ondas ($H_s = 1,5 m$).

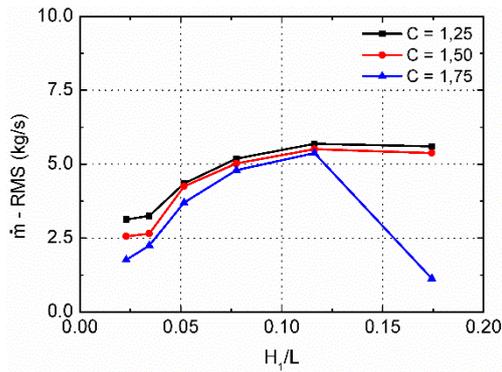
As grandezas a serem analisadas ao longo deste trabalho são a média RMS da vazão mássica, da pressão e da potência hidropneumática.

4.2 Análise dos resultados

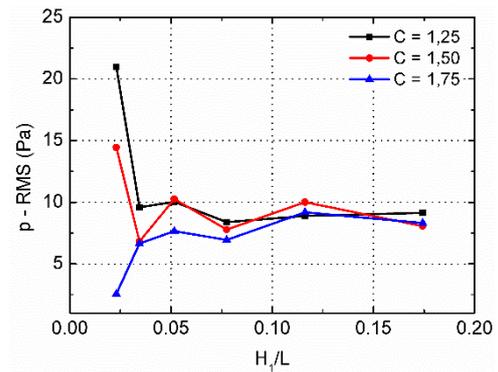
Considerando os três diferentes cenários indicados na Tab. 1 foram analisadas 54 configurações geométricas diferentes obtidas através das Eqs. (15-21), sendo 6 variações de H_I/l para cada constante c . Na Fig. 2 são apresentados os comportamentos médios para vazão mássica e pressão para estes 54 casos indicados.

Figura 2 - : Média RMS da Vazão mássica em relação a H_I/L considerando três diferentes valores da constante C para (a) Onda 1 – mínimo , (c) Onda 2 - pico (e) Onda 3 – máximo, e, Média RMS da pressão em relação a H_I/L considerando três diferentes valores da constante C para (b) Onda 1 – mínimo, (d) Onda 2 - pico e (f) Onda 3 - máximo.

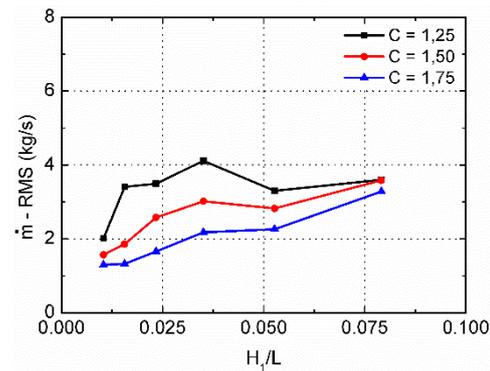




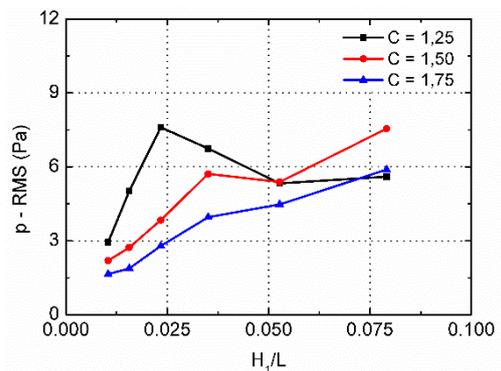
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Os autores.

A vazão mássica, a pressão, e a potência hidropneumática foram analisados através da média RMS (*Root Mean Square*), dada pela seguinte equação, usada em Gomes (2014):

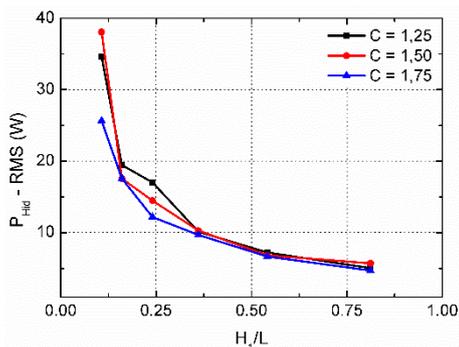
$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (22)$$

Nas Figs. 2a, 2c e 2e é possível observar o comportamento médio RMS da vazão mássica (\dot{m}) considerando a variação de H_1/L para as três ondas da Tab. 1. Nota-se que os valores médios da vazão mássica para a onda 1 tendem a decrescer, vide Fig. 2a, enquanto que para os demais casos tende a crescer, vide Fig. 2c, 2e. Além disso, observa-se que a variação da constante c muito pouco altera o comportamento e a média da vazão mássica.

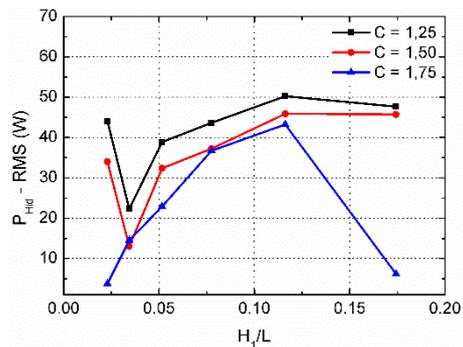
Nas Figs. 2b, 2d e 2f tem-se o comportamento médio RMS da pressão em relação a H_1/L para as três ondas da Tab. 1. Para todos os casos observa-se um comportamento qualitativo da pressão semelhante à vazão mássica.

A potência hidropneumática, conforme indicado em Gomes (2014), é uma composição da vazão mássica e da pressão, e os resultados apresentados na Fig. 3 indicam que de fato, qualitativamente, o comportamento mantém-se similar aos apresentados na Fig. 2.

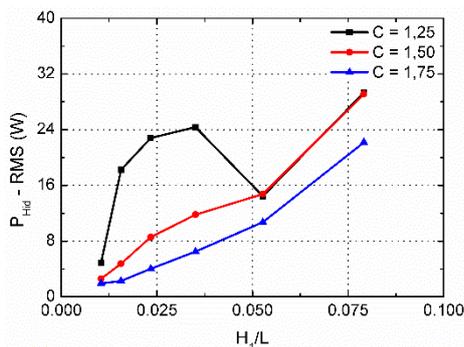
Figura 3 - Média RMS da potência hidropneumática em relação a H_1/L considerando três diferentes valores da constante C para (a) Onda 1 – mínimo, (b) Onda 2 - pico e (c) Onda 3 - máximo.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Os autores.

4 Conclusão

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 um espectro de ondas. Para a análise geométrica foi empregado o *Design Constructal*.

Para as características do espectro de ondas empregado os resultados indicam que quando considera-se a Onda 2 como base para as configurações geométricas e quando adota-se a constante de proporcionalidade c igual a 1,25 a potência hidropneumática é maximizada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Araucária, à CAPES e ao CNPQ pelo suporte financeiro.

Referências

ANSYS. *Theory Guide FLUENT*. 2016. Disponível em: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm> . Acesso em: 1 abr 2018.

BEJAN, A. *Shape and Structure, from Engineering to Nature*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.

BEJAN, A.; LORENTE, S. *Design with Constructal Theory*. Wiley, Hoboken, USA, 2008.

BEJAN, A.; ZANE J. *Design in nature*. Doubleday, USA, 2012.

BEJAN, A.; LORENTE, S. *Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society*. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 113, p. 151301-1 – 151301-20.

CHAKRABARTI, S. K. *Handbook of Off Shore Engineering*. Elsevier, Amsterdam, Holanda, 2005.

CRUZ, J. M.; SARMENTO, A. J. **Energia das ondas: Introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais**. Portugal: Instituto do Ambiente Alfragide, 2004.

DANTAS, C. E. B. **Estudo dos conversores de energia ondomotriz em energia elétrica**. Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Mecânica, 2015. Disponível em: <http://bdm.unb.br/bitstream/10483/11577/1/2015_CarlosEduardoBarrettoDantas.pdf>. Acesso em: 10 mai 2018.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. *Water wave mechanics for engineering and scientists*. *World Scientific*, Singapore, 1991.

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

ELANGO VAN, M. *Simulation of irregular waves by CFD*. *World Academy of Science. Engineering and Technology*. V. 5, p. 427-431, 2011.

GOMES, M. N. **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, 2010.

GOMES, M. N.; SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O. *Two-dimensional geometric optimization of an oscillating water column converter of real scale*. **In: Proceedings 22nd International congress of Mechanical Engineering (COBEM)**, Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, 2013.

GOMES, M. N. **Constructal Design de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/109161>>. Acesso em: 15 abr 2018.

GOMES, M. N.; COSTA, C. A. O.; DEUS, M. J.; RICARDO, R. L. P.; ISOLDI, L. A.; SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O. Análise computacional e geométrica com design construtal de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante submetido a um espectro de ondas. **In: Proceedings XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**. Brasília, Brazil, 2016.

- GOMES, M. N.; DEUS, M. J.; SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O. *Analysis of the geometric constraints employed in Constructal Design for Oscillating Water Column devices submitted to the wave spectrum through a numerical approach. 14Th International Conference of Difusion in Solids and Liquids*, Amsterdam, Holanda, 2018.
- GOZGOR, G.; LAU, C. K. M; LU, Z. *Energy consumption and economic growth: New evidence from the OECD countries*. Elsevier, vol. 153,p. 27-34, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.158>>. Acesso em 29 set 2018.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias Renováveis: Um futuro Sustentável. **Revista USP**. São Paulo, vol. 72, p. 6-15, 2007. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/revusp/article/download/13564/15382>>. Acesso em 17 ago 2018.
- HIRT, C.W.; NICHOLS, B.D. *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Journal of Computational Physics*. Vol. 39, n. 1, p. 201-225, 1981.
- KAYGUSUZ, K. *Energy for suitable development: key issues and challenges. Energy Sources B: Energy Economics and Planning*. Vol. 2, p. 73-83, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15567240500402560>>. Acesso em: 15 ago 2018.
- KEMERICH, P. D. C; DRUMM, F. C; GERHARDT, A. E.; FERNANDES, G. D. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - REGET**. Universidade Federal de Santa Maria, RS, vol. 18, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/reget/article/download/10537/pdf>>. Acesso em: 7 out 2018.
- LISBOA, R. C.; TEIXEIRA, P. R. F.; DIDIER, E. Simulação de propagação de ondas regulares e irregulares em um canal bidimensional com praia numérica. **VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**. Rio Grande, 2016.
- NIELSEN, F. G.; ANDERSEN, M.; ARGYRIADIS, K.; BUTTERFIELD, S.; FONSECA, N.; KUROIWA, T.; BOULLUEC, M. L. E.; LIAO, S. J.; TURNOCK, S. R; WAEGTER, J. *Ocean wind and wave energy utilization. International Social Science Council*. Southampton, UK, 2006.
- SILVA, N. F. **Fontes de energia renováveis complementares na expansão do setor elétrico brasileiro: o caso da energia eólica**. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético), Programa de Pós-Graduação de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/nfsilva.pdf>>. Acesso em: 19 set 2018.
- TWIDELL, J.; WEIR, T. *Renewable Energy Resources*. Londres: Editora Taylor & Francis, 2006.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Malaysia: Pearson, 2007.