



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

Mateus das Neves Gomes^{1,2}

Carlos Augusto de Oliveira Costa¹

Matheus José de Deus¹

Ruan Lukas Pinheiro Ricardo¹

mateus.gomes@ifpr.edu.br

carlosoacosta1994@gmail.com

matheus.pgua@hotmail.com

ruannito97@gmail.com

¹Instituto Federal do Paraná, Campus Paranaguá.

Rua Antônio Carlos Rodrigues, 453, Bairro Porto Seguro, Paranaguá, PR, Brasil.

²Universidade Federal do Rio Grande, Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional - PPGMC.

Av. Itália, Km 8, Bairro Carreiros, CEP 96.201-900, Rio Grande, Brasil.

Liércio André Isoldi

Elizaldo Domingues dos Santos

liercioisoldi@furg.br

elizaldosantos@furg.br

Universidade Federal do Rio Grande, Escola de Engenharia.

Av. Itália, Km 8, Bairro Carreiros, CEP 96.201-900, Rio Grande, Brasil.

Luiz Alberto Oliveira Rocha

luizrocha@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica - PROMEC.

Rua Sarmiento Leite, 425, CEP 90.050-170, Porto Alegre, RS, Brasil.

Abstract. Este trabalho apresenta um estudo computacional e geométrico sobre um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO). O objetivo é maximizar a potência hidropneumática absorvida pelo dispositivo quando submetido a um espectro de onda com: período significativo da onda (T_S) de 7,5 s e altura significativa da onda (H_S) de 1,5 m. É empregado o Design Construtal para a análise geométrica. O grau de liberdade analisado foi H_1/L (razão entre a altura e o comprimento de entrada da câmara hidropneumática). Enquanto os outros graus de liberdade, H_2/l , (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO) e H_3 (profundidade de submersão da câmara CAO) são mantidos fixos. As restrições do problema são a área de entrada e a área total da câmara CAO que são mantidas constantes. Para a solução numérica é empregado um código de dinâmica dos fluidos computacional, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). O modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) é aplicado no tratamento da interação água-ar. O melhor desempenho foi obtido quando $(H_1/L)_o = 0,0516$, $H_2/l = 3,0$ e $H_3 = 9,25$ m, sendo cerca de dezessete vezes melhor que o pior caso.

Keywords: Espectro de onda, Constructal Design, Energia das Ondas, Coluna de água Oscilante (CAO), Simulação numérica.

1 INTRODUÇÃO

Os países, ultimamente, têm investido na exploração de novas fontes de energia e, em especial, nas chamadas fontes renováveis. E uma dessas que tem merecido destaque é a conversão da energia contida nos oceanos em energia elétrica. No trabalho de Falcão (2010) é possível verificar um histórico do desenvolvimento da utilização da energia das ondas desde a década de 70. Segundo Cruz e Sarmiento (2004), a energia contida nos oceanos pode ter origens diferentes, o que gera diferentes classificações. Uma possibilidade é o aproveitamento da energia cinética das ondas oceânicas através de dispositivos cujo princípio de funcionamento é o de Coluna de Água Oscilante (CAO).

Em engenharia existem, fundamentalmente, três ferramentas para desenvolvimento de projetos e análises de problemas: métodos analíticos; métodos numéricos (experimentação numérica); e experimentação em laboratório (Maliska, 2004).

Diversos estudos empregando métodos numéricos têm abordado o princípio de funcionamento de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica. Uma possibilidade de modelagem computacional destes dispositivos é através do método Volume of Fluid (VOF), proposto por Hirt e Nichols (1981). Este modelo é indicado para escoamentos multifásicos, ou seja, escoamentos nos quais existe uma interface bem definida entre dois ou mais fluidos imiscíveis, que neste caso são a água e o ar. As equações do modelo matemático são resolvidas através do Método dos Volumes Finitos (MVF), Versteeg e Malalasekera (1999), utilizando o código comercial FLUENT

A tendência é que cada vez mais as pesquisas utilizem a modelagem computacional para analisar os dispositivos conversores de energia das ondas do mar, uma vez que, atualmente, a

simulação numérica é uma ferramenta fundamental na execução de um projeto de engenharia com estas características. Neste contexto, é possível verificar que os pesquisadores têm buscado empregar o modelo VOF nas simulações numéricas de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, assim como nos trabalhos de: Horko (2007), Conde e Gato (2008), Marjani et al. (2006), Liu et al. (2008a), Liu et al. (2008b), Gomes et al. (2009), Gomes (2010), Iahnke (2010), Conde et al. (2010), Conde et al. (2011), Liu et al. (2011), Ramalhais (2011) e Teixeira (2013). É importante ressaltar que nestes trabalhos o modelo computacional adota ondas com período e altura bem definidos e regulares.

Também é possível encontrar na literatura trabalhos que tem como objetivo otimizar a geometria de dispositivos do tipo CAO, como por exemplo: Tseng e Huang (2000), Dizadji e Sajadian (2011), Zhang et al. (2012), Senturk e Ozdamar (2012) e Bouali e Larbi (2013). Nenhum destes trabalhos citados considera simultaneamente o modelo VOF, considerado mais realista, e o clima de ondas predominante para o desenvolvimento do projeto de um dispositivo CAO. Este tipo de abordagem é encontrado em Gomes (2014), onde, considerando uma característica de onda regular um dispositivo do tipo CAO é dimensionado de modo a obter o máximo desempenho. A análise geométrica do dispositivo é realizada empregado o Design Construtal baseado na Teoria Construtal de Adrian Bejan (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012; Bejan e Lorente, 2013).

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é maximizar a potência hidropneumática absorvida pelo dispositivo CAO, semelhante ao realizado em Gomes (2014), entretanto, quando submetido a um espectro de onda com: período significativa da onda (T_S) de 7,5 s e altura significativa da onda (H_S) de 1,5 m. É empregado o Design Construtal para a análise geométrica. O grau de liberdade analisado é H_1/L (razão entre a altura e o comprimento de entrada da câmara hidropneumática). Enquanto os outros graus de liberdade, H_2/l , (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO) e H_3 (profundidade de submersão da câmara CAO) são mantidos fixos. As restrições do problema são a área de entrada e a área total da câmara CAO que são mantidas constantes. Para a solução numérica é empregado um código de dinâmica dos fluidos computacional, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). O modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) é aplicado no tratamento da interação água-ar. Além disso, neste trabalho é utilizada a geração de espectros de ondas, assim como em Elangovan (2011), tornando o modelo computacional mais realista.

2 DISPOSITIVO CAO

Os dispositivos de Coluna de Água Oscilante (CAO) são estruturas de concreto ocas parcialmente submersas, abertas para o mar abaixo da superfície livre da água como mostra a Fig. 1. De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), o processo de transformação da energia das ondas do mar em energia elétrica segue duas fases: quando uma onda entra na estrutura o ar que se encontrava dentro dela é forçado a passar por uma turbina, como consequência direta do aumento de pressão na "câmara de ar". Quando a onda regressa ao mar o ar passa novamente na turbina, desta vez no sentido inverso, dada a pressão inferior no interior da "câmara de ar". Para aproveitar estes movimentos opostos, normalmente, utiliza-se a turbina do tipo *Wells*, que possui a propriedade de manter o sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento. O grupo turbina/gerador é o responsável pela produção de energia elétrica (Cruz e Sarmiento, 2004; Nielsen et al., 2006; Twidell e Weir, 2006; Gomes, 2010).

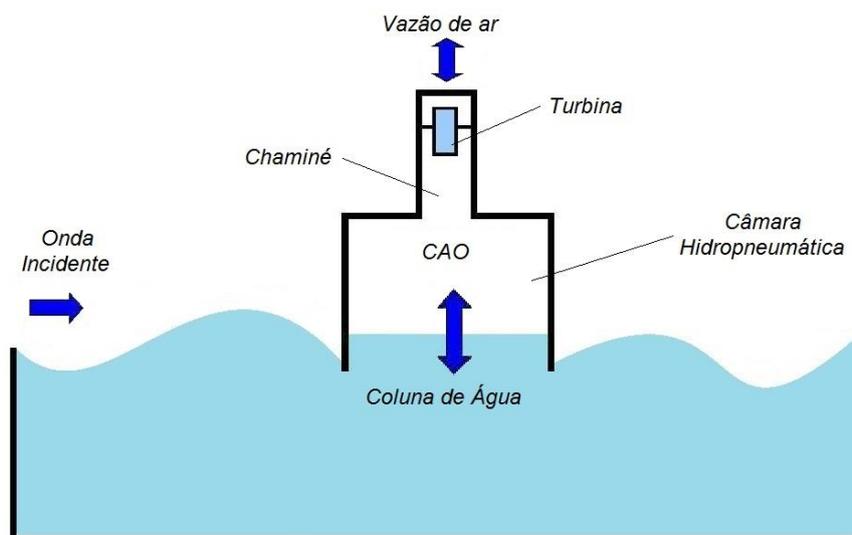


Figura 1. Esquema de funcionamento de um dispositivo CAO.

Uma desvantagem do dispositivo CAO são as grandes dimensões de concreto da estrutura, o que torna o custo da estrutura mais elevado (Khaligh e Onar, 2010). Uma vantagem de utilizar um dispositivo CAO para transformação da energia das ondas do mar em energia elétrica é a velocidade do ar aumentada pela redução da área na seção transversal próximo a turbina. Considerando isso e o movimento lento das ondas para uma rotação rápida sem engrenagem mecânica (Twidell e Weir, 2006). Outra importante vantagem é o movimento das partes mecânicas, isto é, a turbina e o gerador não ficam em contato direto com a água (Khaligh e Onar, 2010).

3 REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL

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

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

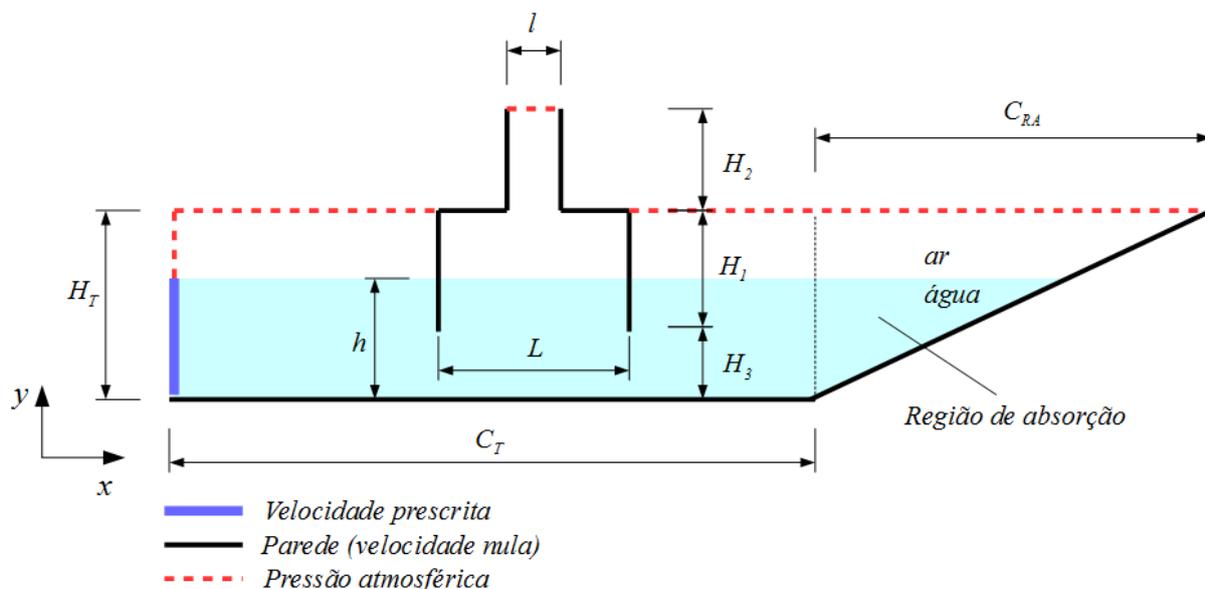


Figura 2. Representação esquemática do domínio computacional.

Com relação à altura do tanque é preciso considerar a profundidade mais a altura da onda. Assim é possível definir que a altura do tanque seja dada pela profundidade mais pelo menos duas vezes a altura da onda. É importante destacar que a medida H_3 esta relacionada ao quanto o dispositivo CAO está submerso em relação à superfície livre. Como neste trabalho é considerada a geração de ondas irregulares para o dimensionamento do domínio computacional são levados em conta o período significativo (T_S) e a altura significativa (H_S) do espectro de ondas. Deste modo é possível determinar, para o presente estudo, as seguintes dimensões: $T_S = 7,5$ s; $H_S = 1,5$ m; $h = 40,0$ m; $C_T = 327,0$ m; $H_T = 45,0$ m; $H_3 = 39,25$ m.

Ainda é possível verificar na Fig. 2 uma zona chamada de região de absorção, que possui o formato de uma rampa e tem a finalidade de reproduzir o efeito de uma praia, e assim diminuir o efeito de reflexão da onda. O comprimento da região de absorção (C_{RA}) tem 100,0 m.

3.1 Geração da onda – espectro de ondas

O aspecto inédito deste trabalho é o fato de considerar a geração de ondas irregulares, assim como em Elangovan (2011). Cabe destacar que até então os trabalhos sobre simulação numérica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica disponíveis na literatura levavam em conta a geração e ondas regulares com período, comprimento e altura bem definidos.

Um fluxograma do processo de geração e análise de ondas irregulares é apresentado na Fig. 3. No presente estudo foi adotado o espectro de *Pierson-Moskowitz* (PM).

O espectro de *Pierson-Moskowitz* é válido para um mar totalmente desenvolvido e assume que as ondas estão em equilíbrio com o vento (Chakrabarti, 2005). A densidade espectral ($S(\omega)$) é dada por:

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

onde: H_S é a altura significativa (m), neste trabalho $H_S = 1,5$ m, ω é a frequência da onda (rad/s), e ω_P é a frequência de pico da onda (rad/s) e pode ser determinada por:

$$\omega_P = \frac{2\pi}{T_S} \quad (2)$$

onde: T_S é o período significativo do espectro (s), neste trabalho $T_S = 7,5$ s.

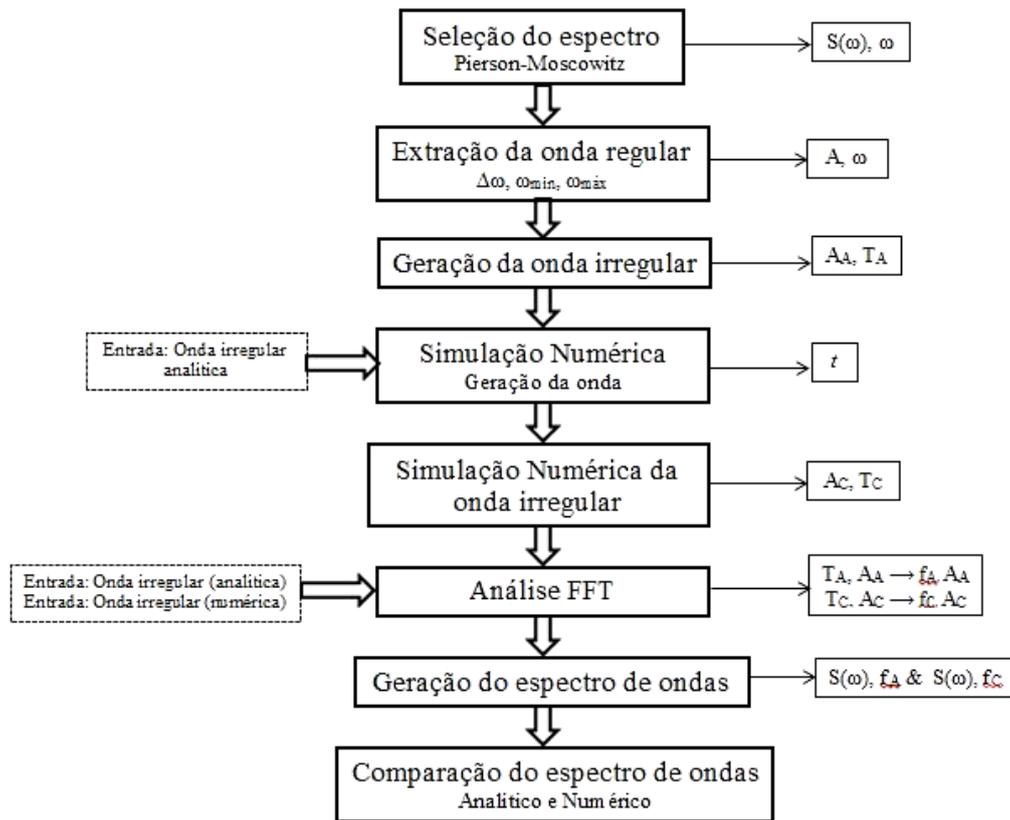


Figura 3. Metodologia de análise da geração de ondas irregulares, adaptado de Elangovan (2011).

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:

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

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

No presente estudo o espectro é formado por 15 ondas com frequências dentro do intervalo determinado pelas Eqs. (3) e (4). É possível distribuir de forma igual às frequências a serem consideradas através da seguinte relação:

$$d\omega = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{n_o} \quad (5)$$

onde: n_o é o número de ondas consideradas no espectro.

É possível extrair cada uma das 15 ondas regulares que compõem o espectro de ondas considerado. Para tanto deve ser considerada a seguinte relação entre densidade espectral e amplitude (Journee, 2001; Elangovan, 2011):

$$S(\omega_n)d\omega = \frac{1}{2} \zeta_{a_n}^2 \quad (6)$$

onde: ζ_{a_n} é a amplitude da componente do espectro (m), ou seja, a amplitude de uma das 15 ondas que formam o espectro deste estudo.

Mantendo o ângulo de fase diferente para cada onda regular, a onda irregular pode ser gerada analiticamente pela adição de toda a onda regular. Conforme apresentado a seguir (Elangovan, 2011):

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{n_o} \zeta_{a_n} \cos(k_n x - \omega_n t + \varepsilon_n) \quad (7)$$

onde: k_n é o número de onda da componente (rad/m), x a posição espacial (m), ω_n a frequência da componente (rad/s), t o tempo (s) e ε_n o ângulo de fase randômico da componente (rad). O número de onda (k_n) pode ser determinado pela relação de dispersão, dada por (Dean e Dalrymple, 1991):

$$\omega^2 = g k \tanh(k h) \quad (8)$$

A geração numérica da onda irregular levará em conta as componentes do espectro extraídas a partir da Eq. (7). Posteriormente, a onda irregular gerada numericamente pode ser comparada com a onda analítica. Além da comparação da onda irregular, a análise através da Transformada Rápida de Fourier (FFT) será empregada para a comparação da densidade espectral analítica e numérica.

3.2 Condições de contorno

Como é possível observar na Fig. 2, o gerador de ondas numérico é posicionado no lado esquerdo do tanque de ondas, com a condição de contorno de velocidade prescrita. Para a geração de ondas irregulares é considerada a Eq. (7) e suas respectivas componentes, horizontal (u) e vertical (w), da velocidade da onda como condição de contorno (velocidade de entrada prescrita). Essas componentes da velocidade variam em função do espaço e do tempo e são impostas na superfície de entrada e dadas por (McCormick, 1976; Dean e Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005):

$$u = \zeta_{a_n} g k_n \frac{\cosh(k_n z + k_n h)}{\omega_n \cosh(k_n h)} \cos(k_n x - \omega t) \quad (9)$$

$$w = \zeta_{a_n} g k_n \frac{\sinh(k_n z + k_n h)}{\omega_n \sinh(k_n h)} \sin(k_n x - \omega t) \quad (10)$$

onde: g a aceleração da gravidade (m/s^2); ω_n é a frequência da componente, e z é a variação da posição entre a superfície livre da água e o fundo do mar (m).

Com relação às demais 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 em vermelho na Fig. 2). Nas demais superfícies do tanque de ondas: superfície inferior e superfície lateral direita é imposta uma condição de não-deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula. Com relação às condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso, com profundidade $h = 40,0$ m.

3.3 Geração da malha

Para a geração da malha, conforme é possível observar na Fig. 4, foi adotada uma estratégia que tem como objetivo gerar uma malha mais refinada em determinadas regiões de interesse no domínio computacional, como a superfície livre por exemplo. Essa metodologia é baseada na técnica de malhas *stretched* (Mavripilis, 1997).

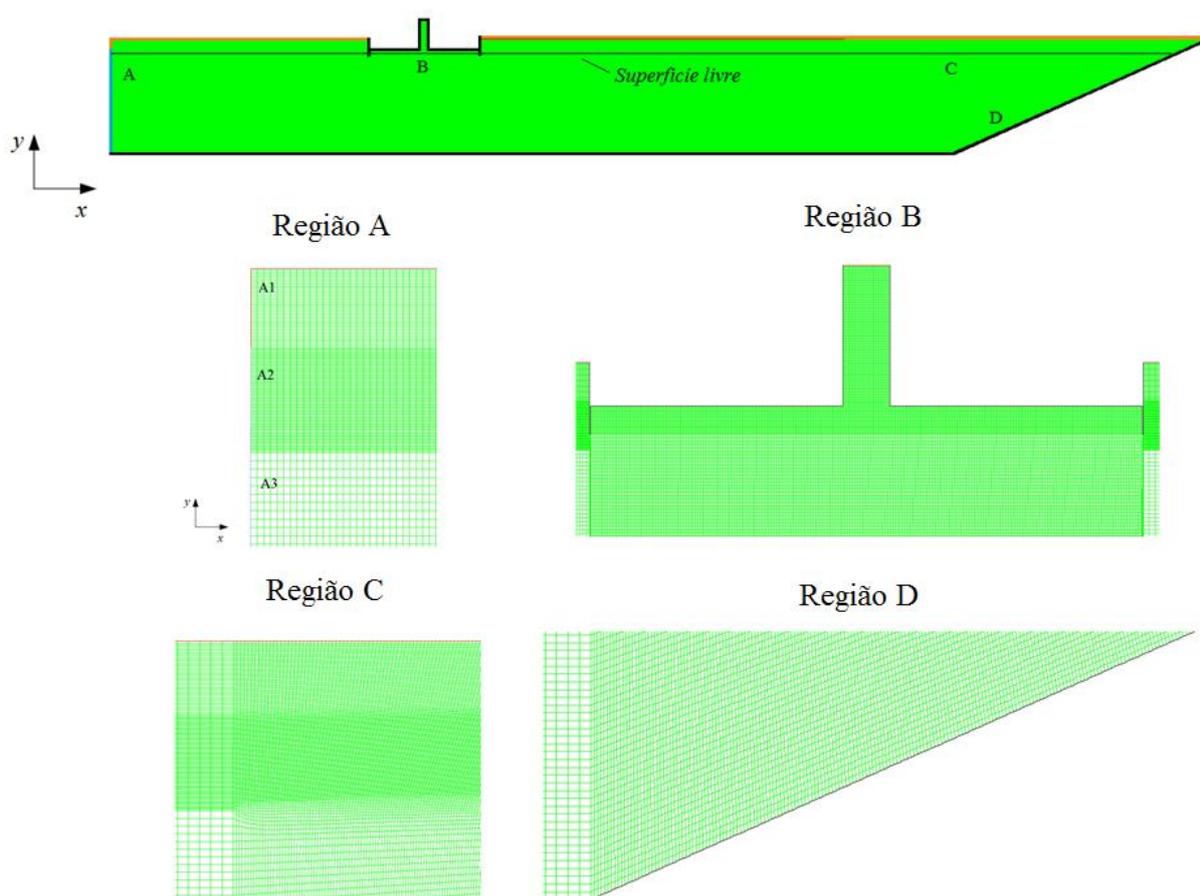


Figura 4. Esquema de discretização para as diferentes regiões do domínio computacional.

Como pode ser observado na Fig. 4, na direção vertical (Região A) o tanque de ondas é dividido em três regiões denominadas A1, A2 e A3. Na região A1 que fica acima da superfície livre é adotada uma discretização vertical de 30 volumes, na região A2 que

compreende a superfície livre o refino de malha considera 60 volumes. Na Região A3 é adotada uma malha com 90 volumes na vertical. Em todas as regiões citadas é utilizada uma malha com 300 volumes na horizontal, considerando para tanto a distância entre o gerador de ondas e o dispositivo CAO. O mesmo é válido na região a direita do dispositivo CAO. Esse refino de malha leva em conta as recomendações de Barreiro (2009) e Gomes et. al (2012).

Na Região B, onde está localizado o dispositivo CAO, é considerada uma malha regular com quadriláteros de 0,2 m. Para completar o domínio computacional, quadriláteros com 0.3 m de lado foram utilizados na discretização da região de absorção, rampa, do domínio computacional (Região C e Região D)

4 MODELO MATEMÁTICO

4.1 Design Construtal aplicado a dispositivos CAO

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

Como já foi dito, a proposta deste trabalho é analisar numericamente o efeito da variação da geometria da câmara hidropneumática de um conversor CAO considerando um espectro de onda com período significativo $T_S = 7,5$ s, altura significativa $H_S = 1,5$ m e com 15 componentes.

Busca-se assim, obter uma recomendação teórica para a geometria do dispositivo do tipo CAO que possui a maior eficiência na transformação de energia das ondas do mar em energia elétrica submetido a um espectro de ondas real. Considera-se para isso, a reprodução da formulação de Design Construtal adotada em Gomes et. al. (2013) em que foi considerada uma onda com características regulares. Este é o diferencial desta proposta, em relação aos demais trabalhos que envolvem a aplicação de Constructal Design em energia das ondas do mar.

Dessa forma é analisado o grau de liberdade: H_1/L (razão entre a altura e comprimento da câmara coluna de água oscilante). A relação H_2/l (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) e H_3 (profundidade de submersão da câmara CAO) são mantidas constantes. O volume de entrada da câmara do dispositivo CAO (V_E) e o volume total do dispositivo CAO (V_T), respectivamente, são mantidos constantes e são as restrições geométricas do problema. De acordo com Bejan e Lorente (2008), estes volumes devem ser mantidos constantes, pois

através deles ocorre escoamento com volume finito. Em geral, os sistemas tendem a possuir o maior volume possível a fim de cumprir com o propósito ao qual se destinam. Entretanto, isto não é possível porque o sistema muitas vezes precisa ser transportado e nesse caso ele precisa ter o menor peso possível (menor massa, menor volume). Assim, desse balanço, se conclui que o sistema precisa ser finito e é resultado do balanço dessas duas tendências.

Os volumes V_E e V_T , respectivamente, são descritos por:

$$V_E = H_1 L L_1 \quad (11)$$

$$V_T = V_E + H_2 l L_1 \quad (12)$$

A dimensão L_1 é mantida constante e igual a um, de modo que o problema é considerado bidimensional. A partir da Eq. (11) é possível obter equações que determinam as dimensões para o comprimento (L) e para a altura (H_1) da câmara CAO, respectivamente:

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

$$H_1 = L \left(\frac{H_1}{L}\right) \quad (14)$$

E a partir da Eq. (12) é possível obter as equações que determinam as dimensões para o diâmetro (l) e a altura (H_2) da chaminé da câmara CAO, respectivamente:

$$l = \left[\frac{V_T - V_E}{\left(\frac{H_2}{l}\right) L_1} \right]^{1/2} \quad (15)$$

$$H_2 = l \left(\frac{H_2}{l}\right) \quad (16)$$

Vale destacar que a relação H_2/l é mantida constante, $H_2/l = 3.0$, e a profundidade de submersão também são mantidas constantes $H_3 = 39,25$ m, para todas as simulações realizadas.

O objetivo é sempre levar em consideração o clima de ondas para a variação da geometria do dispositivo CAO. Assim, como critério para a definição da restrição do volume de entrada da câmara do dispositivo CAO (V_E) considera-se a situação inicial em que o comprimento do dispositivo CAO (L) é igual ao comprimento da onda incidente (λ), relativa ao período de

onda significante, e que a altura do dispositivo CAO (H_1) é igual à altura da onda incidente significante (H_s). Para determinar a restrição do volume total do dispositivo CAO (V_T) é definido que V_E representa 70 % de V_T .

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

Considerando as Eqs. (13) - (16) é possível determinar as dimensões testadas neste trabalho, conforme apresentado na Tab. 1.

Tabela 1. Variações da geometria do dispositivo CAO.

H_1/L	l [m]	H_2 [m]	L [m]	H_1 [m]
0,0229	3,7435	11,2306	65.4000	1.5000
0,0344	3,7435	11,2306	53.3989	1.8371
0,0516	3,7435	11,2306	43.6000	2.2500
0,0774	3,7435	11,2306	35.5993	2.7557
0,1161	3,7435	11,2306	29.0667	3.3750
0,1742	3,7435	11,2306	23.7328	4.1335
0,2613	3,7435	11,2306	19.3778	5.0625
0,3919	3,7435	11,2306	15.8219	6.2003
0,5878	3,7435	11,2306	12.9185	7.5937
0,8817	3,7435	11,2306	10.5479	9.3004
1,3226	3,7435	11,2306	8.6123	11.3906

4.2 Modelo *Volume of Fluid* (VOF)

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

Além disso, quando o método VOF é empregado, apenas um único conjunto de equações, formado pelas equações de quantidade de movimento e de continuidade, é aplicado a todos os fluidos componentes do escoamento. Então, a fração de volume de cada fluido em cada célula (volume de controle) é considerada em todo o domínio computacional através da equação de transporte para a fração volumétrica. Assim, o modelo é composto pela equação de continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (17)$$

a equação da fração volumétrica:

$$\frac{\partial (\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \quad (18)$$

E as equações de quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (19)$$

onde: ρ é a massa específica do fluido (kg/m³), t é o tempo (s), \vec{v} é o vetor velocidade do escoamento (m/s), p é a pressão estática (N/m²), μ é a viscosidade (kg/(ms)), $\vec{\tau}$ é o tensor de tensões (N/m²) e \vec{g} é a aceleração da gravidade (m/s²).

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):

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (20)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (21)$$

5 MODELO NUMÉRICO

Para a solução das equações de conservação da massa e quantidade de movimento, foi empregado um código comercial baseado no Método de Volumes Finitos - MVF (FLUENT, 2006). Para todas as simulações foi considerado o esquema de advecção *upwind* para tratamento dos termos advectivos, enquanto a discretização espacial para a pressão foi realizada através do método PRESTO e o método GEO-RECONSTRUCTION para a fração volumétrica. Quanto ao acoplamento pressão-velocidade foi empregado o método PISO. Além disso, empregaram-se os fatores de sub-relaxação para as equações da conservação da massa e quantidade de movimento de 0.3 e 0.7, respectivamente. Para a solução do sistema de equações gerado após a discretização é utilizado o método Gauss Seidel com multigrid algébrico. Maiores detalhes sobre a metodologia numérica podem ser obtidos em Patankar (1980) e Versteeg e Malalasekera (2007).

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

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Verificação da geração do espectro de ondas

Na Fig. 5a é apresentada uma comparação gráfica entre a elevação da superfície livre obtida analiticamente e numericamente, na posição $x = 10$ m ao longo de 100 s. É importante ressaltar que a equação analítica é obtida a partir da Eq. (7) e da soma das amplitudes instantânea para as 15 ondas componentes do espectro em consideração. De uma maneira qualitativa é possível notar uma razoável concordância entre as duas soluções apresentadas na Fig. 5a.

Para comparar as alturas significativas, da solução analítica e numérica, pode-se utilizar a norma l_∞ , dada por (Kreyszig, 2011):

$$\|x\|_\infty = \max_j |x_j| \quad (22)$$

onde x_j representa a variável em consideração instantânea.

Em termos quantitativos é verificar que a norma l_∞ para a elevação da superfície livre obtida analiticamente é igual a 1,3892 e para a solução numérica é igual a 1,0373. Ou seja, nos picos de elevação as alturas significativas possuem uma diferença de aproximadamente 0,3519 m.

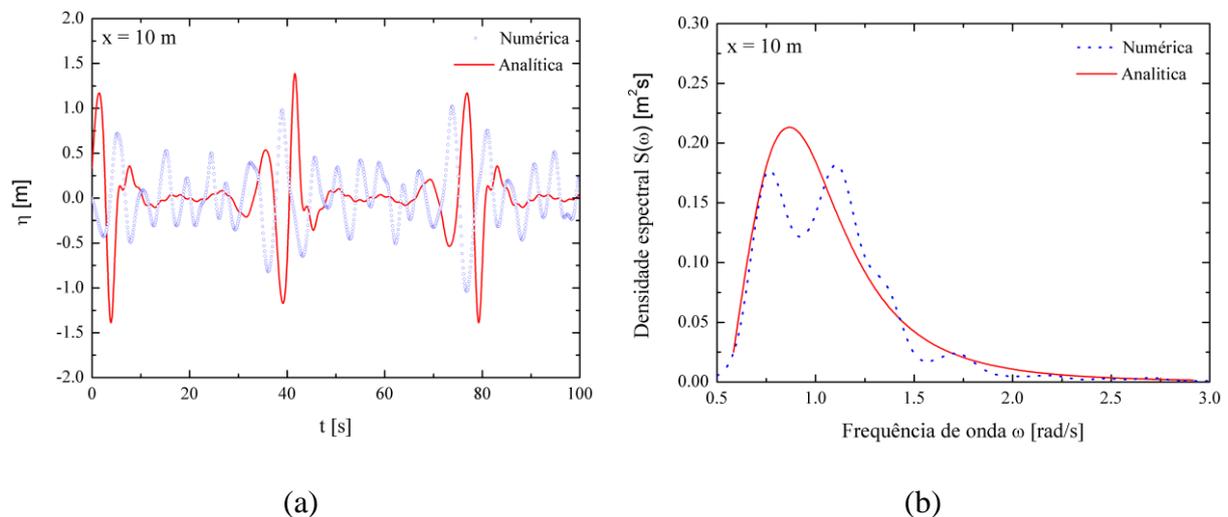


Figura 5. Comparação da solução analítica com a numérica da: (a) elevação da superfície livre em $x=10$ m e (b) da densidade espectral.

Entretanto, a análise mais recomendável tratando-se de espectro de ondas é em relação à densidade espectral, conforme apresentado na Fig. 5b. Calculando a norma l_∞ , Eq. (22), é encontrado para a densidade espectral obtida analiticamente um valor igual a 0,2237 e para a

solução numérica um valor igual a 0,2278. Deste modo é notável a pequena diferença tanto quantitativamente, quanto qualitativamente, analisando a Fig. 5b. Sendo assim é possível destacar que o modelo computacional adotado neste trabalho reproduz o fenômeno real de maneira adequada. Ainda é importante ressaltar que o avanço no tempo utilizado foi de 0,01 s, ou seja, $T_s / 750$.

6.2 Estudo de caso

A proposta é analisar numericamente o efeito da variação da geometria da câmara de um conversor CAO conforme o realizado em Gomes (2014). Entretanto, é considerado um espectro de ondas com 15 componentes e altura significativa $H_s = 1,5$ m e período significativo $T_s = 7,5$ s. Dessa forma é analisado o grau de liberdade: H_1/L (razão entre a altura e comprimento da câmara coluna de água oscilante), conforme apresentado na Tab. 1. O grau de liberdade H_2/l (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) é mantido constante e igual a 3,0 e a profundidade de submersão $H_3 = 39,25$ m.

Para calcular os valores médios foi considerada a média RMS (*Root Mean Square*), dada pela seguinte equação indicada por Marjani et al. (2006):

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (23)$$

onde: X é a variável de interesse (vazão mássica, pressão, etc...)

Na Fig. 6a é possível observar que quando o grau de liberdade H_1/L aumenta a média RMS da pressão (no interior da câmara CAO) tende a diminuir, na média tem-se uma diferença de cerca de 50 Pa. Entretanto, para a vazão mássica (na chaminé do dispositivo CAO) é possível notar, na Fig. 6b, que existe uma relação de H_1/L em que o desempenho é melhor em relação aos demais casos. São obtidas diferenças médias entre o melhor e o pior desempenho de cerca de 20 kg/s.

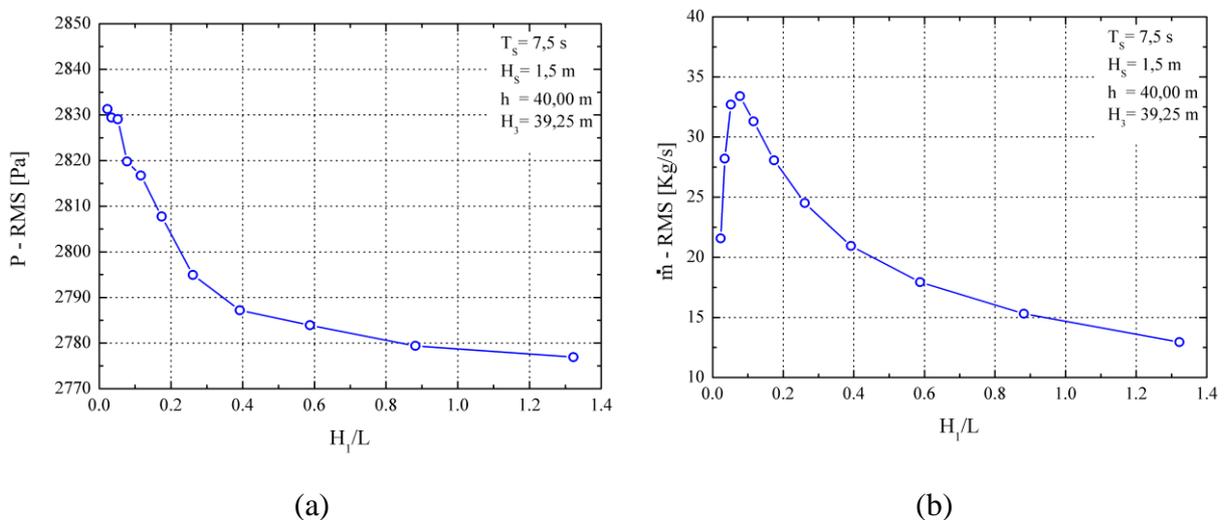


Figura 6. Média RMS, considerando a variação de H_1/L , para: (a) pressão, e (b) vazão mássica.

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

$$P_{hyd} = \left(P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (24)$$

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 no duto da turbina (kg/s) e v_{ar} é a velocidade do ar no duto da turbina (m/s), que pode ser dada por:

$$v_{ar} = \frac{\dot{m}}{A\rho_{ar}} \quad (25)$$

sendo A a área da secção transversal da chaminé (m^2).

Observando a Fig. 7, quando $H_1/L = 0,0516$ tem-se a maior média RMS para a potência hidropneumática. Na Tab. 1 tem-se para $H_1/L = 0,0516$ que $L = 43,6$ m e $H_1 = 2,25$ m. No presente estudo é considerado um espectro de ondas, entretanto é possível comparar as dimensões geométricas obtidas para a relação $H_1/L = 0,0516$ com a altura significativa (H_s) e o comprimento de onda a partir do período significativo (λ_s). Relacionando estes valores, pode-se concluir, aproximadamente, que $L \sim 0,66 \lambda_s$ e $H_1 \sim 1,5 H_s$. Deste modo é possível verificar a seguinte relação teórica para o caso ótimo:

$$\left(\frac{H_1}{L} \right)_o \cong 2,25 \frac{H_s}{\lambda_s} \quad (26)$$

É importante comparar a relação dada pela Eq. (26) com a obtida em Gomes (2014), considerando ondas regulares. No trabalho de Gomes (2014) uma recomendação teórica geral para o caso ótimo indica que $L \sim 0,50 \lambda$ e $H_1 \sim 2 H$. E num determinado intervalo de períodos, de $T = 5$ s até $T = 7$ s, Gomes (2014) indica que $L \sim 0,66 \lambda$ e $H_1 \sim 1,5 H$. Portanto, os resultados obtidos neste trabalho estão em concordância com resultados apresentados na literatura e corroboram uma relação geométrica universal neste tipo de sistema.

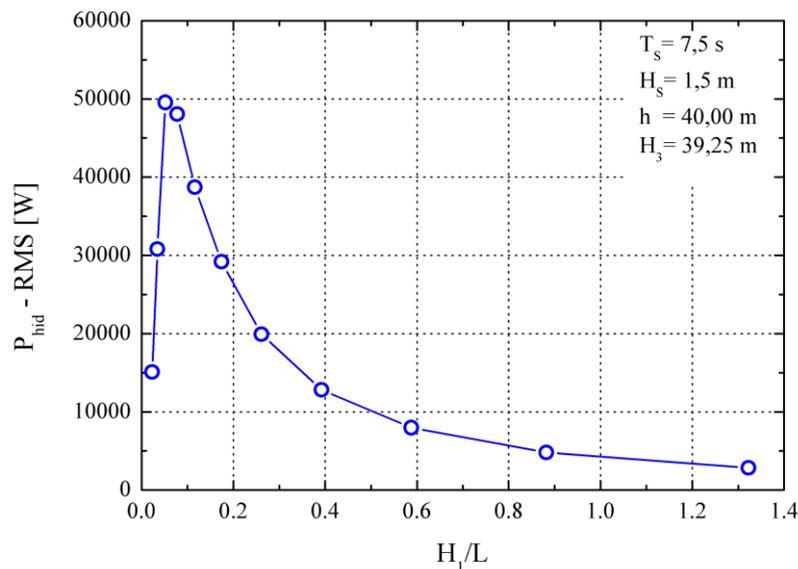


Figura 7. Média RMS, considerando a variação de H_1/L , para a potência hidropneumática.

Uma forma de avaliar o efeito de pistão no interior da câmara CAO é através do fator de amplificação. O mesmo é definido normalizando a altura média de elevação da superfície livre na câmara CAO (H_m) pela altura da onda incidente (H), H_m/H (Ramalhais, 2011). Na Fig. 8 é apresentado o comportamento do fator de amplificação em relação à variação do grau de liberdade H_1/L .

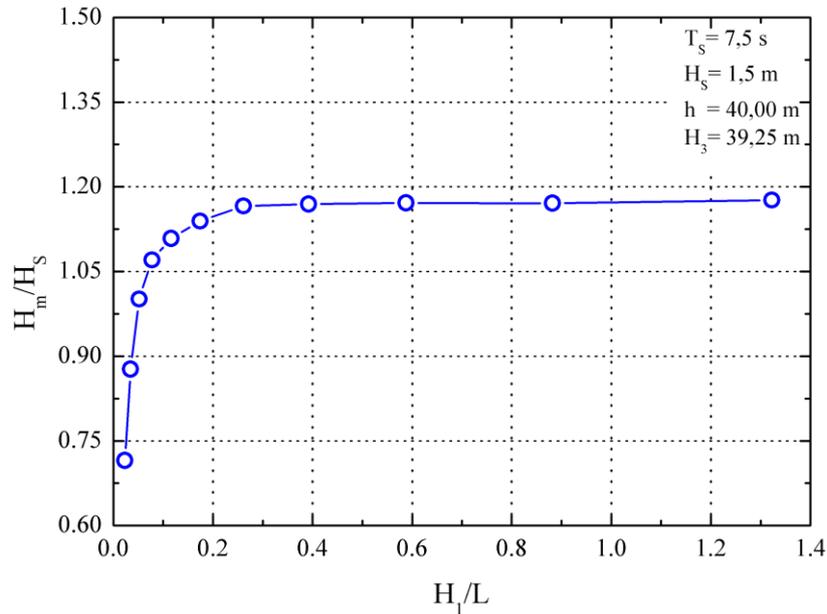


Figura 8. Comportamento do fator de amplificação em relação ao grau de liberdade H_1/L .

A Fig. 8 mostra que a média RMS do fator de amplificação tende a estabilizar próximo a 1,20 a partir de um dado valor de H_1/L , nesse caso próximo a 0,2, mostrando assim a sensibilidade geométrica do problema em consideração, pois, ainda que o comprimento da câmara CAO (L) diminua e a altura da câmara (H_1) aumente, o efeito de pistão tende a ser constante. De uma forma qualitativa estes resultados são coerentes com os apresentados em Gomes (2014) onde eram consideradas ondas com características regulares.

Analisando a Eq. (24) a potência hidropneumática é função da vazão mássica e da pressão. Deste modo, otimizar dispositivos CAO significa encontrar um arranjo geométrico que possibilite a maximização da vazão mássica e da pressão. Na Fig. 9a é apresentado o comportamento transiente da pressão para o melhor caso ($H_1/L = 0,0516$) e o pior caso ($H_1/L = 1,3226$) das Figs. 6 e 7. É possível notar na Fig. 9 que as maiores magnitudes de pressão ocorrem na fase de descompressão do dispositivo CAO, observa-se ainda que diferenças instantâneas de até 100 Pa podem ocorrer.

No que diz respeito à vazão mássica o comportamento em ambas as situações, melhor ($H_1/L = 0,0516$) e o pior ($H_1/L = 1,3226$), é simétrico, conforme pode ser verificado na Fig. 9b. Esse aspecto é importante e desejável para o bom funcionamento da turbina do tipo *wells*. Podem ocorrer diferenças instantâneas de até aproximadamente 10 kg/s.

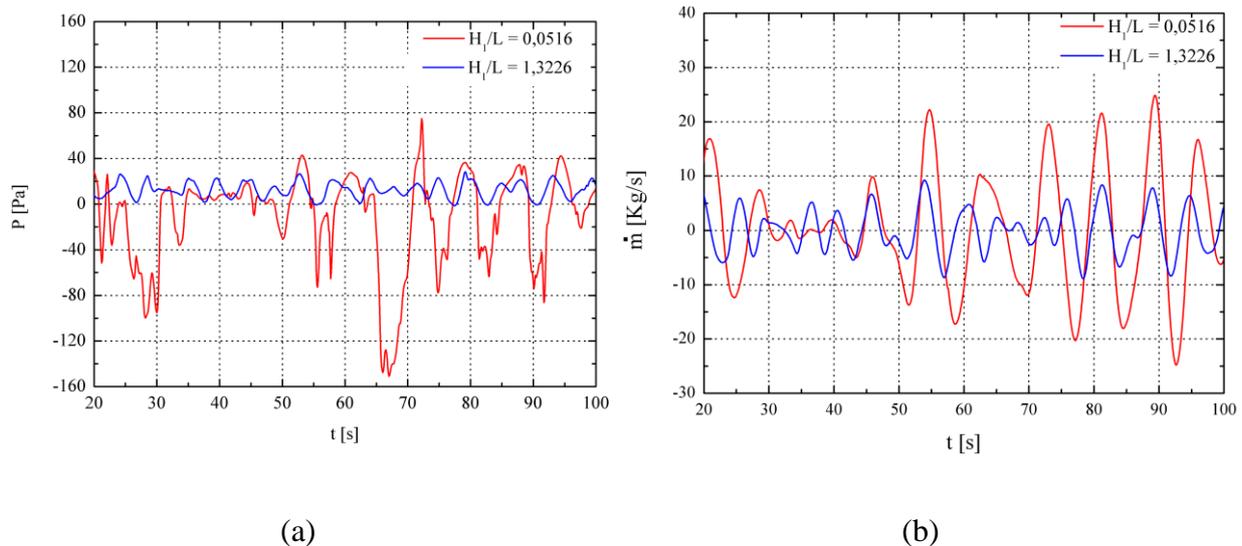


Figura 9. Comportamento transiente para $H_1/L = 0,0516$ e $H_1/L = 1,3226$ da: (a) pressão e (b) vazão mássica.

7 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico com o objetivo de determinar uma geometria ótima para um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de água oscilante (CAO). O aspecto inovador deste trabalho consistiu em considerar um espectro de ondas real com altura significativa $H_S = 1,5$ m, período significativo $T_S = 7,5$ s e com 15 componentes de onda. Para a análise geométrica, o método Design Construtal foi usado para definir as diversas variações das geometrias, permitindo definir qual arranjo geométrico que possibilita um melhor desempenho do sistema CAO. Assim, o principal objetivo foi à obtenção de uma recomendação teórica sobre os valores do grau de liberdade H_1/L (razão entre a altura e o comprimento de entrada da câmara hidropneumática), que permitem obter valores de potência hidrodinâmica mais elevados para um dispositivo CAO, quando sujeito a incidência das ondas do espectro adotado.

O melhor desempenho, ou seja, o valor máximo RMS para a potência hidropneumática para o caso de uma câmara CAO foi obtido quando $(H_1/L)_o = 0,0516$, $H_2/l = 3,0$ e $H_3 = 9,25$ m, sendo cerca de dezessete vezes melhor que o pior caso.

Durante o processo de otimização ficou evidente que uma simples redistribuição geométrica faz com que o dispositivo CAO tenha uma melhoria no desempenho, mostrando a aplicabilidade do método Design Constructal neste tipo de problemas de engenharia. Estes resultados são muito promissores, pois fornecem uma recomendação teórica sobre a geometria ideal de um dispositivo CAO, que permite a maximização do aproveitamento das ondas incidentes. Além disso, de acordo com a formulação de Constructal adotada, é possível relacionar as dimensões do dispositivo CAO com as características das ondas incidentes. Assim, se o clima de ondas é conhecido, é possível conceber o sistema CAO para uma região específica atingindo o seu melhor desempenho.

Por fim, outro aspecto a ser ressaltado é que os resultados obtidos para o arranjo geométrico, considerando um espectro de ondas, estão em consonância com os apresentados na literatura para ondas regulares.

REFERENCIAS

- Ansys,2016. “Theory Guide FLUENT 2016”.
- Barreiro, T. G., 2009. *Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- Bejan, A., 2000. *Shape and Structure, from Engineering to Nature*. Cambridge University Press,Cambridge, UK.
- Bejan, A., Lorente, S., 2008. *Design with Constructal Theory*. Wiley, Hoboken.
- Bejan, A., Zane J., 2012. *Design in nature*. Doubleday, USA.
- Bejan, A., Lorente, S.,2013. Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society. *Journal of Applied Physics*, Vol. 113, pp.151301-1 – 151301-20.
- Bouali, B.; Larbi, S., 2013. “Contribution to geometry optimization of an oscillating water column wave energy converter”. *Energy Procedi.*, V. 36, pp. 565-573.
- Chakrabarti, S. K., 2005. *Handbook of offshore engineering*. vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 661 p.
- 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, pp. 2637-2644.
- Conde, J. M. P.; Teixeira, P. R. F.; Didier, E.,2010.“Simulação numérica de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante: comparação de dois códigos numéricos”, IV SEMENGO - Seminário e workshop de engenharia oceânica, Rio Grande.
- Conde, J. M. P.; Didier, E.; Teixeira, P. R. F., 2011, ”Numerical Simulation of an Oscillating Water Column Wave Energy”,The 21st International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference – ISOPE, Maui.
- Cruz, J. M. B. P., Sarmiento, A. J. N. A., 2004 . *Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais*. Ed. Instituto do Ambiente, Amadora, 61 p.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A.,1991, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. vol. 2, World Scientific.
- Dizadji N.,Sajadian S. E., 2011, Modeling and optimization of the chamber of OWC system, *Energy*, Vol. 36, pp. 2360 – 2366.
- Elangovan, M., 2011. “ Simulation of irregular waves by CFD”. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, V. 5, pp- 427-431.
- Falcão, A. F. de O., 2010, “Wave energy utilization: A review of the technologies”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.V.14, pp-899-918.
- Fluent (version 6.3.16), ANSYS, Inc., 2006.
- Gomes, M. das N. ; Olinto, C. R. ; Rocha, L. A. O. ; Souza, J. A. ; Isoldi, L. A., 2009. Computational modeling of a regular wave tank. *Engenharia Térmica*, v. 8, p. 44-50.
- 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.

Gomes, M. N., Santos, E. D. Dos, Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2012, Análise de malhas para geração numérica de ondas em tanques. In: *Proceedings VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2012*. São Luiz, Brazil.

Gomes, M. N., Santos, E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2013, Two-dimensional geometric optimization of an oscillating water column converter of real scale. In: *Proceedings 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*, Ribeirão Preto.

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.

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.

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.

Iahnke, S. L. P.; 2010. *Energia das Ondas: Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para um Conversor de Galgamento*. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal do Rio Grande.

Journee, JMJ., Massie, W. W., 2001. “*Offshore Hydrodynamics*” First edition.

Khalig, A. E., ONAR, O. C, 2010, *Energy Harvesting: Solar, Wind and Ocean Energy Conversion Systems*, Taylor & Francis, London.

Kreyszig, E., Kreyszig, H., Norminton, E. J., 2011, “*Advanced Engineering Mathematics*”, 10^a ed., 1283 p..

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

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

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

Maliska, C. R.; 2004. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 453 p, 2004.

Marjani A., E., Castro, F., Bahaji, M., Filali, B., 2006, 3D unsteady flow simulation in an OWC wave converter plant. *in: Proceedings International Conference on Renewable Energy and Power Quality*, Mallorca, Espanha.

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

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

- 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.
- Patankar, S. V., 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw Hill, New York.
- Ramalhais, R. dos S., 2011. Estudo numérico de um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO). Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- SEnturk, U.; Ozdamar, A., 2012, “Wave energy extraction by na oscillating water column with a gp on the fully submerged front wall”. *Applied Ocean Research*. V. 37, p. 174-182.
- V. Srinivasan, A.J. Salazar, and K. Saito, 2011. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. *Applied Mathematical Modeling*, vol. 35, n. 8, pp. 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*, v.61, pp. 513-530.
- Tseng, R. H., Wu, R.-H., Huang, C.-C, 2000, “Model study of a shoreline Wave-power system”, *Ocean Engineering*, v. 27, pp. 801-821.
- Twidell, J., and Weir, T., 2006, *Renewable Energy Resources*, Taylor & Francis, London.
- Versteeg, H. K.; Malalasekera, W.; 1999. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Longman, Malaysia, 257 p.
- Versteeg, H. K.; Malalasekera, W., 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method*. Pearson, England.
- Zhang, Y.; Zou, Q.P.; Greaves, D., 2012. “Air-water two-phase flow modelling of hydrodynamic performance of na oscillating water column device”. *Renewable Energy*, v.41, pp. 159-170.
- Weber, J. W., Thomas, G. P., 2001, “An investigation into the importance of the air chamber design of an oscillating water column wave energy device”, ISOPE 2001, Staranger, Norway.

AGRADECIMENTOS

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