



OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE UM DISPOSITIVO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE NA FORMA TRAPEZOIDAL

Mateus das Neves Gomes^{1,2}

Beatriz Leandro Bonafini¹

Leandro Ferres Cassel¹

mateus.gomes@ifpr.edu.br

beatriz.info2010@gmail.com

leandro_hp7@hotmail.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.

Resumo. Este trabalho apresenta um estudo numérico bidimensional sobre a otimização da geometria na forma trapezoidal de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica. O princípio de funcionamento é o de coluna de água oscilante (CAO). O objetivo é maximizar a potência hidropneumática absorvida pelo dispositivo quando submetido a um clima de ondas real. É empregado Constructal Design para analisar o grau de liberdade β , que é o ângulo formado pela parede frontal do dispositivo CAO com a superfície livre (ângulo da base do trapézio) enquanto o outro grau de liberdade, H_2/l , (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO) é mantido constante. 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, FLUENT[®], 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. Foi possível verificar a influência do grau de liberdade analisado no aproveitamento da energia da onda incidente, o melhor desempenho foi obtido quando $\beta = 30^\circ$.

Keywords: Constructal Design, Energia das Ondas, Coluna de água Oscilante (CAO), Otimização Geométrica, Forma Trapezoidal.

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios da atualidade está em suprir a demanda energética mundial, dessa forma, são muitas as discussões a respeito de energia elétrica, no âmbito da geração e principalmente do consumo da mesma. Uma das variáveis para definir o grau de desenvolvimento de um país é a facilidade de acesso da população aos serviços de infraestrutura, como saneamento básico, transportes, telecomunicações e energia (ANEEL, 2008).

O consumo global de energia em 2011 foi de aproximadamente 1.6×10^7 MW, o que representa aproximadamente 60% a mais do que o consumo de energia em 1980 (Zabihian e Fung, 2011). Além disso, a principal fonte de energia para suprir essa demanda é derivada de combustíveis fósseis.

Os países ultimamente têm investido na exploração de novas fontes de energia, e em especial nas chamadas fontes renováveis de energia. E uma dessas é a transformação da energia contida nos oceanos em energia elétrica. Segundo Cruz e Sarmiento (2004), a energia contida nos oceanos pode ter origens distintas, o que gera diferentes classificações. As mais relevantes são, a energia das marés, fruto da interação dos campos gravíticos da lua e do sol; a energia térmica dos oceanos, consequência direta da radiação solar incidente; a energia das correntes marítimas, cuja origem está nos gradientes de temperatura e salinidade e na ação das marés; e, a energia das ondas, que resulta do efeito do vento na superfície do oceano. Uma vez criadas às ondas podem viajar milhares de quilômetros no alto mar praticamente sem perdas de energia. Em regiões costeiras a densidade de energia presente nas ondas diminui devido à interação com o fundo do mar. A potência de uma onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude e ao seu período. Ondas de elevada amplitude (cerca de 2 m) e de período elevado (7 a 10 s) excedem normalmente os 50 KW por metro de frente de onda.

Uma classificação possível para as diferentes tecnologias está associada ao modo de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica, isto é, ao tipo de dispositivo. Assim, existem fundamentalmente três classes principais de conversores de energia das ondas (Cruz e Sarmiento, 2004), que são: coluna de água oscilante (CAO); corpos flutuantes,

podendo ser de absorção pontual (*point absorbers*) ou progressivos (*surging devices*); e galgamento (*overtopping*). Esta classificação não encerra a possibilidade de existirem outros tipos de dispositivos. Um exemplo é o dispositivo que utiliza uma placa horizontal em conjunto com uma turbina, ambos submersos (Carter, 2005).

O objetivo deste trabalho é otimizar a geometria de um dispositivo do tipo CAO na forma trapezoidal para o melhor aproveitamento da energia presente em um clima de ondas estabelecido. É importante ressaltar que este estudo é realizado de forma numérica. Espera-se que, caso o princípio se mostre adequado para a otimização geométrica de casos mais simplificados, o mesmo possa ser extrapolado para dispositivos reais a serem inseridos no mar.

Uma estratégia de otimização que pode ser empregada é o *Constructal Design* que é baseado na Teoria Constructal desenvolvida por Adrian Bejan (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012; Bejan e Lorente, 2013). A Teoria Constructal 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 físico fundamental do acesso aos fluxos no tempo. Este princípio é a Lei Constructal, 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). No campo da engenharia, *Constructal Design* tem sido predominantemente empregado para a otimização geométrica de problemas na área de mecânica dos fluidos e transferência de calor (Bejan e Lorente, 2008; Rocha et al., 2013).

Cabe destacar que é crescente a aplicação de *Constructal Design* para análise geométrica em conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica. Em Lopes et al. (2011) e Rocha et al. (2013) foi empregado *Constructal Design* para a otimização geométrica de um sistema de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO, variando o grau de liberdade definido pela razão entre o comprimento do diâmetro da chaminé (l) e o comprimento da câmara CAO (L). Neste estudo foi adotada uma onda com características de laboratório e tanto o comprimento da câmara CAO (L) quanto à altura da câmara (H_1) foram mantidos constantes, enquanto que o diâmetro de saída da chaminé (l) foi variado, possibilitando a variação do grau de liberdade l/L . O resultado principal indica que a razão “ótima” é quando $(l/L)_O = 0,6$. O principal objetivo foi maximizar a vazão mássica de ar na chaminé de saída do dispositivo CAO.

O mesmo princípio foi empregado para a otimização geométrica de um dispositivo do tipo galgamento em Machado et al. (2011) e Rocha et al. (2013). Nestes trabalhos o grau de liberdade adotado foi a razão entre a altura da rampa e o seu comprimento e o objetivo foi maximizar a quantidade de água introduzida no reservatório do dispositivo. Em ambos os estudos os resultados indicaram que a metodologia *Constructal Design* pode ser usada de maneira satisfatória para a otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar.

Além disso, em Gomes et al. (2012) foi realizado um estudo numérico bidimensional sobre otimização geométrica, utilizando *Constructal Design*, de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar do tipo CAO *offshore* em um domínio bidimensional, onde H_1/L (razão entre a altura e comprimento da câmara CAO) foi variada e H_2/l (razão entre a altura e o diâmetro da chaminé) foi mantido constante. A área da câmara do dispositivo CAO (ϕ_1) e a área total do dispositivo CAO (ϕ_2) foram mantidos constantes, sendo estas as restrições do problema, conforme o *Constructal Design*. Para essa análise foi considerado um clima de

ondas regular em escala de laboratório, com período $T = 0,8$ s e comprimento de onda $\lambda = 1,0$ m. A recomendação teórica a respeito da geometria ideal foi definida por $(H_1/L)_o = 0,84$, que é aproximadamente dez vezes mais eficiente do que a pior geometria ($H_1/L = 0,14$). É importante destacar que neste estudo a profundidade de submersão da câmara CAO H_3 é mantida fixa.

A estratégia aplicada em Gomes et. al (2012) foi estendida para uma onda com período $T = 5$ s, ou seja, uma onda com características reais. Em Gomes et. al (2013) além do grau de liberdade H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO) a profundidade de submersão da câmara CAO (H_3) também foi otimizada. Os resultados apontaram uma recomendação teórica sobre a geometria da câmara CAO que maximiza a eficiência do dispositivo CAO. A maior eficiência obtida (cerca de 40%) é obtida quando $(H_1/L)_o = 0,13$ e $H_3 = 9,50$ m. Por outro lado, a configuração geométrica com o pior desempenho (cerca de 4,40 %) é obtida quando $H_1/L = 0,03$ e $H_3 = 9,00$ m. Ou seja o melhor caso apresenta uma eficiência cerca de dez vezes maior em relação ao pior caso.

Em Santos et al. (2014) é abordado um dispositivo conversor de energia das ondas do mar cujo principio de funcionamento é o galgamento. Um estudo numérico é realizado para otimizar geometricamente empregando *Constructal Design* o conversor submetido a diversas profundidades relativas.

Em Gomes et. al (2014) foi realizado um estudo com o objetivo de encontrar a geometria ótima que maximiza a média RMS (*Root Mean Square*) da potência hidropneumática incidente ao dispositivo quando submetido a um clima de ondas real. Para tanto foi empregado o método *Constructal Design* para variar os graus de liberdade H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO) e H_3 (profundidade de submersão do dispositivo CAO), enquanto o outro grau de liberdade, H_2/l (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO) é mantido fixo. No modelo computacional foi considerado o efeito da perda de carga que a turbina causa ao escoamento de ar. Para tanto foi utilizada uma restrição física na forma elíptica e localizada na chaminé de saída da câmara CAO. O melhor desempenho foi obtido para um dispositivo com a configuração *offshore* para uma razão ótima de $(H_1/L)_o = 0.13$ e $H_3 = 9,25$ m.

Nos trabalhos de Lopes et. al (2011), Gomes et. al (2012), Gomes et. al (2013), Rocha et al. (2013) e Gomes et. al (2014) o principio de funcionamento abordado é o de Coluna de Água Oscilante (CAO) e a câmara possui o formato retangular. Esta forma geométrica é propícia para a recirculação de ar na região de entrada da chaminé, ocasionando perdas no aproveitamento da potência da onda incidente. Assim, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo similar ao de Gomes et. al (2013), entretanto, considerando a câmara CAO no formato trapezoidal.

A modelagem do domínio computacional (câmara e tanque de ondas) é feita no software GAMBIT® e as simulações numéricas foram realizadas com um código computacional implementado no aplicativo de dinâmica dos fluidos computacional FLUENT®, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF) (Fluent, 2006; Versteeg e Malalasekera, 2007). O modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) (Hirt e Nichols, 1981) é aplicado no tratamento da interação água-ar, semelhante ao utilizado por (Horko, 2007; Liu et al. ,2008a; Liu et al. ,2008b; Gomes, 2010; Liu et al. , 2011; Ramalhais , 2011). O domínio computacional é representado por um tanque de ondas com um dispositivo CAO acoplado. Assim foi possível analisar o conversor sujeito a incidência de ondas regulares em escala real.

2 DISPOSITIVO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

2.1 Princípio de funcionamento do dispositivo Coluna de Água Oscilante

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).

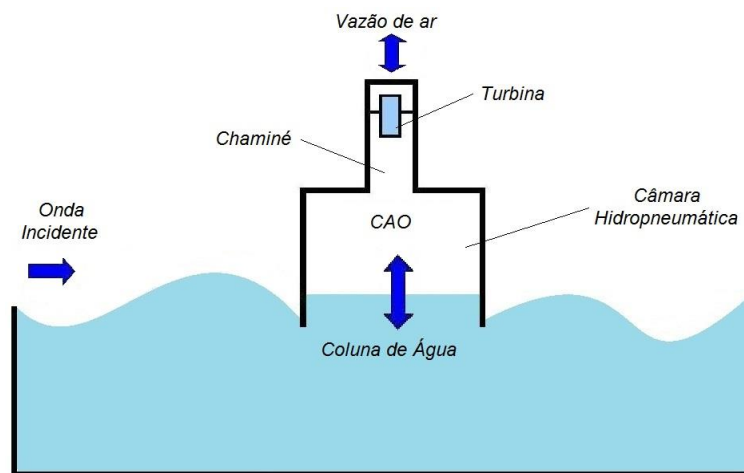


Figura 1. Esquema de funcionamento de um dispositivo CAO.

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).

2.2 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, de forma numérica, ondas regulares (com características constantes).

Para representar o problema numa escala adequada no domínio computacional é necessário o conhecimento de algumas características do clima de ondas, como: período (T), altura (H) 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.

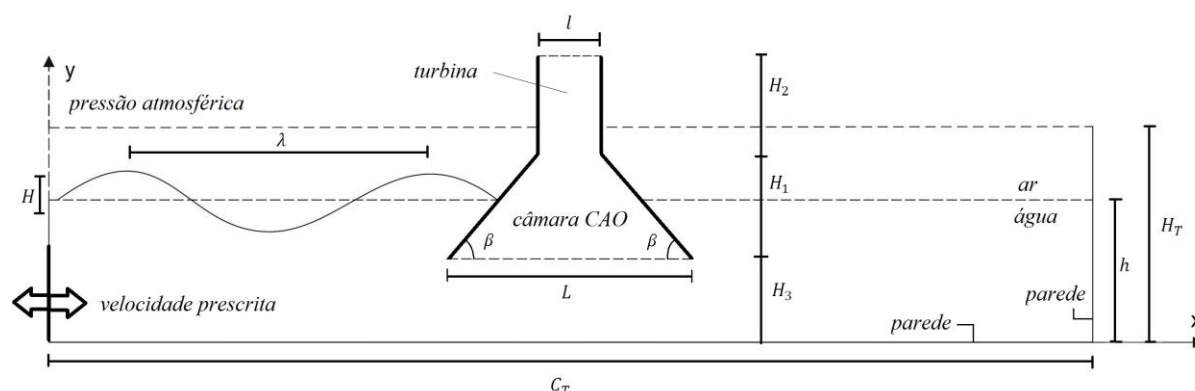


Figura 2. Representação esquemática do domínio computacional – Câmara CAO no formato trapezoidal.

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.

O clima de ondas considerado no presente trabalho tem as seguintes características: $T = 5,0$ s, $H = 1,0$ m, $\lambda = 37,6$ m, $h = 10,0$ m, $C_T = 188$ m, $H_T = 13$ m e $H_3 = 9,5$ m.

2.3 Condições de contorno

Como é possível observar na Fig. 2, o gerador de ondas numérico é posicionado no lado esquerdo do tanque de ondas. Para a geração de ondas regulares, com características constantes, é empregada a Metodologia Função, definida em Gomes et. al (2009). Esta metodologia consiste em aplicar as componentes horizontal (u) e vertical (w) da velocidade da onda como condição de contorno (velocidade de entrada prescrita) no modelo computacional, através de uma função definida pelo usuário, UDF (*user define function*), no FLUENT®. Essas componentes da velocidade variam em função do espaço e do tempo e são baseadas na Teoria de Stokes de 2ª ordem. Assim, as equações impostas na superfície de entrada são dadas por (McCormick, 1976; Dean e Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005):

$$u = Agk \frac{\cosh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + A^2 \omega k \frac{\cosh 2k(k + z)}{\sin^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (1)$$

$$w = Agk \frac{\sinh(kz + kh)}{\omega \sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) + A^2 \omega k \frac{\sinh 2k(k + z)}{\cos^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (2)$$

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

Com relação às outras condições de contorno, na parte superior da superfície lateral esquerda, bem como na superfície superior do tanque e da saída da chaminé da CAO é aplicada uma condição de contorno de pressão atmosférica (vide superfície tracejada nas 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 $h = 10,0$ m.

2.4 Geração da malha

Para a geração da malha 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). Como pode ser observado na Fig. 3, na direção vertical o tanque de ondas é dividido em três regiões denominadas A, B e C. Na região da superfície livre da água (Região B) é adotado um refinamento com 40 volumes na direção vertical (o tamanho desse intervalo é equivalente a $H/20$) e com 250 volumes na direção horizontal (intervalo equivalente a $\lambda/50$). Além disso, 10 e 60 volumes são usados na direção vertical para a discretização espacial das regiões A e C, respectivamente, de acordo com Barreiro (2009) e Gomes et. al (2012a). Para completar o domínio computacional, quadriláteros com 0.1 m de lado foram utilizados na discretização do dispositivo CAO (região E).

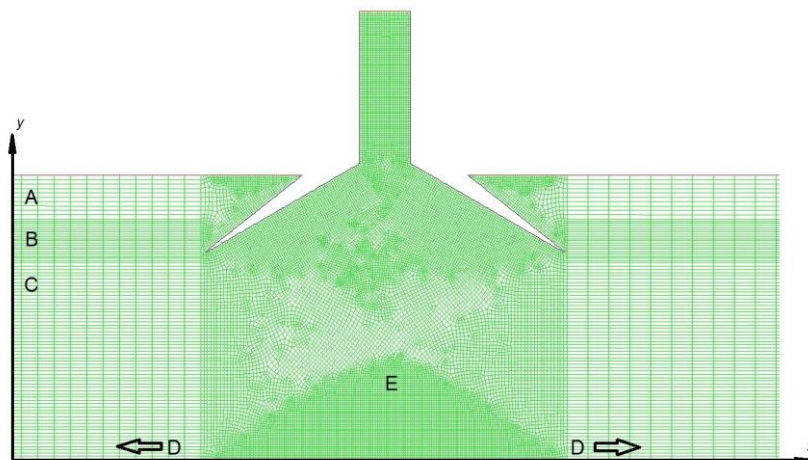


Figura 3. Esquema de discretização para as diferentes regiões do domínio computacional.

3 MODELO MATEMÁTICO

3.1 Constructal Design para um dispositivo CAO trapezoidal

A Teoria *Constructal* 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 *Constructal*, 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 *Constructal Design* 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 *Constructal Design* 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).

Neste trabalho é variado o grau de liberdade β (ângulo formado pela parede frontal do dispositivo CAO com a superfície livre - ângulo da base do trapézio, vide Fig. 2). Este grau de liberdade β é relacionado com as demais características geométricas da câmara CAO através da seguinte equação:

$$\tan(\beta) = \frac{2H_1}{(L-l)} \quad (3)$$

Os graus de liberdade H_2/l (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) e H_3 (profundidade de submersão da câmara CAO) são mantidos constantes e iguais a 3 e 9,5 m, respectivamente.

A área de entrada da câmara do dispositivo CAO (A_1) e a área total do dispositivo CAO (A_2) são mantidas constantes e são as restrições geométricas do problema. São calculadas através das seguintes equações:

$$A_1 = \frac{(L+l)H_1}{2} \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{(L+l)H_1}{2} + lH_2 \quad (5)$$

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

$$l = \left[\frac{A_2 - A_1}{(H_2/l)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$H_2 = l \left(\frac{H_2}{l} \right) \quad (7)$$

E a partir das Eqs. 3,4 e Eqs. 6,7 é possível obter equações que determinam as dimensões para o comprimento da câmara CAO (L) e para a altura da câmara CAO (H_1), respectivamente:

$$L = \left[\frac{4 \left(A_1 + \frac{l^2}{4} \tan(\beta) \right)}{\tan(\beta)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$H_1 = \frac{(L-l)}{2} \tan(\beta) \quad (9)$$

O objetivo é sempre levar em conta o clima de ondas para a variação da geometria do dispositivo CAO. Assim, como critério para a definição da restrição da área de entrada da câmara do dispositivo CAO (A_1) considera-se a 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). E para determinar a restrição da área total do dispositivo CAO (A_2) é definido que A_1 representa 70 % de A_2 , ou seja: $A_2 = 1,43 A_1$.

Variando o grau de liberdade β e considerando as Eqs. 6-9 é possível determinar as dimensões testadas neste trabalho, conforme apresentado na Tab. 1.

Tabela 1. Variações da geometria do dispositivo CAO.

β [°]	l [m]	H_2 [m]	L [m]	H_1 [m]
10	2.3214	6.9644	29.2976	2.3783
20	2.3214	6.9644	20.4599	3.3009
30	2.3214	6.9644	16.3061	4.0370
40	2.3214	6.9644	13.5878	4.7267
50	2.3214	6.9644	11.4712	5.4521
60	2.3214	6.9644	9.60327	6.3062
70	2.3214	6.9644	7.75438	7.4633
80	2.3214	6.9644	5.64879	9.4350

As funções objetivo a serem consideradas são a média RMS da: vazão mássica, pressão e potência hidropneumática.

3.2 Modelo multifásico *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:

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

a equação da fração volumétrica:

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

E as equações de quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (12)$$

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 (N/m^2), μ é a viscosidade (kg/(ms)), $\vec{\tau}$ 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):

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

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

4 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.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A verificação do modelo computacional foi realizada comparando a elevação da superfície livre ao longo do tempo, numa posição específica, obtida de forma numérica, com a respectiva solução analítica, que é definida por (Dean e Darlymple, 1991):

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) + \frac{A^2 k \cosh(kh)}{4 \sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos 2(kx - \omega t) \quad (15)$$

onde: A é a amplitude da onda (m), dado por $H/2$.

Na Fig. 4 é possível comparar qualitativamente a propagação da onda, apresentando uma boa concordância entre as soluções numérica e analítica. Durante o intervalo $15 \text{ s} \leq t \leq 30 \text{ s}$, depois da estabilização da onda numérica, a diferença máxima encontrada foi de 5,00 %, verificando o modelo computacional para a geração da onda. O avanço no tempo é definido por: $T / 500$.

Cabe destacar que validações e verificações do modelo VOF aplicado a energia das ondas do mar, e principalmente dispositivos do tipo CAO, podem ser encontradas em Horko (2007), Liu et al. (2008a), Liu et al. (2008b), Gomes et al (2009), Gomes (2010), Ramalhais (2011), Liu et al. (2011) e Gomes et al (2012a).

Na Fig. 5a é possível observar que quando o grau de liberdade β é variado à média da vazão mássica (na chaminé do dispositivo CAO) e da pressão (no interior da câmara CAO) possuem um comportamento similar e apresentam um intervalo, próximo a $\beta = 30^\circ$, com um desempenho ótimo. São obtidas diferenças médias, entre o melhor e o pior aproveitamento, de aproximadamente 10 kg/s para a vazão mássica e 15 Pa para a pressão.

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

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (16)$$

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

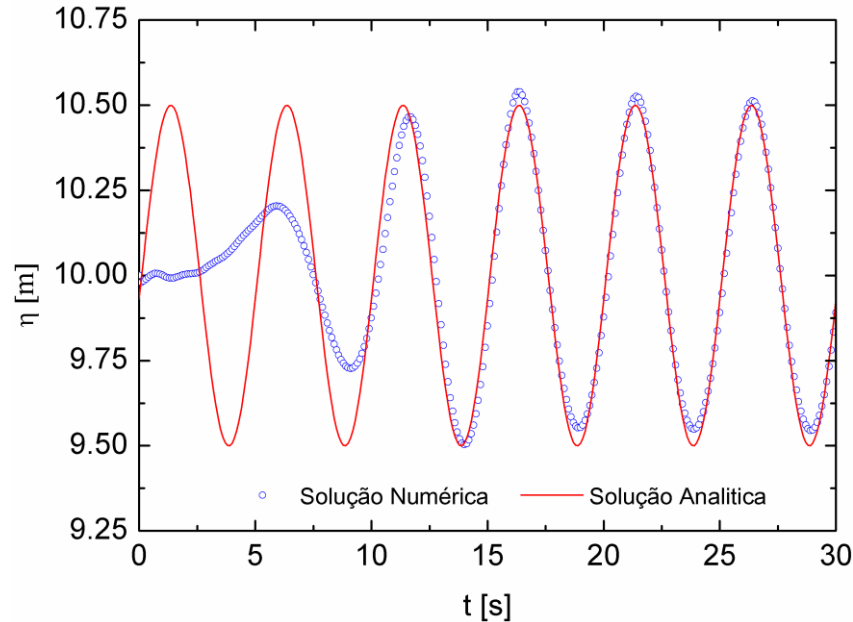


Figura 4. Elevação da superfície livre em x= 50 m com time-step T/500.

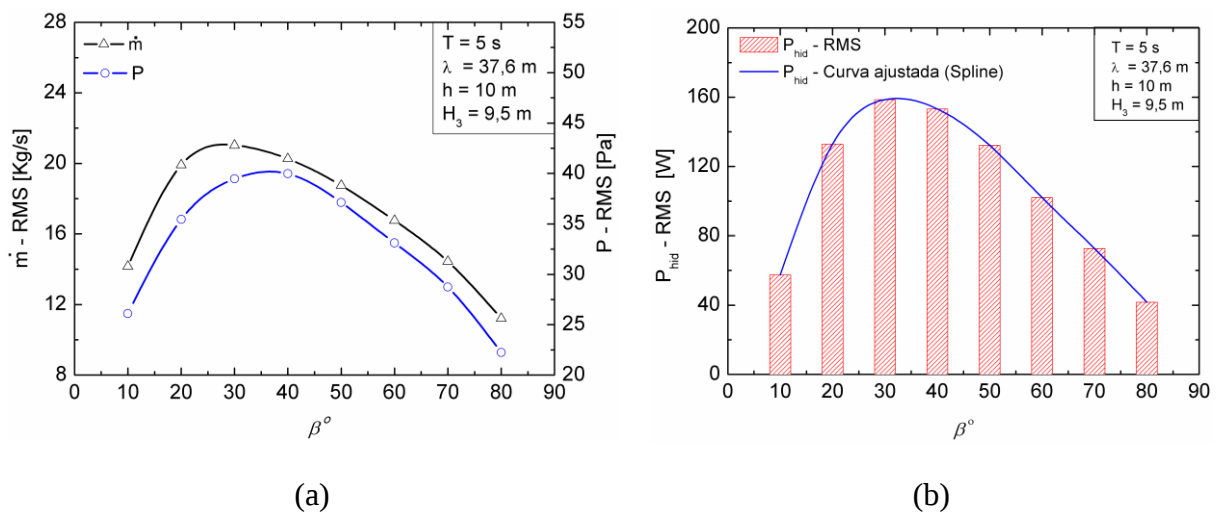


Figura 5. Média RMS, considerando a variação de β , para: (a) vazão mássica e pressão, (b) potência hidropneumática.

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

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

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:

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

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

Observando a Fig. 5b, quando $\beta = 30^\circ$ tem-se a maior média RMS para a potência hidropneumática. Essa inclinação das paredes da câmara CAO (vide Fig. 2) é o equivalente a uma relação de $(H_1/L)_o = 0,24$. Na Tab. 1 tem-se para $\beta = 30^\circ$ que $L = 16,3061 \text{ m}$ e $H_1 = 4,0370 \text{ m}$. Relacionando estes valores com o clima de ondas considerado pode-se concluir, aproximadamente, que $L \sim \lambda / 2$ e $H_1 \sim 4H$. Deste modo é possível verificar a seguinte relação teórica para o caso ótimo:

$$\left(\frac{H_1}{L} \right)_o \cong 8 \frac{H}{\lambda} \quad (19)$$

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. 6 é apresentado o comportamento do fator de amplificação em relação à variação do grau de liberdade β .

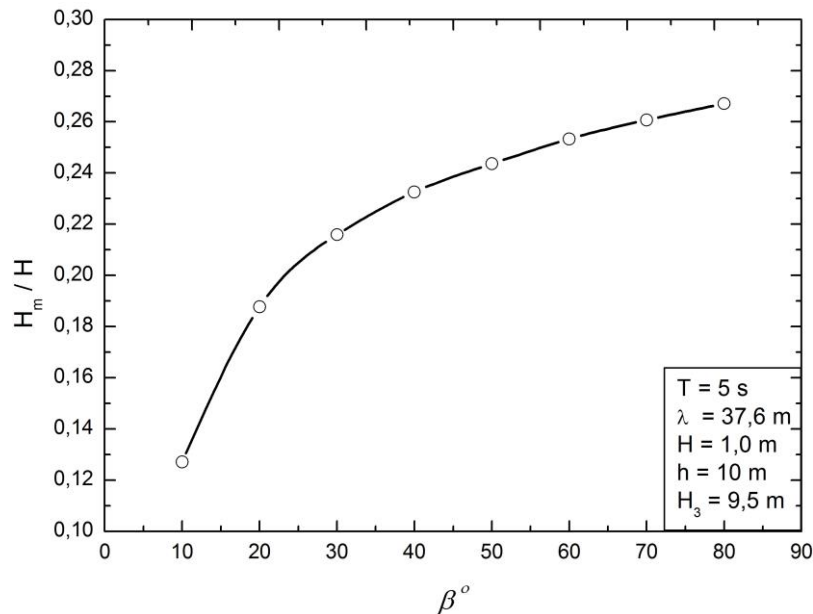


Figura 6. Comportamento do fator de amplificação em relação à variação de β .

Verificando a Tab. 1 e a Fig. 6 constata-se que o fator de amplificação aumenta quanto maior a altura da câmara CAO H_1 e menor o comprimento da câmara CAO L . Quando a inclinação das paredes da câmara CAO, vide Fig. 2, se aproxima de um ângulo reto (ou seja, uma câmara retangular) o efeito de pistão é maior, entretanto isso não é traduzido no aumento da vazão mássica na chaminé do dispositivo CAO e da pressão no interior da câmara CAO. Pois o espaço contendo somente ar dentro da câmara CAO tende a ser maior, entretanto, o espaço que o ar deverá percorrer também será maior, uma vez que a H_1 é maior, o que ocasionam maiores perdas ao escoamento.

Analisando a Eq. (17) 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. 7a é apresentado o comportamento transiente da vazão mássica para a situação em que $\beta = 30^\circ$ e $\beta = 80^\circ$. O comportamento em ambas as situações é simétrico, o que é desejável para o bom funcionamento da turbina do tipo *wells*, entretanto uma variação na inclinação das paredes do dispositivo CAO ocasiona diferenças instantâneas de até aproximadamente 4 kg/s. De maneira semelhante, na Fig. 7b, é possível observar que podem ocorrer diferenças instantâneas de até 7 Pa.

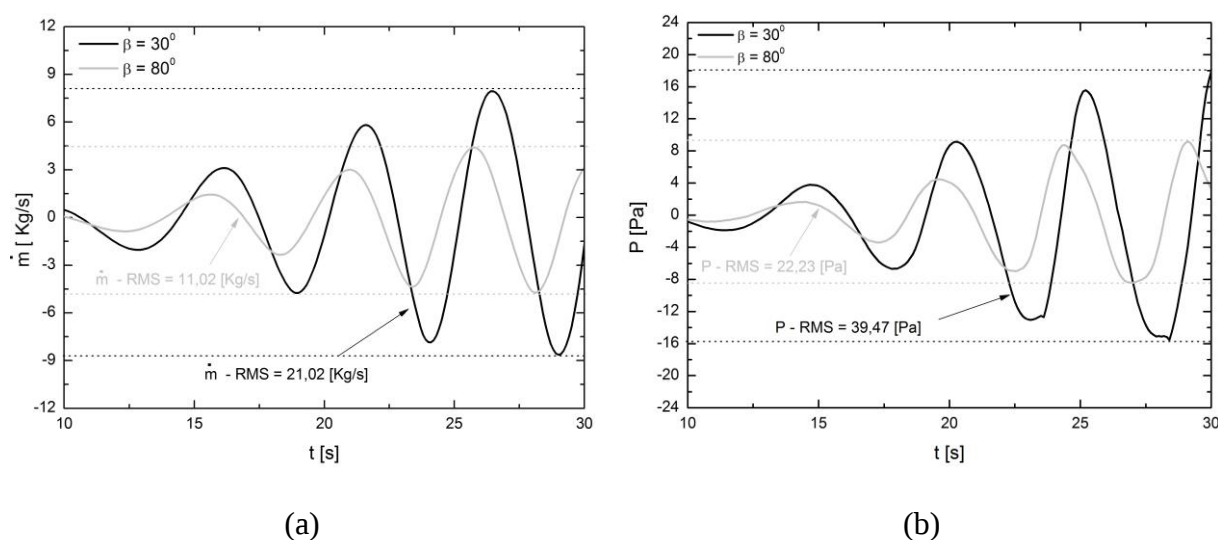


Figura 7. Comportamento transiente para $\beta = 30^\circ$ e $\beta = 80^\circ$ da: (a) vazão mássica e (b) pressão.

Na Fig. 8a é possível observar o comportamento do campo de velocidades, para $\beta = 30^\circ$, num instante de tempo, $t = 24$ s, onde está ocorrendo à descompressão no interior da câmara CAO, ou seja, está incidindo a cava da onda na estrutura do dispositivo. Verifica-se, na Fig. 8a, que neste caso o escoamento de ar na chaminé da câmara CAO esta desenvolvido, com uma velocidade vertical constante máxima de aproximadamente $-3,91$ m/s. Outro fato a destacar, considerando a Fig. 8a, é que não ocorrem regiões de recirculação de ar na região de entrada da chaminé da câmara CAO, isso evita perdas ao escoamento.

Levando em conta a Fig. 8b, tem-se o comportamento do campo de velocidades, para $\beta = 30^\circ$, num instante de tempo, $t = 26$ s, onde está ocorrendo à compressão no interior da câmara CAO, ou seja, está incidindo a crista da onda na estrutura do dispositivo. Nesta situação

também verifica-se um escoamento desenvolvido na chaminé da câmara CAO, com uma velocidade vertical constante máxima de aproximadamente 3,44 m/s. Isso corrobora os resultados apresentados na Fig. 7a.

A geometria da câmara CAO na forma trapezoidal apresenta-se como uma opção interessante, uma vez que este tipo de geometria propicia um escoamento de ar sem regiões de recirculações de ar, diferente de quando a câmara CAO é na forma retangular.

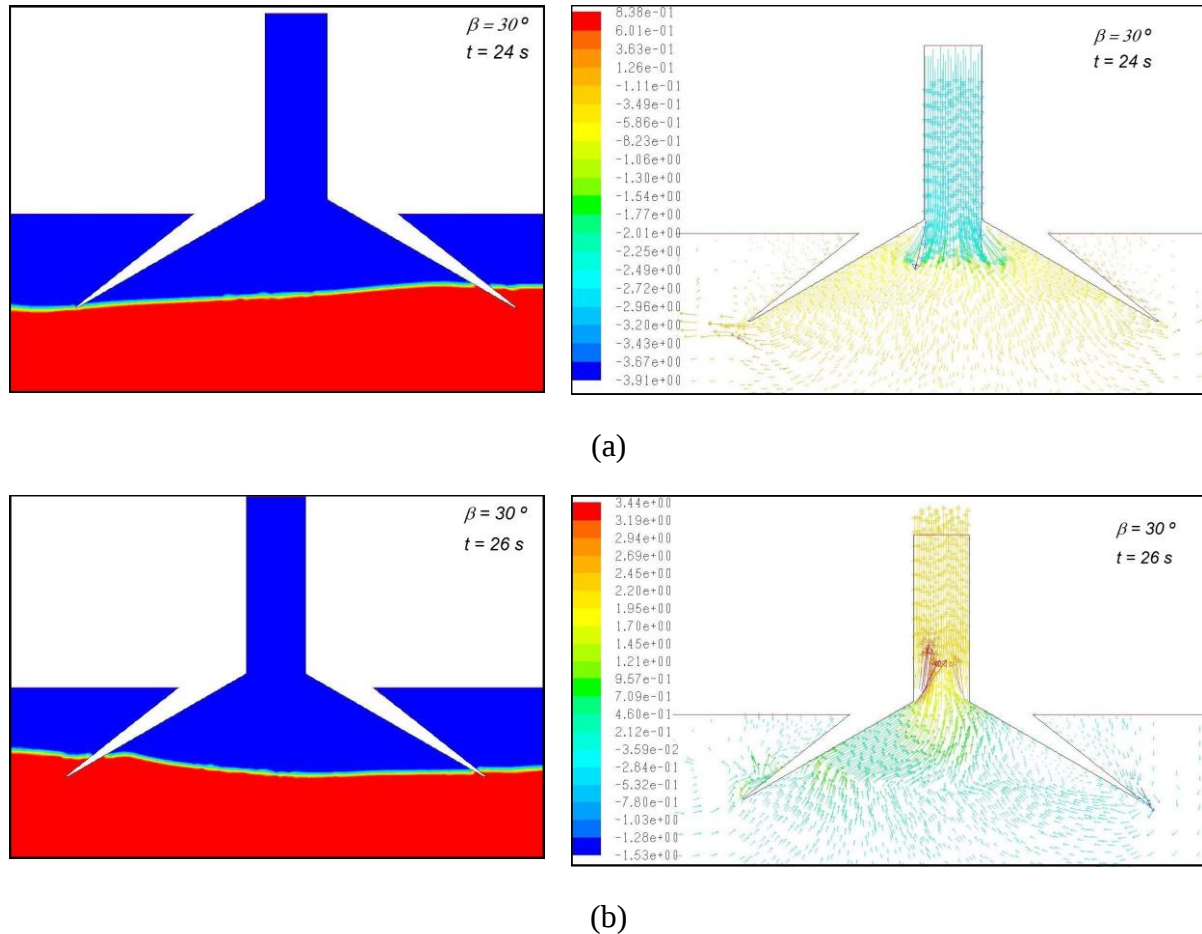


Figura 8. Comportamento do campo de velocidades para $\beta = 30^\circ$ na (a) decompressão ($t = 24$ s) e na (b) compressão ($t = 26$ s).

Na Fig. 9a é possível observar o comportamento do campo de velocidades, para $\beta = 80^\circ$, num instante de tempo, $t = 24$ s, onde está ocorrendo à decompressão no interior da câmara CAO, ou seja, está incidindo a cava da onda na estrutura do dispositivo. Diferente do caso em que $\beta = 30^\circ$ o escoamento não está plenamente desenvolvido na região da chaminé da câmara CAO. E além do mais, a velocidade vertical constante máxima de aproximadamente 1,54 m/s. Considerando a Fig. 9b, tem-se o comportamento do campo de velocidades, para $\beta = 80^\circ$, num instante de tempo, $t = 26$ s, onde está ocorrendo à compressão no interior da câmara CAO, ou seja, está incidindo a crista da onda na estrutura do dispositivo. Nesta situação também verifica-se um escoamento que não esta plenamente desenvolvido na chaminé da câmara CAO, com uma velocidade vertical constante máxima de aproximadamente 2,50 m/s.

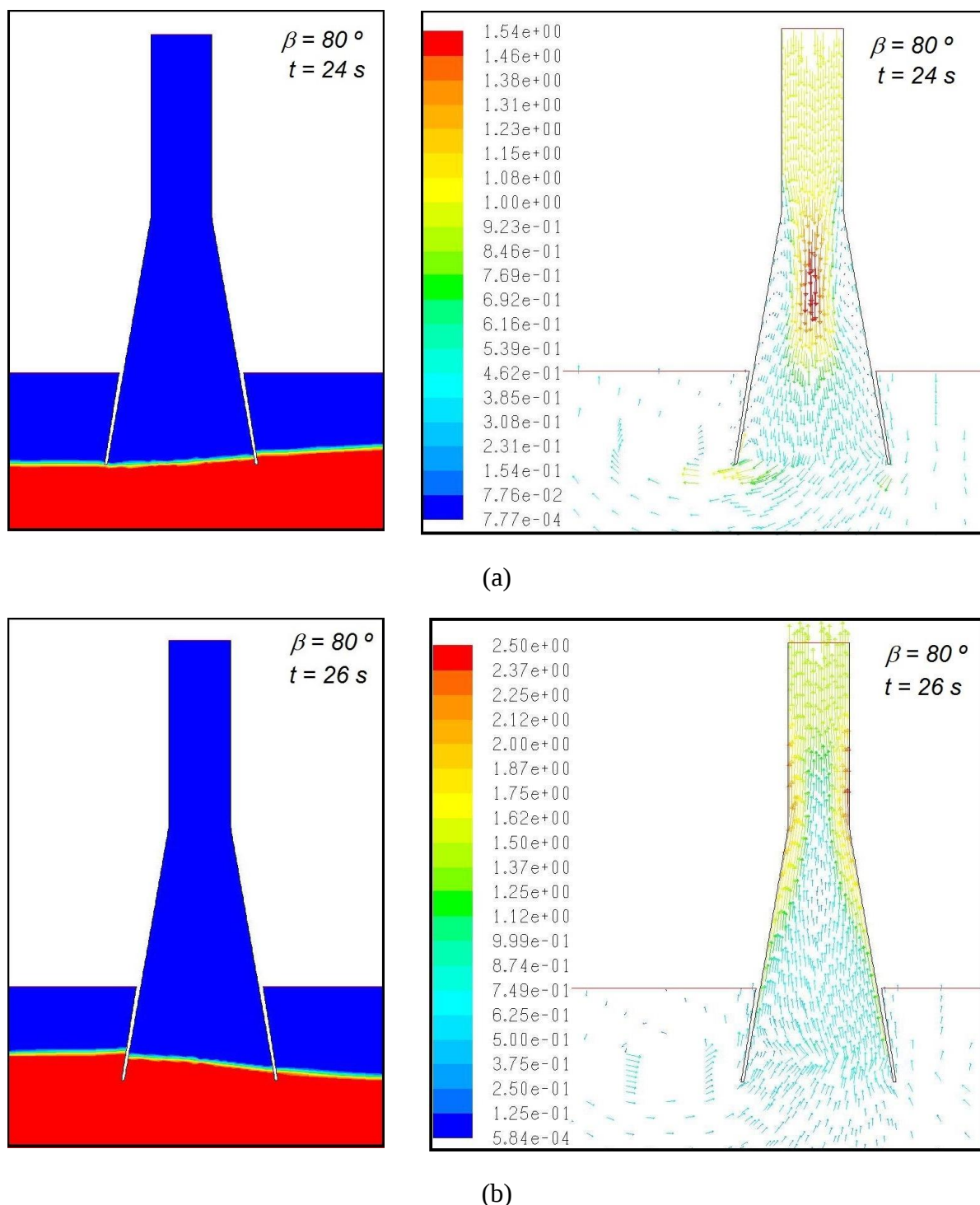


Figura 9. Comportamento do campo de velocidades para $\beta = 80^\circ$ na (a) decompressão ($t = 24$ s) e na (b) compressão ($t = 26$ s).

6 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), cujo formato da câmara CAO é um trapézio.

Para tanto, o método *Constructal Design* foi usado para definir as diversas variações das geometrias, permitindo definir qual arranjo geométrico (na forma trapezoidal) que possibilita um melhor desempenho do sistema CAO. Assim, o principal objetivo foi a obtenção de uma recomendação teórica sobre os valores do grau de liberdade β (ângulo formado pela parede frontal do dispositivo CAO com a superfície livre - ângulo da base do trapézio) que permitem obter valores de potência hidrodinâmica mais elevados para um dispositivo CAO, quando sujeito a incidência de ondas com período de 5 s e comprimento de onda incidente igual a 37.6 m.

O valor ótimo de β , isto é, o valor de β que gera o valor máximo RMS para a potência hidropneumática para o caso de uma câmara CAO (considerando a restrição elíptica) é obtido quando $\beta_o = 30^\circ$ o equivalente a $(H_1/L)_o = 0.24$.

Durante o processo de otimização ficou evidente que uma simples redistribuição geométrica faz com que o dispositivo CAO tenha um desempenho melhor, mostrando a aplicabilidade do método *Constructal Design* 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 com a câmara CAO no formato trapezoidal as recirculações de ar tendem a não ocorrer, propiciando que o escoamento do ar pela estrutura não sofra perdas.

REFERENCIAS

Aneel, 2008. Atlas de Energia Elétrica no Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica. 3ª edição, Brasília.

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.

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.

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

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.

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., Nascimento, C. D., Bonafini, B. L., Santos. E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2012. Two-dimensional geometric optimization of an oscillating water column converter in laboratory scale. *Engenharia Térmica*, Vol. 11, p. 30-36.

Gomes, M. N., Santos, E. D. Dos, Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2012a, 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., Salvador, A. J., Santos, A. L. O., Cassel, L. F., Santos. E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2014, Simulação Numérica e Método Constructal Design aplicados à otimização geométrica de dois graus de liberdade de um dispositivo coluna de água oscilante considerando o efeito da perda de carga da turbina. In: *Proceedings XXXV Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2014)*, Fortaleza.

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.

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

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.

Lopes, N., Sant'ana, F. S. P., Gomes, M. N., Souza, J. A., Teixeira, P. R. F., Santos, E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2012. Constructal design optimization of the geometry of an

oscillating water column wave energy converter (OWC-WEC). In *Proceedings Constructal law conference*, UFRGS, Porto Alegre.

Machado, B.N., Zanella, M. M., Gomes, M. N., Teixeira, P. R. F., Santos, E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2012. Constructal design of an overtopping wave energy converter. In *Proceedings constructal law conference*, UFRGS, Porto Alegre.

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.

Rocha, L. A. O., Lorent, S., Bejan, A., 2013. *Constructal law and the unifying the principle of design*. 1 ed. ,springer-verlag.

SANTOS, E. D., Machado, B. N., Zanella, M. M., Gomes, M. N., Souza, J. A., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2014, “Numerical Study of the Effect of the Relative Depth on the Overtopping Wave Energy Converters According to Constructal Design”, *Defect and Diffusion Forum*, vol. 348, pp. 232-244.

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.

TWIDELL, J., AND WEIR, T., 2006, *Renewable Energy Resources*, Taylor & Francis, London.

Zabihian, F. and Fung, A. S., 2011. Review of marine renewable energies: case study of Iran. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 15: 2461~2474.

Versteeg, H. K.; Malalasekera, W., 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method*. Pearson, England.

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.