



ANÁLISE NUMÉRICA COM CONSTRUCTAL DESIGN DA FORMA GEOMÉTRICA NA REGIÃO DE TRANSIÇÃO ENTRE A CÂMARA HIDROPNEUMÁTICA E A CHAMINÉ DE UM DISPOSITIVO DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

Yuri Theodoro Barbosa de Lima

Luiz Alberto Oliveira Rocha

yuri_vo@hotmail.com

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.

Cândila Beatriz Plamer

candilabeatriz@hotmail.com

Universidade 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.

Mateus das Neves Gomes

mateus.gomes@ifpr.edu.br

Instituto Federal do Paraná, Campus Paranaguá.

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

Resumo. A conversão da energia das ondas dos oceanos em energia elétrica é uma alternativa para a escassez dos combustíveis fósseis. Uma das possibilidades de transformação é através de dispositivos cujo princípio de funcionamento é o de Coluna de Água Oscilante (CAO). Neste trabalho o objetivo é através da modelagem computacional e do emprego de Constructal Design maximizar a potência hidropneumática. São consideradas diferentes formas geométricas na região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO: trapezoidal e semicircular. As restrições são: Área de entrada da câmara hidropneumática (A_E) e a Área de entrada da câmara hidropneumática somada à área da chaminé do dispositivo CAO (A_4), que são mantidas constantes. Os graus de liberdade analisados são: o ângulo (α) de inclinação da parede da transição trapezoidal, raio (r) e H_2/l , (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO) para o caso semicircular. 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. Os resultados obtidos indicam que quando $\alpha = 70^\circ$ para a transição trapezoidal e $r = 7,5361$ m e $H_2/l = 6$ para a transição semicircular, obtém-se a maximização da potência hidropneumática.

Keywords: Constructal Design, Coluna de Água Oscilante (CAO), Otimização Geométrica, Região de Transição.

1 INTRODUÇÃO

Uma vez que o consumo de energia tem aumentado consideravelmente ao longo das últimas décadas, associado ao fato de que os métodos tradicionais de geração de energia (especialmente os ligados a queima de combustíveis fósseis) estarem causando impactos ambientais, a busca por novas fontes de energia tem sido intensificada (Clément et al., 2002).

O aumento da população mundial, o crescimento do consumo de energia, a maior conscientização em relação aos recursos ambientais e a diminuição dos combustíveis fósseis, propicia a busca por fontes alternativas de energia. Atualmente, um dos grandes desafios é suprir a demanda energética mundial, neste sentido existem muitas discussões sobre geração e consumo de energia elétrica. 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).

Neste sentido, muitos países estão investindo em pesquisa e exploração de novas formas de energia, em especial as chamadas fontes renováveis de energia. Algumas possibilidades são: energia solar, energia eólica e energia dos oceanos. E uma dessas fontes de energia que tem merecido destaque é a transformação da energia contida nos oceanos em energia elétrica. A energia contida nos oceanos pode ter origens diferentes, o que gera diferentes classificações. As mais relevantes são, sem dúvida, a energia das marés (fruto da interação dos campos gravitacionais 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, finalmente, a energia das ondas (que resulta do efeito do vento na superfície do oceano). Esta última forma de energia pode ser considerada uma forma concentrada da energia solar, pois é esta que, pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, é responsável pelos ventos. Uma vez criadas, as 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. Esta diminuição pode ser atenuada por fenômenos naturais. 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 (Cruz e Sarmento, 2004).

Para realizar a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica, existem diversas tecnologias que recebem algumas classificações: *onshore* (dispositivo integrado a costa, com facilidade de acesso), *near-shore* (dispositivos instalados em locais com profundidade entre 8 e 20 m) e *offshore* (dispositivos instalados em locais com profundidade superior a 25 m). Outra forma de classificar os dispositivos conversores de energia das ondas do mar diz respeito ao seu princípio físico de funcionamento. Têm-se três principais grupos: Coluna de Água Oscilante (CAO); Corpos flutuantes, podendo ser de absorção pontual ou progressivos e Galgamento (Cruz e Sarmento, 2004).

Neste trabalho é abordado o princípio de funcionamento de um dispositivo do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO). Através da modelagem computacional e do emprego do *Constructal Design* o objetivo é maximizar a potência hidropneumática. Para isso são consideradas diferentes formas geométricas na região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO: forma trapezoidal e forma semicircular. Desta maneira é possível analisar qual a influência que a região de transição possui sobre o escoamento do ar pelo interior do dispositivo CAO.

Considerando uma geometria bidimensional as restrições para o problema são: Área de entrada da câmara hidropneumática (A_E) e a Área da câmara hidropneumática somada à área da chaminé (A_4), que são mantidas constantes. Os graus de liberdade analisados são o ângulo de inclinação (α) da parede da transição trapezoidal; e o raio (r) e H_2/L , (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO) para o caso semicircular. Em ambas as situações 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) são mantidos fixos.

O método *Constructal Design* é baseado na Teoria *Constructal* desenvolvida por Adrian Bejan (Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012). A teoria *Constructal* explica deterministicamente como são geradas as formas de fluxo da natureza (bacias hidrográficas, pulmões, circulação atmosférica, forma de animais, tecidos vasculares, etc.) com base em um princípio evolutivo de acesso, de forma fácil, ao fluxo no tempo. Esse princípio é a lei *Constructal*: para um sistema de fluxo persistir no tempo (sobreviver), ele deve evoluir de tal forma que ele fornece um acesso mais fácil para as correntes que fluem através dele (Bejan e Lorente, 2008). O *Constructal Design* tem sido aplicado no estudo de diversos problemas de engenharia. Um destes é a conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica (Gomes et al., 2009b; Gomes et al., 2012b; Gomes et al., 2013; Gomes, 2014).

E, para a modelagem computacional do princípio de funcionamento do conversor CAO, o domínio computacional (dispositivo CAO acoplado a um tanque de ondas) é discretizado no software GAMBIT®, enquanto as simulações numéricas foram desenvolvidas utilizando-se um código de dinâmica dos fluidos, FLUENT®, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF) (Fluent, 2009; Maliska, 2004). O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é aplicado no tratamento da interação água-ar (Gomes et al., 2012; Liu et al., 2008a; Ramalhais, 2011).

2 DISPOSITIVO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

2.1 Princípio de Funcionamento

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 hidropneumática. 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 hidropneumática. 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).

Os dispositivos do tipo CAO, são considerados os mais avançados em quantidade e duração de protótipos instalados. A Fig. 1a apresenta o dispositivo CAO com região de transição trapezoidal, enquanto na Fig. 1b é possível observar um dispositivo CAO com transição semicircular.

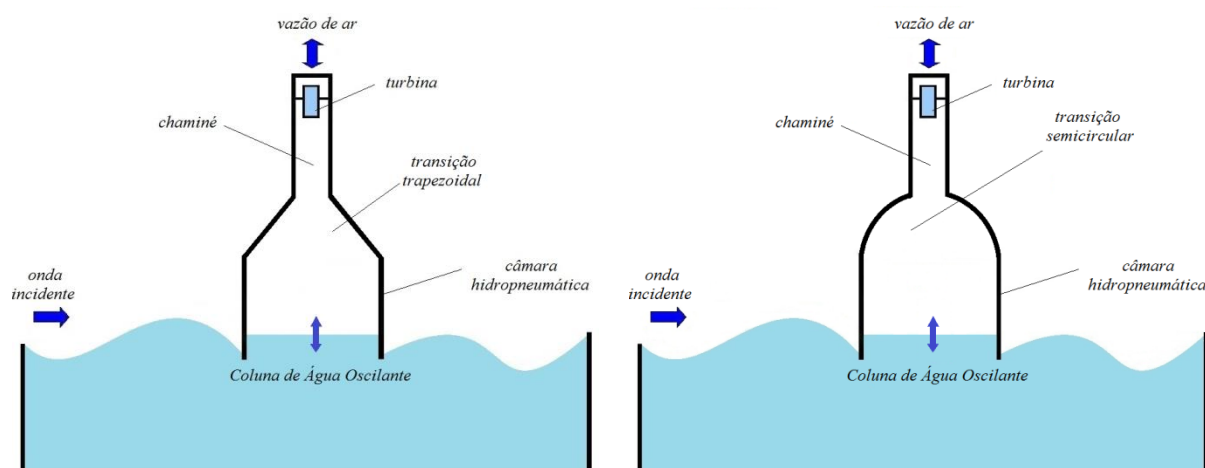


Figura 1. Representação do princípio de funcionamento do dispositivo Coluna de Água Oscilante com: (a) Região de transição trapezoidal (b) Região de transição semicircular.

2.2 Domínio Computacional

Para representar o problema numa escala adequada no domínio computacional é necessário o conhecimento de algumas características do clima de ondas, como: período (T) e altura (H) para a onda gerada, com uma profundidade ou nível de água (h), assim o comprimento (C_T) e a altura (H_T) do tanque de ondas podem ser definidas utilizando estes parâmetros citados (Gomes et al., 2012b). 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 seja, 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. Na representação esquemática da Fig. 2 é possível observar o domínio computacional, com suas variáveis, para o caso em que a transição é na forma trapezoidal. Enquanto que na Fig. 3 é apresentado o domínio computacional quando a transição semicircular é empregada.

Com relação à altura do tanque é preciso considerar a profundidade mais a altura da onda. Assim, é possível definir que a altura mínima do tanque seja dada pela profundidade mais duas vezes a altura da onda. A onda regular e em escala real considerada 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. É importante destacar que a dimensão H_3 , considerada um grau de liberdade, esta relacionada ao quanto o dispositivo CAO está submerso em relação à superfície livre e neste estudo foi mantida fixa e igual a $H_3 = 9,5$ m.

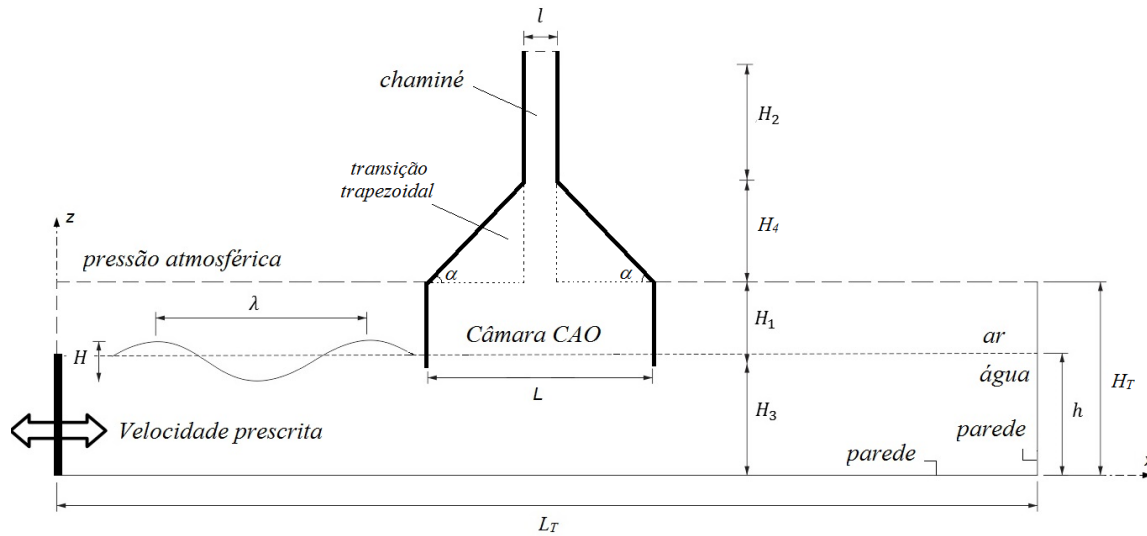


Figura 2. Representação esquemática do domínio computacional com transição trapezoidal.

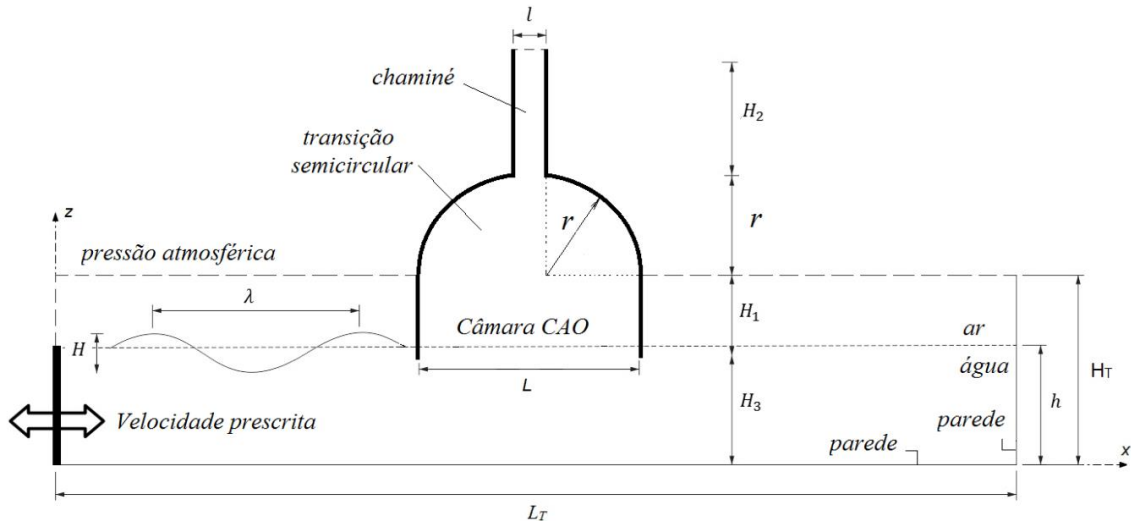


Figura 3. Representação esquemática do domínio computacional com transição semicircular.

2.3 Condições de Contorno

Como é possível observar na Fig. 2 e na Fig. 3, que o gerador de ondas numérico é posicionado no lado esquerdo do tanque de ondas. Para a geração de ondas regulares, é

empregada a Metodologia Função, definida em Gomes et al. (2009). Esta metodologia consiste em aplicar as componentes horizontal (u) e vertical (v) da velocidade da onda como condição de contorno (velocidade 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 região de entrada são dadas por (McCormick, 1976; Dean e Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005):

$$u = \frac{H}{2} gk \frac{\cosh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2} \right)^2 \omega k \frac{\cosh 2k(k + z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (1)$$

$$v = \frac{H}{2} gk \frac{\sinh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2} \right)^2 \omega k \frac{\sinh 2k(k + z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (2)$$

onde H é a altura da onda incidente (m); g é a aceleração da gravidade (m/s^2); k é o número de ondas dado por $k = 2\pi/\lambda$ (m^{-1}), h é a profundidade (m), T é o período de onda (s), ω é a frequência dada por $\omega = 2\pi/T$ (rad/s), x é a coordenada que representa a direção principal (m), t é o tempo (s) e z é a coordenada normal (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 na Fig. 2 e Fig. 3). 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.

3 CONSTRUCTAL DESIGN

O *Constructal Design* é um conceito muito amplo e o seu precedente, a teoria *Constructal*, abrange uma gama de processos físicos, como pode ser visto em (Bejan e Zane, 2012). Para aplicar o *Constructal Design* para a otimização geométrica de um sistema físico é necessário uma função objetivo (uma quantidade que vai ser otimizada), graus de liberdade (parâmetros geométricos que podem variar durante o processo de otimização) e limitações geométricas do problema ou restrições globais (parâmetros que são mantidos constantes durante o processo de otimização) (Bejan e Lorente, 2008).

No presente trabalho a função objetivo é maximizar a potência hidropneumática do conversor CAO, considerando diferentes formas geométricas na região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé. As restrições para o problema, com transição trapezoidal e transição semicircular, são: Área de entrada da câmara hidropneumática (A_E) e a Área da câmara hidropneumática somada à área da chaminé (A_4), estas são mantidas constantes, e podem ser calculadas através das seguintes relações, respectivamente:

$$A_E = H_1 L \quad (3)$$

$$A_4 = H_1 L + H_2 l \quad (4)$$

Como critério para a definição da restrição da área de entrada da câmara do dispositivo CAO (A_E), 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 da câmara hidropneumática somada à área da chaminé (A_4), é definido que A_E representa 70 % de A_4 , ou seja: $A_4 = 1,43 A_E$. Neste estudo tem-se que $A_E = 37,6 \text{ m}^2$ e $A_4 = 53,76 \text{ m}^2$.

Para a transição na forma trapezoidal (vide Fig. 2) o grau de liberdade analisado é o ângulo de inclinação (α) da parede da transição trapezoidal, entre a câmara hidropneumática e a chaminé. No presente estudo o grau de liberdade H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO) é mantido fixo e igual a $H_1/L = 0,1346$, conforme indicado em Gomes (2014). A relação H_2/l , (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO) e a medida H_3 (profundidade de submersão do dispositivo CAO), também consideradas graus de liberdade, são fixas neste estudo, onde $H_2/l = 3,0$ e $H_3 = 9,50 \text{ m}$.

Ao variar o ângulo de inclinação (α) é possível dimensionar a geometria do dispositivo CAO através da seguinte relação:

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{H_4}{l_1} \quad (5)$$

respeitando a condição que:

$$L = 2l_1 + l \quad (6)$$

sendo os comprimentos L e l calculados, respectivamente, por:

$$L = \left[\frac{A_E}{(H_1/L)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$l = \left[\frac{A_4 - A_E}{(H_2/l)} \right]^{1/2} \quad (8)$$

onde as alturas H_1 e H_2 são calculadas, respectivamente, por:

$$H_1 = L \left(\frac{H_1}{L} \right) \quad (9)$$

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

Para o estudo da transição semicircular os graus de liberdade considerados são raio (r) e H_2/l (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO). Assim, como no caso da região trapezoidal, o grau de liberdade H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO) é mantido fixo e $H_1/L = 0,1346$, conforme indicado em Gomes (2014).

Com a variação do grau de liberdade H_2/l , no caso com uma transição semicircular, é possível definir o diâmetro (l) e a altura (H_2) da chaminé de saída da câmara CAO, através da Eq. (8) e da Eq. (10), respectivamente. Assim o raio (r) da região de transição é também variado, e calculado por:

$$r = \left(\frac{L-l}{2} \right) \quad (11)$$

onde L é calculado através da Eq. (7) e H_l pela Eq. (9).

A função objetivo que foi considerada neste estudo é a média *RMS* da potência hidropneumática.

4 MODELO MATEMÁTICO E NUMÉRICO

4.1 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:

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

a equação da fração volumétrica:

$$\frac{\partial (\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \quad (13)$$

E as equações de quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (14)$$

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 ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$), $\vec{\tau}$ 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):

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

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

4.2 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, 2009). 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); Versteeg e Malalasekera, 2007).

Todas as soluções foram realizadas usando um computador Intel Core i7 com 8.0 Gb de RAM, utilizando processamento em série. 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. O modelo viscoso adotado foi o *k-ε* a duas equações *Standard*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo VOF tem sido empregado para simulações numéricas de conversores de energia das ondas do mar. A validação desta metodologia pode ser encontrada na literatura como em (Horko, 2007), (Liu et al., 2008a), (Liu et al., 2008b), (Gomes et al., 2009), (Gomes, 2010), (Ramalhais, 2011), (Gomes et al., 2012a).

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 $H/2$, x é a posição espacial, t é a variação do tempo, k é o número de onda dado por $k = 2\pi/\lambda$ e ω é a frequência da onda dada por $\omega = 2\pi/T$.

Na Fig. 4, foram comparados os resultados numéricos com os obtidos pela Eq. (15) na posição $x = 22,5$ m. A verificação da solução numérica foi realizada no intervalo entre 20 s e 30 s onde a onda numérica está estável e ainda não há efeitos de reflexão. A diferença relativa entre as soluções numérica e analítica foi medida instantaneamente, e a média das diferenças foi 2,61%, onde o valor mínimo obtido foi 0,0019% e o valor máximo 5,86%. Estes resultados indicam a acurácia do modelo.

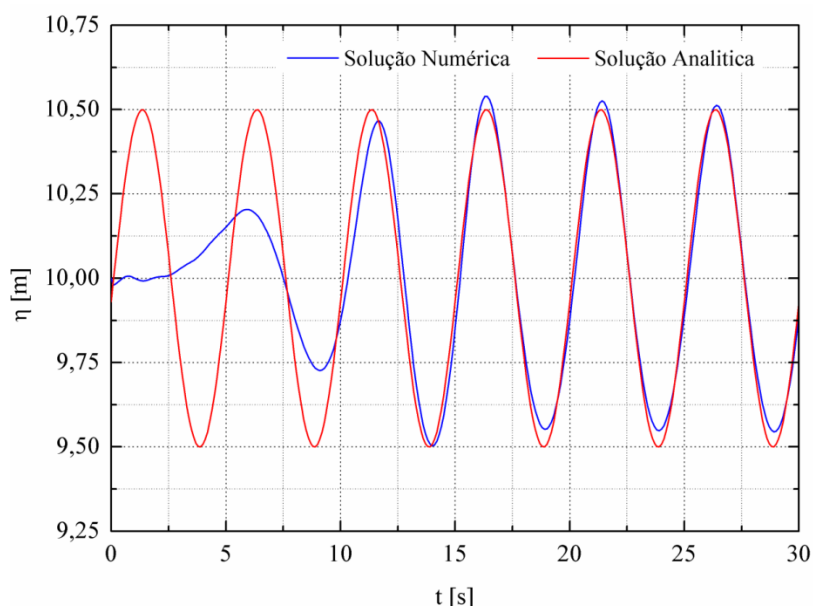


Figura 4. Elevação da superfície livre da água ao longo do tempo.

Para a geração da malha foi adotada uma estratégia que tem como objetivo construir 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. 5 e na Fig. 6, 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 à $H/20$) e com 250 volumes na direção horizontal (intervalo equivalente à $\lambda/50$). 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 e região F). Na Fig. 5 podem ser observados os detalhes da malha para o caso trapezoidal. Enquanto que na Fig. 6 são apresentados os detalhes da malha para o caso semicircular.

Neste trabalho foram avaliadas a vazão mássica (na saída da chaminé), a pressão (no interior da câmara), a eficiência e a potência hidropneumática. Os valores médios foram calculados empregando a média aritmética para problemas transientes *Root Mean Square* (RMS) (Marjani et al., 2006):

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

onde X representa a grandeza que se deseja calcular a média RMS.

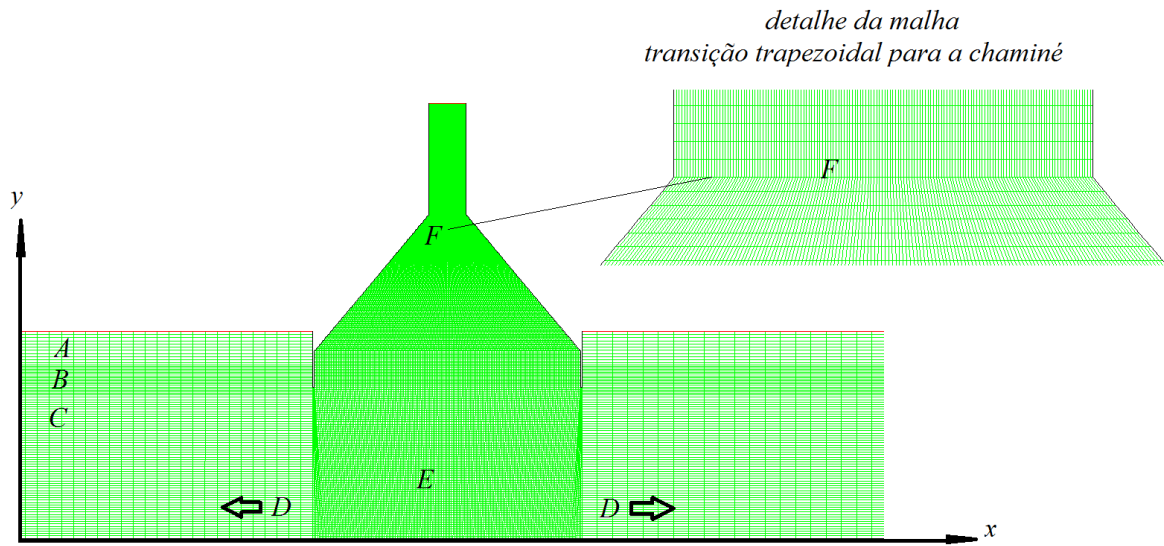


Figura 5. Discretização do domínio com a região de transição trapezoidal.

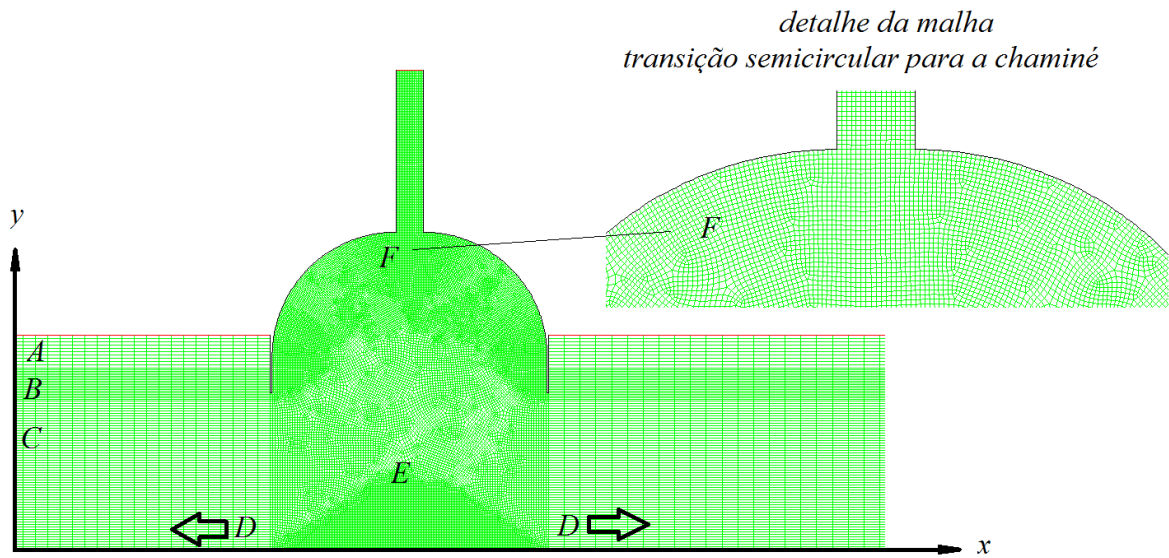


Figura 6. Discretização do domínio com a região de transição semicircular.

A potência hidropneumática é calculada por (Dizadji e Sajadian, 2011):

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

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

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

onde: A representa uma área em corte transversal da chaminé (m^2). Como o estudo realizado é bidimensional a terceira dimensão é considerada unitária.

A pressão estática é calculada através de uma média ponderada em uma determinada área, no caso deste estudo no centro da chaminé, através da seguinte expressão:

$$\frac{1}{A} \int \phi dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \phi_i |A_i| \quad (19)$$

onde: ϕ é um campo variável que neste caso é a pressão estática p_e (Pa), n é o número de volumes e A é a área da superfície que está sendo medida (m^2).

Assim, tem-se a seguinte relação para pressão total, a qual possibilita calcular a pressão estática.

$$p = p_e + p_d \quad (20)$$

onde: p_e é a pressão estática (Pa) e p_d é a pressão dinâmica (Pa) dada por:

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (21)$$

A vazão mássica é calculada através da seguinte expressão:

$$\int \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \sum_{i=1}^n \rho_i \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \quad (22)$$

onde: ρ é a massa específica do ar (kg/m^3), v a velocidade na direção y (m/s) e A área da superfície que é atravessada pelo fluxo de ar (m^2).

Conforme apresentado em (Zhang et al., 2012) é possível definir a eficiência hidrodinâmica de um dispositivo CAO como:

$$\varepsilon = \frac{E_{CAO}}{P_{INC} T_w} \quad (23)$$

onde: E_{CAO} é a energia absorvida pelo dispositivo CAO (J), calculada por:

$$E_{CAO} = \int_0^T p(t)q(t)dt \quad (24)$$

onde: T é o período da onda (s), $p(t)$ é a pressão instantânea do ar no interior da câmara CAO (Pa), e $q(t)$ é a vazão volumétrica (m^3/s), dada por:

$$q(t) = v(t)LL_1 \quad (25)$$

sendo $v(t)$ a velocidade instantânea vertical da superfície livre (m/s), L o comprimento da câmara CAO (m) e L_1 a largura do dispositivo CAO (m), que como foi citado anteriormente é considerada unitária.

A potência da onda incidente (W) ao dispositivo CAO é dada por:

$$P_{INC} = \frac{\rho g A^2 \omega}{4k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (26)$$

onde ρ é a massa específica da água (998.2 kg/m³), g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²), A amplitude da onda (m), ω a frequência da onda (s⁻¹), k o número de onda e h a profundidade de água (m). E, por fim, T_w é o período considerado para a análise da eficiência (s). A potência da onda incidente, calculada pela Eq. (26), é igual a 5692,65 W.

Ao todo foram analisadas onze configurações geométricas para o caso em que a região de transição é na forma trapezoidal. Na Tabela 1 é possível verificar as dimensões destas configurações. Todas as dimensões para o caso trapezoidal foram calculadas através das Eqs. (5-10). Ainda considerando a Tabela 1 é possível verificar que somente o ângulo α e a altura H_4 variam.

Para o caso em que a região de transição é no formato semicircular foram analisadas 5 configurações geométricas, conforme é possível verificar na Tabela 2. Todas as dimensões foram calculadas com as Eqs. (7-11).

Tabela 1. Variações geométricas da região de transição trapezoidal.

Casos	α [°]	H_4 [m]	L [m]	l [m]	l_1 [m]	H_1 [m]	H_2 [m]	A_E [m ²]
1	5	0,6296	16,7137	2,3215	7,1961	2,2497	6,9645	5.9920
2	10	1,2689	16,7137	2,3215	7,1961	2,2497	6,9645	12.0765
3	15	1,9282	16,7137	2,3215	7,1961	2,2497	6,9645	18.3516
4	20	2,6192	16,7137	2,3215	7,1961	2,2497	6,9645	24.9280
5	25	3,3556	16,7137	2,3215	7,1961	2,2497	6,9645	31.9370
6	30	4,1547	16,7137	2,3215	7,1961	2,2497	6,9645	39.5423
7	35	5,0387	16,7137	2,3215	7,1961	2,2497	6,9645	47.9567
8	40	6,0382	16,7137	2,3215	7,1961	2,2497	6,9645	57.4693
9	45	7,1961	16,7137	2,3215	7,1961	2,2497	6,9645	68.4892
10	50	8,5760	16,7137	2,3215	7,1961	2,2497	6,9645	81.6223
11	70	19,771	16,7137	2,3215	7,1961	2,2497	6,9645	188.1726

Tabela 2. Variações geométricas da região de transição semicircular.

Casos	r [m]	(H_2/l) [m]	L [m]	l [m]	H_1 [m]	H_2 [m]	A_E [m ²]
1	7,0312	2,3000	16,7137	2,6513	2,2497	6,0981	96.29774269
2	7,0853	2,5000	16,7137	2,5431	2,2497	6,3577	96.87450789
3	7,1961	3,0000	16,7137	2,3215	2,2497	6,9645	98.04708805
4	7,3516	4,0000	16,7137	2,0105	2,2497	8,0419	99.67524354
5	7,5361	6,0000	16,7137	1,6415	2,2497	9,8493	101.57962

Na Tabela 3 e na Fig. 7a são apresentados os resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência para os casos em que a região de transição tem a forma trapezoidal. Enquanto que na Tabela 4 e na Fig. 7b são apresentados os resultados para o caso em que a região de transição é semicircular.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 3 e na Fig. 7a é possível verificar que a variação do ângulo α conduz a um aumento da média RMS da vazão mássica e da pressão, em consequência disso tanto a potência hidropneumática quanto a eficiência também aumentam.

Tabela 3. Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência para o caso em que a região de transição é trapezoidal.

Casos	$\dot{m}$ [kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]	ε [%]
1	14,193275	26,158314	96,431686	32,834288
2	14,202474	26,143496	96,565143	32,885964
3	14,209265	26,122434	96,608927	32,879847
4	14,206930	26,085873	96,539547	32,845493
5	14,207583	26,076180	96,662467	32,804565
6	14,226539	26,101097	96,853949	32,974679
7	14,217116	26,073222	96,804517	32,903937
8	14,216921	26,055142	96,761386	32,874508
9	15,391749	28,644552	119,76681	40,933337
10	15,399672	28,453848	119,41512	40,814085
11	15,396895	29,209954	121,14987	41,462742

Tabela 4. Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência para o caso em que a região de transição é semicircular.

Casos	$\dot{m}$ [kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]	ε [%]
1	14,196661	20,308894	86,905835	29,128642
2	14,192508	21,727643	88,826235	29,829252
3	14,193499	26,118550	96,360578	32,857034
4	14,186730	34,851655	114,53707	39,364288
5	14,162828	52,870332	158,86682	54,967741

Constata-se através da Tabela 3 e da Fig. 7a que para ângulos $\alpha < 45^\circ$ as variações de vazão mássica e pressão são pequenas e com valores similares para os ângulos testados. Já para um intervalo de $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ a influência da variação da geometria da câmara hidropneumática causa alterações significativas nos parâmetros avaliados. Considerando a Tabela 1 observa-se que à medida que a inclinação da região trapezoidal aumenta a área da transição também aumenta. Portanto conclui-se, neste caso, que pequenos valores de área na região de transição é propício para o bloqueio da incidência da onda no dispositivo. Entretanto, como é possível ver na Fig. 8a, em que é apresentada a topologia do campo de velocidades na direção y , que quando se tem a inclinação $\alpha = 70^\circ$ não existem regiões de recirculação de ar no interior do dispositivo, tanto na fase de compressão quanto na de descompressão. Conforme é possível verificar em Gomes (2014) quando a transição da câmara CAO para a chaminé é no formato retangular ($\alpha = 90^\circ$) inevitavelmente ocorrem regiões de recirculação.

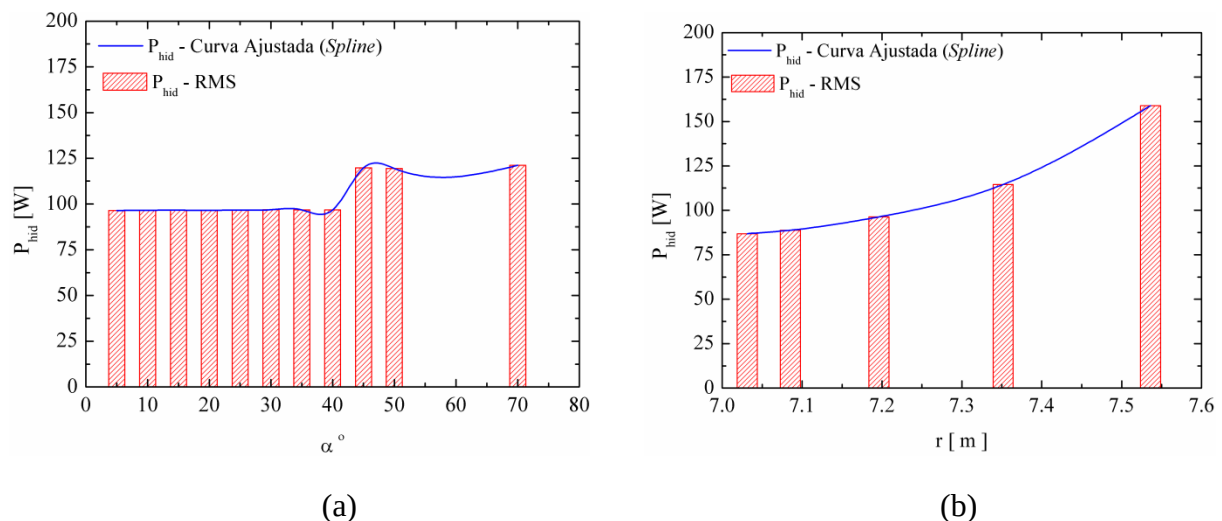


Figura 7. Média RMS da potência hidropneumática para: (a) diferentes ângulos na região de transição trapezoidal, (b) diferentes raios na região de transição semicircular.

Considerando os resultados da Tabela 4 e da Figura 7b, para o caso da transição semicircular, observa-se que pequenas variações na dimensão do raio da transição (r) é o suficiente para causar um aumento de cerca de 20% na eficiência da configuração geométrica proposta, evidenciando a pertinência desta proposta de estudo.

Na Fig. 8b, é possível observar a topologia do campo de velocidades, na fase de descompressão e compressão, para o caso 5 da Tabela 2. Observa-se um escoamento de ar desenvolvido e sem regiões de recirculação. Assim como no caso da transição trapezoidal quando a área da transição é maior o aproveitamento tende a ser maior.

De uma maneira geral é possível observar que estas variações geométricas na região de transição são pertinentes, uma vez que conduzem a melhores aproveitamentos da potência da onda incidente. No presente estudo a área da região de transição foi variável, entretanto dependendo das restrições das áreas da câmara CAO e da chaminé. Sendo assim, a técnica *Constructal Design* se apresenta como uma ferramenta de extrema relevância no estudo de geometrias otimizadas para os conversores do tipo CAO.

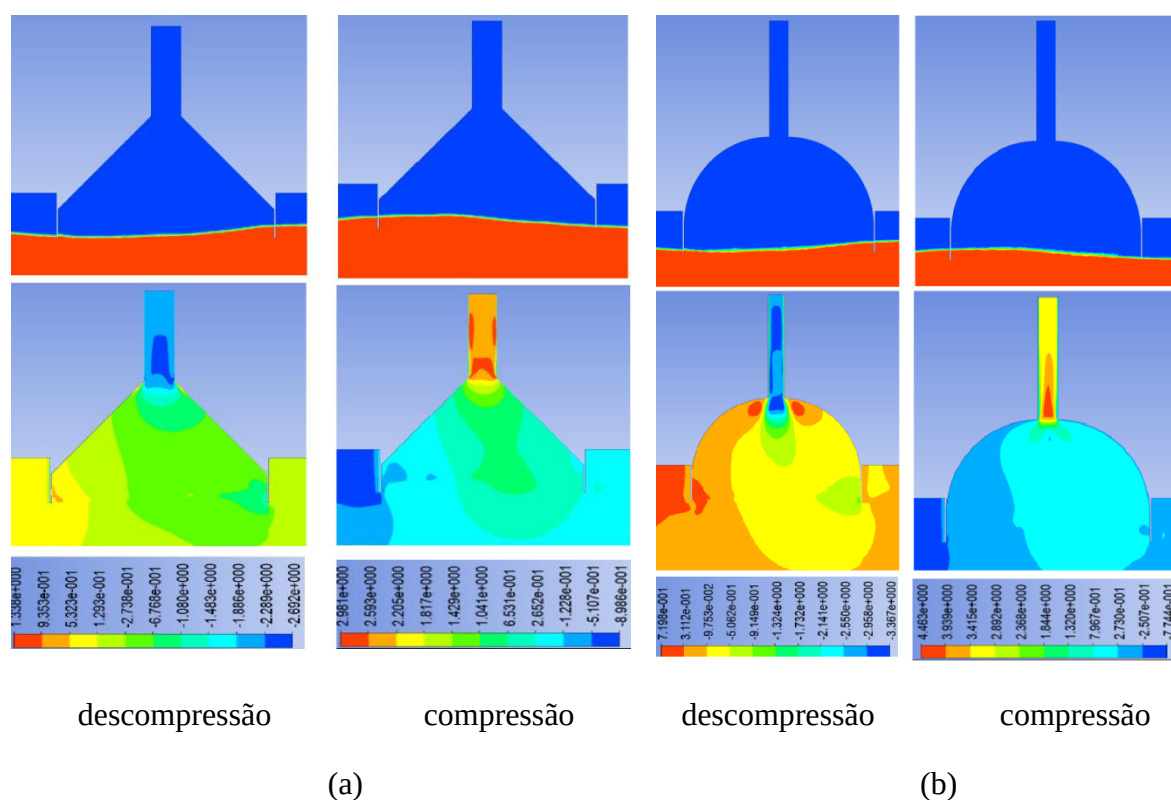


Figura 8. Topologias da velocidade na direção y (m/s) para: (a) diferentes ângulos na região de transição trapezoidal, (b) diferentes raios na região de transição semicircular.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico com o objetivo de analisar dois tipos de forma geométrica na região de transição entre a câmara CAO e a chaminé de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de água

oscilante (CAO). Foram testadas regiões de transição na forma trapezoidal e semicircular. Para tanto, o método *Constructal Design* foi usado para definir as diversas variações das geometrias, permitindo definir qual arranjo geométrico que possibilita um melhor desempenho do sistema CAO, possibilitando ainda analisar a influência destes tipos de região de transição sobre o escoamento de ar pelo dispositivo CAO. Assim, o principal objetivo foi a obtenção de uma recomendação teórica sobre os valores do grau de liberdade α (ângulo formado pela parede da câmara CAO e a parede da chaminé da câmara CAO) e de r (raio da região de transição semicircular) que permitem obter valores de potência hidrodinâmica mais elevados para um dispositivo CAO, quando sujeito a incidência de ondas regulares e em escala real com período de 5 s e comprimento de onda incidente igual a 37.6 m.

O aumento do ângulo α apresentou valores mais elevados para vazão mássica e pressão, aumentando consequentemente a potência hidropneumática e a eficiência. Quando $\alpha = 10^\circ$ a eficiência é igual à $\varepsilon = 32,83\%$ ao passo que quando $\alpha = 70^\circ$ a eficiência é igual à $\varepsilon = 41,46\%$. Um comportamento similar foi verificado para o caso da transição semicircular onde o aumento do raio r também ocasionou num aumento da vazão mássica e da pressão. Um aumento de 0,50 m no raio propiciou um aumento de cerca de 25 % na eficiência.

A aplicabilidade do método *Constructal Design* para a otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas foi evidenciada, uma vez que os resultados indicam um melhor desempenho do dispositivo. Num paralelo com a Teoria *Constructal* é possível avaliar a evolução da configuração geométrica que conduz para o melhor aproveitamento.

No presente estudo a área da região de transição foi variável, entretanto dependendo das restrições das áreas da câmara CAO e da chaminé. Sendo assim a técnica de *Constructal Design* se apresenta como uma ferramenta de extrema relevância no desenvolvimento deste tipo de análise. Para estudos futuros é interessante avaliar outros tipos de forma geométrica na região de transição bem como realizar uma análise comparativa considerando a área da região de transição fixa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), à Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná (IFPR) pelo apoio e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- Aneel, 2008, *Atlas de Energia Elétrica no Brasil*, 3ª ed., Agência Nacional de Energia Elétrica.
- Bejan, A., & Lorente, S., 2008, *Design with Constructal Theory*, Wiley.
- Bejan, A. & Zane, J., 2012, *Design in Nature*, Doubleday.
- Chakrabarti, S. K., 2005. *Handbook of offshore engineering*. vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 661 p.
- Cruz, J. M. B. P. & Sarmento, A. J. N. A., 2004, *Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais*, Instituto do Ambiente, Amadora.

- Clément, A. et al., 2002 Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 6, p. 405-431.
- Dean, R. G., Dalrymple, R. A., 1991, *Water wave mechanics for engineers and scientists*, vol. 2, World Scientific, Singapura, 353 p.
- Dizadji N., Sajadian S. E., 2011, *Modeling and optimization of the chamber of OWC system*, *Energy*, Vol. 36, pp. 2360 – 2366.
- Fluent Inc., 2009, *FLUENT 12.0 Theory Guide*.
- Gomes, M. das N., Olinto, C. R., Rocha, L. A. O., Souza, J. A. & Isoldi, L. A., 2009, *Computacional Modeling of a Regular Wave Tank*, *Engenharia Térmica*, Vol. 8, No.1, pp. 44-50.
- Gomes, M. das N., Olinto, C.R., Rocha, L. A. O, Souza, J.A. & Isoldi, L. A., 2009b, *Computational Modeling of the Air-Flow in an Oscillating Water Column System*, *20th International Congress of Mechanical Engineering*.
- 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 de Mestrado, PPGMC-FURG, Rio Grande, RS.
- Gomes, M. das N., Isoldi, L. A., Santos E. D. & Rocha, L. A. O., 2012a, Análise de Malhas para Geração Numérica de Ondas em Tanques, em: *VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. São Luiz, MA, pp. 1-10.
- Gomes, M. das N., Bonafini, B. L., Isoldi, L. A., Nascimento, C., D., Santos E. D., Rocha, L. A. O., 2012b, *Two-Dimensional Geometric Optimization of na Oscillating Water Column Converter in Laboratory Scale*, *Engenharia Térmica*, Vol. 11, No. 1-2, pp. 30-36.
- Gomes, M. das N., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2013, *Two-Dimensional Geometric Optimization of an Oscillating Water Colum Converter of Real Scale*, *22nd International Congress of Mechanical Engineering*.
- Gomes, M. das N., 2014, *Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante*, Tese de Doutorado, PROMEC-UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Hirth, C.T., & Nichols, B. D., 1981. *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries*. *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, No. 1, pp. 201-225.
- Horko, M., 2007, *CFD Optimization of an Oscillating Water Column Energy Converter*, Dissertação de Mestrado, Science and Engineering, School of Mechanical Engineering, University of Western, Australian.
- Liu, Z., Hyun B., & Hong, K., 2008a, *Application of Numerical Wave Tank to OWC Air Chamber for Wave Energy Conversion*, em: *International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vancouver, BC, Canada, pp. 350-356.
- Liu, Z., Hyun B., & Jin, J., 2008b, *Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC*, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 35-41.
- Maliska, C. R., 2004, *Tranferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*, LTC-Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, Brasil, 453 p.

Marjani, A. E., Castro, F., Bahaji, M., & Filali, B., 2006, *3D Unsteady Flow Simulation in na OWC Wave Converter Plant*, em: 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.

Patankar, S., V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, Estados Unidos, 196 p.

Ramalhais, R. dos S., 2011, Estudo Numérico de um Dispositivo de Conversão da Energia das Ondas do Tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

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.

Versteeg, H. K., Malalasekera, W., 2007, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, Malaysia: Pearson.

Zhang, Y., Zou, Q. P., Greaves, D., 2012, *Air-water two-phase flow modelling of hydrodynamic performance of an oscillating water column device*, *Renewable Energy*, v. 41, 99 159-170.