



XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA E GEOMÉTRICA DA REGIÃO DE TRANSIÇÃO TRAPEZOIDAL ENTRE A CÂMARA HIDROPNEUMÁTICA E A CHAMINÉ DE UM DISPOSITIVO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR EM ENERGIA ELÉTRICA 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 Sarmento Leite, 425, CEP 90.050-170, Porto Alegre, RS, 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.

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.

Resumo. *O presente trabalho contempla o estudo da modelagem computacional e do emprego do Design Construtal, para analisar diferentes configurações geométricas da região*

de transição trapezoidal entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo Coluna de Água Oscilante (CAO) e assim maximizar a potência hidropneumática. Considerando um domínio bidimensional, as restrições do problema são: área de entrada da câmara hidropneumática (A_E), área total da câmara CAO (A_T). Os graus de liberdade analisados são: o ângulo de inclinação da parede entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO (α) e a razão entre altura e comprimento da chaminé do dispositivo (H_2/l), no presente trabalho os graus de liberdade H_1/L (razão entre altura e comprimento da câmara hidropneumática) e H_3 (profundidade de submersão do dispositivo) são mantidos constantes. Para a solução numérica é empregado um código de dinâmica de fluidos computacional, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). O modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) é aplicado no tratamento da interação água-ar. O domínio computacional é representado por um tanque de ondas com o dispositivo CAO acoplado. Os resultados obtidos mostram que a máxima potência hidropneumática de 451,15 W é obtida para os graus de liberdade $H_2/l = 4$ e $\alpha = 5$, enquanto o caso com menor desempenho apresenta uma potência hidropneumática de 98,57 W para os graus de liberdade $H_2/l = 2,3$ e $\alpha = 45$. Este resultado mostra um ganho de 78,15 % em relação ao caso com menor desempenho de potência.

Palavras-chave: Design Construtal, Coluna de Água Oscilante (CAO), otimização geométrica, região de transição trapezoidal.

1 INTRODUÇÃO

Dos legados deixados pela Revolução Industrial, ocorrida entre o final do século XVIII e o início do século XIX, um dos principais, provavelmente, foi a profunda mudança no modo de vida do homem. As transformações ocorridas desde então vão muito além da substituição do esforço humano pela força das máquinas, elas permitem que uma sociedade rural e manufatureira venha a se tornar uma sociedade globalizada e altamente tecnológica (Krüger, 2003).

Com o decorrer dos anos, diversos estudos científicos passaram a alertar a respeito das consequências ao meio ambiente, relacionadas às emissões de gás carbônico (CO_2), decorrente do uso de combustíveis fósseis. Neste sentido, muitos países estão investindo em pesquisas e exploração de novas formas de energia. Algumas possibilidades são: energia solar, energia eólica e energia dos oceanos. E uma dessas fontes que tem merecido destaque é a transformação da energia contida nos oceanos em energia elétrica (Cruz e Sarmiento, 2004).

Na dinâmica evolução das energias renováveis a indústria de energia dos oceanos é apenas emergente. Apesar deste tipo de tecnologia ser relativamente nova e ainda não ser economicamente competitiva em comparação com fontes de energia mais maduras, como a energia eólica ou hidroelétrica, o interesse das instituições governamentais e da indústria tem sido crescente (Clement et al., 2002). 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 Sarmiento, 2004).

Para realizar a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica, existem diversas tecnologias que recebem algumas classificações: *onshore* (dispositivos integrados 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 progressiva e Galgamento (Cruz e Sarmiento, 2004).

No presente 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 *Design Construtal* o objetivo é maximizar a potência hidropneumática. Para isso se considera a forma geométrica trapezoidal da região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO. Assim é possível analisar qual a influencia 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_T), as quais são mantidas constantes. Os graus de liberdade para o problema são: ângulo de inclinação da parede entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO (α) e a razão entre altura e comprimento da chaminé do dispositivo (H_2/L), os graus de liberdade H_1/L (razão entre altura e comprimento da câmara hidropneumática) e H_3 (profundidade de submersão do dispositivo) são mantidos constantes e iguais a $H_1/L = 0.1346$ e $H_3 = 9.5$.

O método *Design Construtal* é baseado na Teoria Construtal desenvolvida por Adrian Bejan (Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012). A teoria Construtal explica deterministicamente como são geradas as formas de fluxo na 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 Construtal: para um sistema de fluxo persistir no tempo (sobreviver), ele deve evoluir de tal forma que ele forneça um acesso mais fácil para as correntes que fluem através dele (Bejan e Lorente, 2008). O *Design Construtal* associado ao método de busca exaustiva é aplicado neste trabalho. Existe uma gama de trabalhos os quais se utilizam do método *Design Construtal* para a otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, dentre eles destacam-se as pesquisas desenvolvidos por: Gomes et al., (2009b); Gomes et al., (2012b); Gomes et al., (2013); Gomes (2014); Lopes et al., (2011); Oliveira e al., (2012); Espinel et al., (2014a); Espinel et al., (2014b); Espinel (2014); Lima et al., (2015a) e Lima et al., (2015b).

Para 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 de 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 CONVERSOR DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE (CAO)

2.1 Princípio de Funcionamento

O equipamento de extração de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante provavelmente seja o mais estudado até o momento, tanto de forma teórica quanto experimental, é um dos poucos a chegar ao estado de instalação em escala real (Cruz e Sarmiento, 2004).

Os dispositivos do tipo Coluna de Água Oscilante são estruturas ocas parcialmente submersas, abertas para o mar abaixo da superfície livre da água como pode ser observado na Fig. 1. O processo de geração de eletricidade 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 se obter o aproveitamento do escoamento nos dois sentidos normalmente são utilizadas turbinas do tipo *Wells*, as quais apresentam a propriedade de manterem o mesmo sentido de rotação das suas pás, independente do sentido do escoamento. O conjunto turbina e gerador é o responsável pela geração de energia elétrica (Cruz e Sarmiento, 2004).

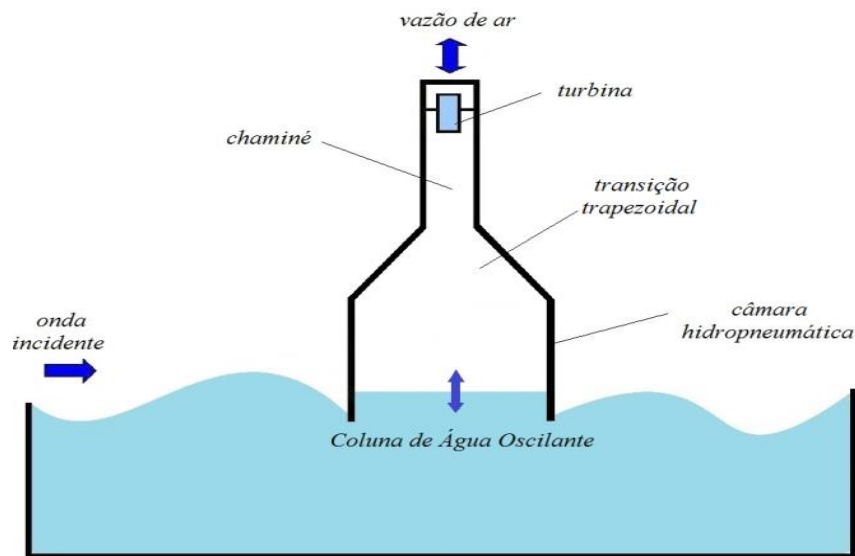


Figura 1. Representação do princípio de funcionamento do dispositivo Coluna de Água Oscilante (Lima et al., 2015a).

2.2 Domínio Computacional

Na modelagem computacional de um tanque de ondas com um dispositivo CAO acoplado alguns aspectos, como comprimento e a altura da onda a ser gerada, devem ser levados em conta. As dimensões dessas características são importantes para a definição das dimensões do tanque de ondas (Lima et al., 2005a). 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 profundidade ou nível de água (h), assim o comprimento (L_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 recomendado que o comprimento do tanque seja, aproximadamente, cinco vezes maior que o comprimento da onda. Assim garante-se a simulação numérica da onda sem efeito de reflexão por um tempo razoável de propagação. Na Fig. 2 é mostrada a representação esquemática do problema estudado, onde é possível observar o domínio computacional, com suas variáveis (Lima et al., 2015b).

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, $L_T = 188$ 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.

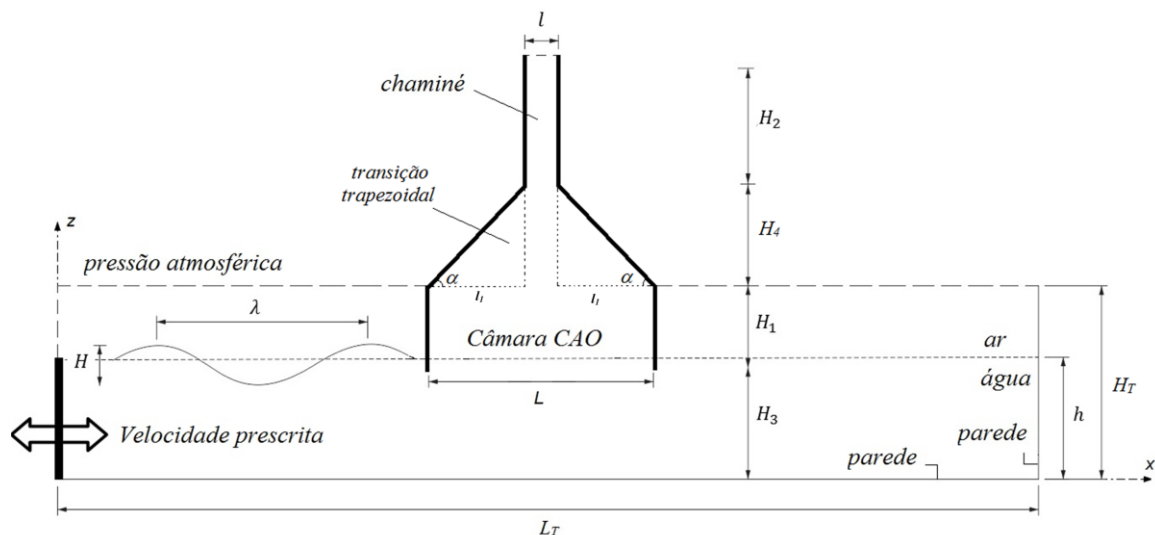


Figura 2. Representação esquemática do domínio computacional com transição trapezoidal (Lima et al., 2015a).

2.3 Condições de Contorno

No estudo realizado, a onda incidente no dispositivo conversor é gerada no lado esquerdo do tanque de ondas, local onde o gerador de ondas numérico é posicionado, como pode ser observado na Fig. 2. A condição de contorno empregada neste trabalho é baseada na Metodologia Função utilizada em Gomes et al., (2009). Esta metodologia, desenvolvida por Horko (2007), consiste em aplicar as componentes horizontal (u) e vertical (v) da velocidade das ondas como condição de contorno (velocidade prescrita) no modelo computacional através de uma função definida pelo usuário, UDF (*User Define Function*), no FLUENT[®]. A velocidade varia em função do espaço e do tempo com base na Teoria de Stokes de 2^a ordem.

Assim, as equações impostas na região de entrada são dadas por (McCormick, 1976; Dean & Dalrymple, 1991; Chakrabati, 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 do dispositivo CAO é aplicada uma condição de contorno de pressão atmosférica (vide superfície tracejada 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 $h = 10,0$ m.

3 DESIGN CONSTRUTAL

O Design Construtal é um conceito muito amplo e o seu precedente, a teoria Construtal, abrange uma gama de processos físicos, como pode ser visto em (Bejan e Zane, 2012). Para aplicar o Design Construtal 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 estudo desenvolvido a função objetivo é maximizar a potência hidropneumática do conversor CAO. As restrições para o problema são: área de entrada da câmara hidropneumática (A_E), área total da câmara CAO (A_T), estas são mantidas constantes, e podem ser calculadas através das seguintes relações, respectivamente:

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

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

Um critério é adotado 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) (Gomes, 2014). Assim, para determinar a restrição da área da câmara hidropneumática somada à área da chaminé (A_T), é definido que A_E representa 70 % de A_T , ou seja: $A_T = 1,43 A_E$. Neste estudo tem-se que $A_E = 37,6 \text{ m}^2$ e $A_T = 53,76 \text{ m}^2$.

No presente trabalho os graus de liberdade analisados são o ângulo de inclinação da parede entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO (α) e a razão entre

altura e comprimento da chaminé do dispositivo (H_2/l). Os graus de liberdade H_1/L (razão entre altura e comprimento da câmara hidropneumática) e H_3 (profundidade de submersão do dispositivo) são mantidos constantes, onde $H_1/L = 0,1346$ e $H_3 = 9,50$ m. A área do trapézio entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo não se mantém constante, uma vez que l e L variam para cada simulação.

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

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

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:

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

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

A função objetivo que foi considerada neste estudo é a media RMS da potência hidropneumática, que será apresentada na seção de resultados.

4 MODELO MATEMÁTICO E NUMÉRICO

4.1 Modelo *Volume of Fluid* (VOF)

Neste trabalho o método *Volume of Fluid* VOF (Hirt e Nichols, 1981) é utilizado. A metodologia VOF consiste em reproduzir a interação entre os fluidos envolvidos na simulação numérica do dispositivo do tipo CAO, que são o ar e a água neste caso. 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). Define-se a fração volumétrica, como sendo uma varável, contínua no espaço e no tempo, que representa a

presença de um fluido no interior do volume de controle. 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 ($\alpha_{\text{água}} = 1$) (Vide Fig. 3).

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

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

a equação da fração volumétrica:

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

e as equações de quantidade de movimento:

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

onde: ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3), t é o tempo (s), \vec{v} é o vetor velocidade do escoamento (m/s), p é a pressão estática (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).

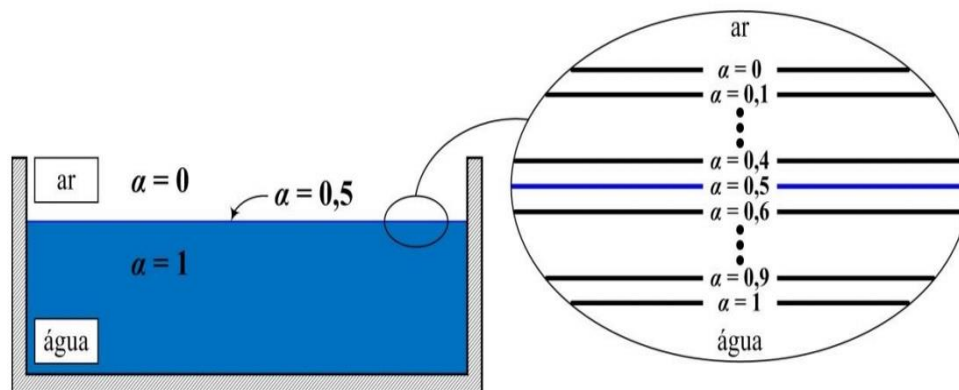


Figura 3 – Exemplo de identificação da superfície livre a partir da variação da fração de volume (adaptado de De Brito, 2010).

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):

$$\rho = \alpha_{\text{agua}} \rho_{\text{agua}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (14)$$

$$\mu = \alpha_{\text{agua}} \mu_{\text{agua}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (15)$$

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 que 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. 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 com processador Intel Core i7, com 8.0 Gb de RAM e utilizando processamento em série. O tempo de processamento de cada simulação é de aproximadamente 4 h.

5 RESULTADOS

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 em (Horko, 2007), (Liu et al., 2008a), (Liu et al., 2008b), (Gomes et al., 2009), (Gomes, 2010), (Ramalhais, 2011) e (Gomes et al., 2012a).

Uma forma de testar o modelo VOF aplicado à simulação numérica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica é verificar a geração da onda com as características definidas a priori. A verificação da presente solução com o modelo VOF consiste em gerar a onda em um tanque de ondas e observar a sua variação na superfície livre da água, ou seja, a sua amplitude, para posteriormente comparar com a equação analítica para a variação da superfície livre da água em um dado ponto do tanque de ondas.

A comparação da solução numérica com a solução analítica foi proposta por Dean e Dalrymple (1991), a equação analítica da superfície livre é definida por:

$$\eta(x,t) = A \cos(kx - \omega t) + \frac{A^2 k \cosh(kh)}{4 \sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos 2(kx - \omega t) \quad (16)$$

onde: A é a amplitude da onda (m), dado por $H/2$, x é a posição (m), t é a variação do tempo (s), k e ω são respectivamente o número de onda (m^{-1}) e a frequência da onda (rad/s), dados por:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (17)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (18)$$

Na Fig. 4, foram comparados os resultados obtidos numericamente com os obtidos pela Eq. (16) na posição $x = 22,5$ m. A verificação da solução numérica foi realizada no intervalo entre 20 e 30 s onde a onda numérica está estável e ainda não há reflexão da mesma.

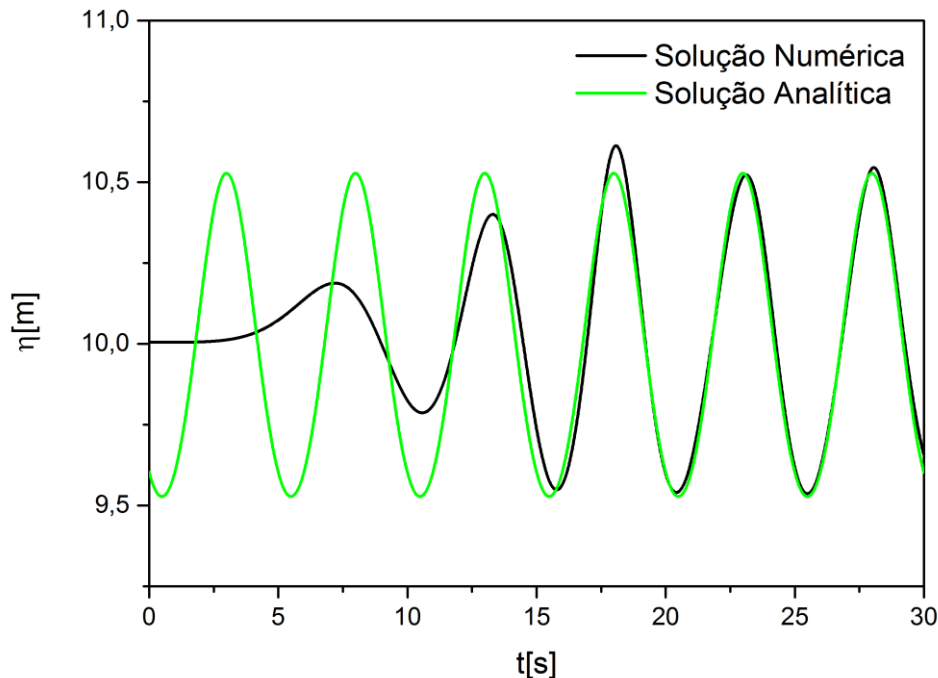


Figura 4. Elevação da superfície livre da água ao longo do tempo.

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.

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, 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). Pode-se observar na Fig. 5 os detalhes da malha computacional adotada no presente trabalho.

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):

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (19)$$

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

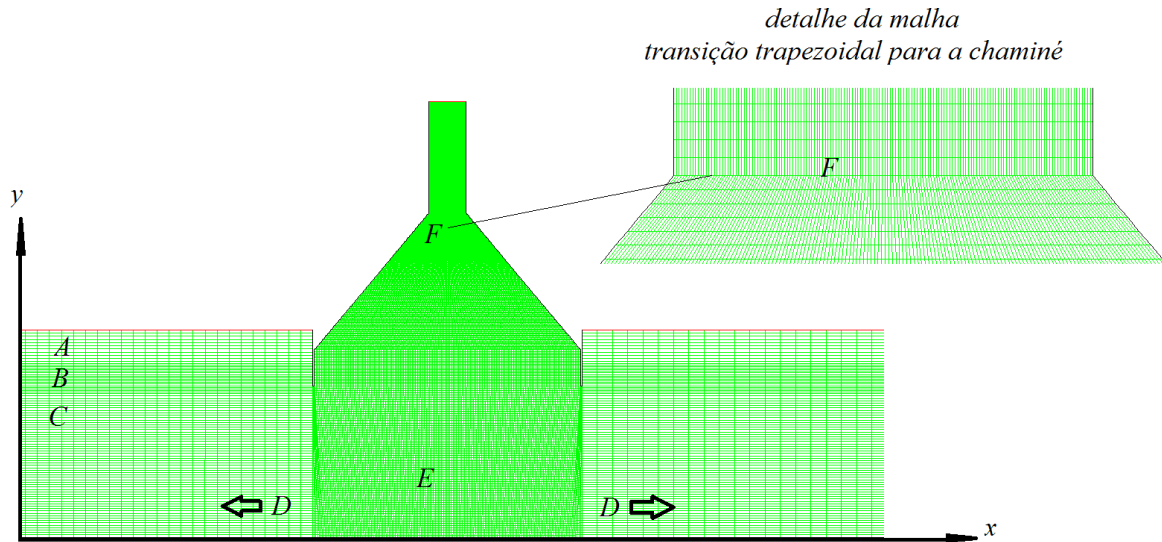


Figura 5. Discretização do domínio com a região de transição trapezoidal (Lima et al., 2015).

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

$$P_{hid} = \left(P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (20)$$

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:

$$v_{ar} = \frac{\dot{m}}{A \rho_{ar}} \quad (21)$$

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:

$$\frac{1}{A} \int \phi dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \phi_i |A_i| \quad (22)$$

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.

$$p = p_e + p_d \quad (23)$$

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

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (24)$$

A vazão mássica é calculada através da seguinte expressão:

$$\int \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \sum_{i=1}^n \rho_i \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \quad (25)$$

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:

$$\varepsilon = \frac{E_{CAO}}{P_{INC} T_W} \quad (26)$$

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

$$E_{CAO} = \int_0^T p(t)q(t)dt \quad (27)$$

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:

$$q(t) = v(t)LL_1 \quad (28)$$

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:

$$P_{INC} = \frac{\rho g A^2 \omega}{4k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (29)$$

onde ρ é a massa específica da água (998.2 kg/m^3), g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), 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 na presente investigação, calculada pela Eq. (26), é igual a 5692,65 W.

Ao todo foram analisadas trinta configurações geométricas para o caso em que a região de transição é na forma trapezoidal. Todas as dimensões foram calculadas através das Eqs. (5-10) onde somente o ângulo α e H_2/l variam.

Analisando os resultados apresentados na Tab. 1 e Tab. 2, bem como nas Figs. (6-8), onde se têm as soluções para as seis variações de H_2/l e seus resultados de melhor e pior desempenho, com a variação dos cinco ângulos estudados, é possível verificar que o aumento do ângulo α conduz a uma diminuição da média RMS da potência hidropneumática, vazão mássica e pressão. A Tab 1, mostra os resultados de melhor desempenho para as seis diferentes variações de H_2/l , onde nota-se que os valores ótimos se concentram no ângulo de inclinação referente a 5° . Os valores de pressão e vazão mássica apresentados na Tab. 1 mostram que, em relação à pressão conforme H_2/l aumenta a mesma também aumenta, contrario a vazão mássica que para $H_2/l = 6$ temos uma diminuição. A eficiência hidropneumática calculada para cada caso também é apresentada em ambas as tabelas de resultados, onde mesmo apresentando uma alta eficiência não se pode associar o resultado ao caso de melhor desempenho, uma vez que a função objetivo é a potência hidropneumática. A eficiência é calculada em função da pressão, o caso para $H_2/l = 6$ apresenta a maior pressão dentre todos estudados, por conseguinte a eficiência mais alta, mas não a maior potência hidropneumática. A Tab. 2 apresenta os resultados para os casos com menor desempenho para todos os valores de H_2/l estudados, onde assim tem-se a comparação do caso com mais alto e mais baixo desempenho hidropneumático.

Lembrando que a área da chaminé do dispositivo permanece constante em todos os casos estudados, mudando somente seu formato em função da diminuição de l .

Tabela 1. Resultados com melhor desempenho para diferentes valores de H_2/l .

| H_2/l | α [°] | \dot{m} [Kg/s] | p [Pa] | P_{hid} [W] | ε [%] |
|---------|--------------|------------------|----------|---------------|-------------------|
| 2.3 | 5 | 18.40 | 47.52 | 259.35 | 69.04 |
| 2.5 | 5 | 18.25 | 47.40 | 237.45 | 64.55 |
| 3.0 | 5 | 18.65 | 50.60 | 272.54 | 78.76 |
| 4.0 | 5 | 17.42 | 91.33 | 451.16 | 126.34 |
| 5.0 | 5 | 18.23 | 98.86 | 386.74 | 113.25 |
| 6.0 | 5 | 17.76 | 118.12 | 449.45 | 139.50 |

Tabela 2. Resultados com pior desempenho para diferentes valores de H_2/l .

| H_2/l | α [°] | \dot{m} [Kg/s] | p [Pa] | P_{hid} [W] | ε [%] |
|---------|--------------|------------------|----------|---------------|-------------------|
| 2.3 | 45 | 14.74 | 21.20 | 98.57 | 34.03 |
| 2.5 | 45 | 14.70 | 23.15 | 101.27 | 35.04 |
| 3.0 | 45 | 14.82 | 27.34 | 109.03 | 38.17 |
| 4.0 | 45 | 14.89 | 37.80 | 132.25 | 46.00 |
| 5.0 | 45 | 14.89 | 46.21 | 152.46 | 53.60 |
| 6.0 | 45 | 14.84 | 55.97 | 178.03 | 62.79 |

Verifica-se através das Figs. (6-8) que o ângulo $\alpha = 5^\circ$ se apresenta como sendo o de melhor desempenho para todos os casos testados, mas a influência da variação geométrica da chaminé do dispositivo causa alterações significativas na potência hidropneumática no decorrer do aumento do ângulo α .

Para o cálculo da potência hidropneumática (Ver Eq. 20) a vazão mássica e a pressão influenciam diretamente, pode-se notar que o caso com maior vazão mássica se apresenta para $H_2/l = 3$ ($\dot{m} = 18,65$ kg/s), mas apresenta uma pressão mais baixa que o caso de melhor desempenho ($P = 50,60$ Pa).

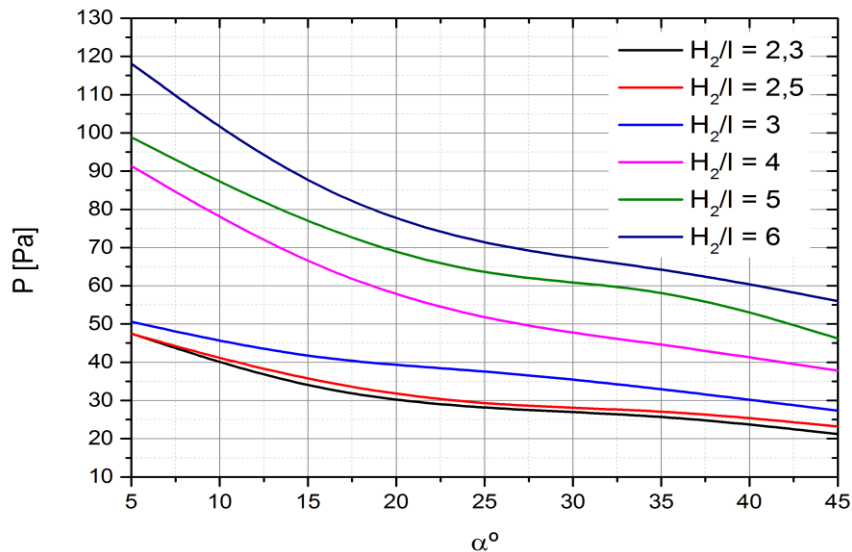


Figura 6. Variação da pressão para diferentes valores de α e H_2/l .

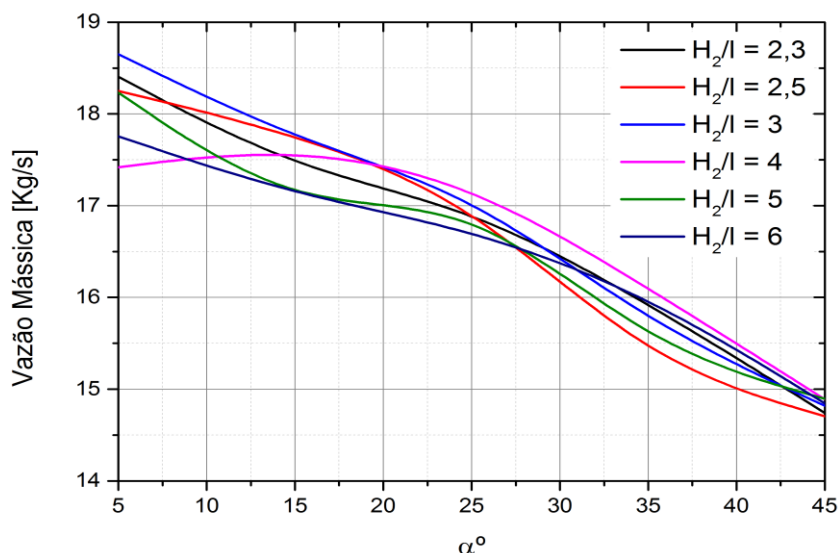


Figura 7. Variação da vazão mássica para diferentes valores de α e H_2/l .

A Fig. 6, a qual se apresenta o resultado para a pressão nos diferentes casos estudados de H_2/l e α , evidencia todos os casos pesquisados na investigação e mostra que para valores entre 2,3 e 3 de H_2/l encontram-se as mais baixas pressões, isso se justifica uma vez que se tem um valor maior para a largura da chaminé do dispositivo CAO. Em relação a Fig. 7, onde se tem todos os casos estudados de vazão mássica, nota-se que mesmo variando a relação H_2/l e α , a oscilação dos resultados é sutil.

Portanto conclui-se, que para pequenas variações da razão H_2/l tanto vazão mássica quanto pressão diminuem e as mesmas influenciam na potência hidropneumática. Entretanto, como é possível ver na Fig. 9, em que apresenta a topologia do campo de velocidades na direção y e as fases ar e água para o caso de melhor desempenho, que quando se tem a inclinação de $\alpha = 5^\circ$ e $H_2/l = 4$ não existem regiões de recirculação de ar no interior do dispositivo, tanto na fase de compressão (b) quanto na de descompressão (a), diferente do que se apresenta na Fig. 10, em que se tem a topologia do campo de velocidades na direção y e as fases ar e água para o caso de menor desempenho. Os resultados obtidos mostram que a máxima potência hidropneumática de 451,15 W é obtida para os graus de liberdade $H_2/l = 4$ e $\alpha = 5^\circ$, este resultado mostra um ganho de 78,15 % em relação ao caso com menor desempenho de potência hidropneumática, o qual apresenta 98,57 W para os graus de liberdade $H_2/l = 2,3$ e $\alpha = 45^\circ$.

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 Design Construtal se apresenta como uma ferramenta de extrema relevância no estudo de geometrias otimizadas para os conversores do tipo CAO.

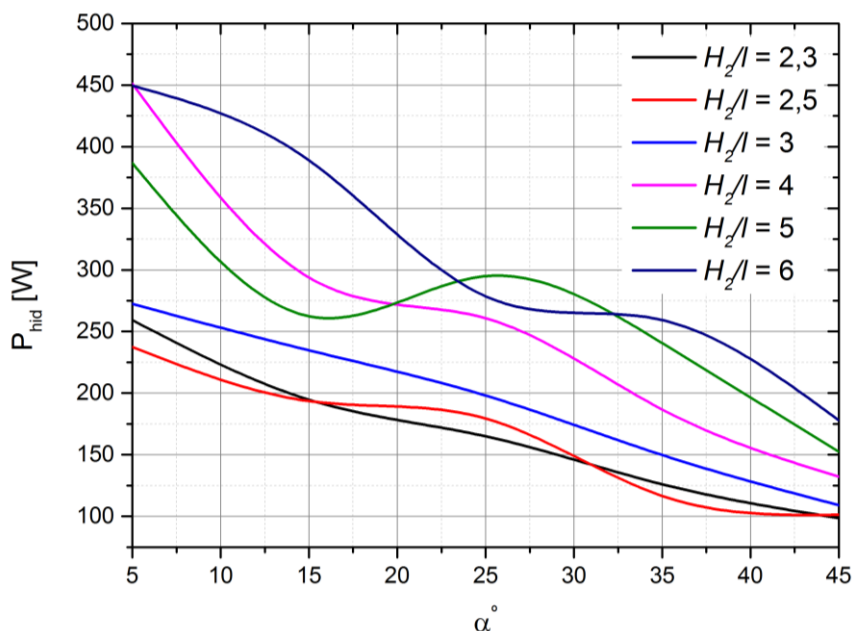


Figura 8. Variação da potência hidropneumática para diferentes valores de α e H_2/l .

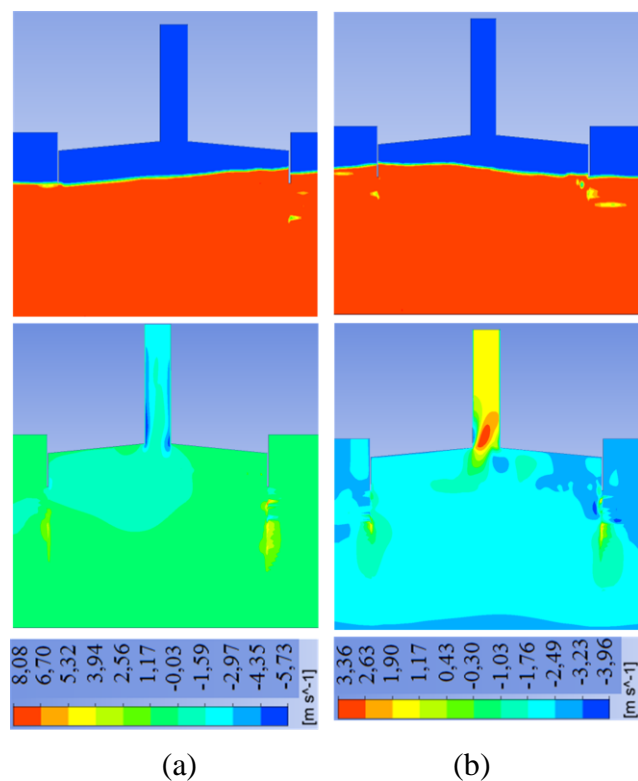


Figura 9. Topologia da velocidade na direção y (m/s) e fases água e ar para o caso com melhor desempenho.

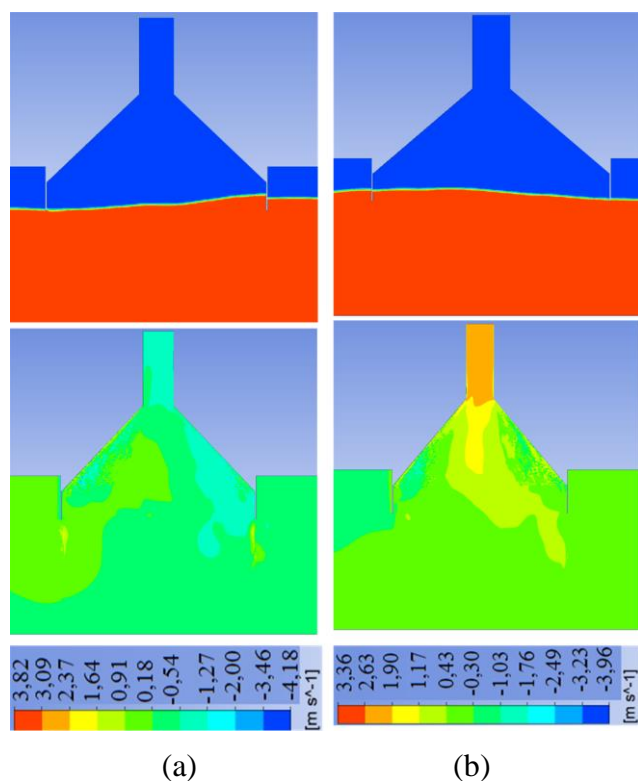


Figura 10. Topologia da velocidade na direção y (m/s) e fases água e ar para o caso com menor desempenho.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico com o objetivo de analisar a influência da região de transição trapezoidal 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). Para tanto, 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, possibilitando ainda analisar a influência deste tipo 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 dos graus de liberdade α (ângulo formado pela parede da câmara CAO e a parede da chaminé da câmara CAO) e H_2/l (razão entre altura e comprimento da chaminé do dispositivo) 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.

Um estudo de verificação do modelo numérico também foi realizado. Considerando a geração da onda, a solução numérica obtida para a elevação da superfície livre foi comparada com a solução analítica indicando a eficácia do modelo numérico.

O aumento do ângulo α apresentou uma diminuição para os valores de vazão mássica e pressão, bem como para a potência hidropneumática. Quando $\alpha = 45^\circ$ e $H_2/l = 2,3$ a eficiência é igual à $\varepsilon = 34,03\%$ e a potência hidropneumática é de 98,57 W ao passo que quando $\alpha = 5^\circ$ e $H_2/l = 4$ a eficiência é igual à $\varepsilon = 126,34\%$ com uma potência hidropneumática de 451,15 W. Assim, os resultados obtidos mostram que a máxima potência hidropneumática é de 451,15 W, para a geometria de $\alpha = 5^\circ$ e $H_2/l = 4$. Este resultado mostra um ganho de 78,15 % em relação ao caso com menor desempenho de potência hidropneumática.

A aplicabilidade do método Design Construtal para a avaliação geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas foi evidenciada, uma vez que os resultados indicam um melhor desempenho do dispositivo. O Design Construtal define o espaço de busca. A otimização é feita através da técnica de busca exaustiva. Num paralelo com a Teoria Construtal é possível avaliar a evolução da configuração geométrica que conduz para o melhor aproveitamento. Assim a técnica de Design Construtal 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 investigação do problema tridimensional associado a este estudo e comparar com outras regiões de transição com geometrias diferentes.

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.

Barreiro, T., 2009. Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

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.

Clément, A., 2002 Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 6, p. 405-431.

Cruz, J. M. B. P. & Sarmiento, A. J. N. A., 2004, *Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais*, Instituto do Ambiente, Amadora.

De Brito, M. G., 2010. Simulação Numérica de Tomadas de Água. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

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.

Espinel, M. F., Gomes, M das N, Rocha , L. A. O., Dos Santos, E., Isoldi, L. A., 2014a, Numerical Modeling and Constructal Design Applied to the Performance Improvement of na Oscillating Water Colum Wave Energy Converter. 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT 2014), Belém, PA, Brazil.

Espinel, M. F., Gomes, M das N, Rocha , L. A. O., Dos Santos, E., Isoldi, L. A., 2014b, Modelagem Computacional e Otimização da Conversão de Energia com Constructal Design de um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante. XXXV Iberian Latin-American Congresso in Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2014), Fortaleza, CE, Brazil.

Espinel, M. F., Estudo Numérico Bidimensional com Aplicação de Constructal Design para a Otimização da Geometria e da Profundidade de Submersão de um Dispositivo Conversor das Ondas do Mar do Tipo Coluna de Água Oscilante, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

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 an 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 Column 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.
- Krüger, E. L., 2003, Uma abordagem sistêmica da atual crise ambiental, *Revista Educação & Tecnologia*, n. 6.
- Lima, Y.T.B; Rocha, L.A.O; Plamer, C.B.; Isoldi, L.A.; Santos, E.D.; Gomes, M.N., 2015a. 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. *Proceedings of the XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, ABMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- Lima, Y.T.B; Rocha, L.A.O; Isoldi, L.A.; Santos, E.D.; Gomes, M.N. , 2015b. 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.. *Proceedings of the XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, ABMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- 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.
- Lopes, N., Sant'anna, F. S. P., Gomes, M. N., Souza, J. A., Teixeira, P. R. de F., Dos 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*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil.
- Maliska, C. R., 2004, *Transferência 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.

Oliveira, L., Teixeira, P. R. F., Santos, E. D. dos, Isoldi, L. A., 2012. Constructal design applied to the geometric optimization of the hydropneumatic chamber dimension of an oscillating water column wave energy device, In proceedings of the 11th Young symposium on experimental solid mechanics, Brasov, Romania.

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

Ramalhas, 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.