



ANÁLISE GEOMÉTRICA COM CONSTRUCTAL DESIGN DA RESTRIÇÃO DA TURBINA DE UM DISPOSITIVO DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE (CAO)

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. A conversão da energia das ondas dos oceanos em energia elétrica é uma alternativa para o problema da falta de combustíveis fósseis. Uma das possibilidades de aproveitamento 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 do Constructal Design, analisar diferentes diâmetros da restrição física, no formato elíptico, que representa o efeito da turbina. Assim, é possível maximizar a conversão de energia. Considerando um domínio bidimensional as restrições para este problema são: Área da restrição elíptica (A_R), Área total do dispositivo CAO (A_T) e a razão (φ_n) entre a área

da restrição elíptica e a área total. Já o grau de liberdade analisado é a razão entre os comprimentos dos eixos (d_1/d_2) da restrição elíptica. 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 para $d_1 = 1,50$ m e $d_2 = 0,423$ m obtém-se a otimização da potência hidropneumática, onde não ocorre um bloqueio do escoamento de ar na chaminé do dispositivo, com uma eficiência $\varepsilon = 70,74\%$.

Palavras-chave: Constructal design, energia das ondas, coluna de água oscilante (CAO), restrição elíptica.

1 INTRODUÇÃO

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 vêm trazendo consigo 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 Sarmiento, 2004).

Para realizar a conversão de energia, existem diversas tecnologias que podem ser classificadas quanto a sua localização: *onshore* (dispositivo integrado à costa, com facilidade de acesso), *nearshore* (dispositivos instalados em locais com profundidade entre 8 e 20 m) e *offshore* (dispositivos instalados em locais com profundidade superior a 25 m). Outra possibilidade de classificar os dispositivos conversores de energia das ondas do mar diz respeito ao seu princípio físico de funcionamento, assim tem-se três principais grupos: Coluna de Água Oscilante (CAO); Corpos flutuantes, podendo ser de absorção pontual ou progressivos; 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 método *Constructal Design* o objetivo é analisar diferentes diâmetros da restrição física no formato elíptico que otimizam a potência hidropneumática do conversor CAO de forma a evitar o bloqueio total do escoamento de ar na chaminé do dispositivo. Pois assim obtém-se uma maior vazão mássica de ar na região onde é instalada a turbina, e o aumento da pressão no interior da câmara CAO. Este formato de restrição representa a turbina do tipo *Wells*, de uma forma próxima do caso real (Gomes, 2014). Considerando uma geometria bidimensional, as restrições para o problema são: área da restrição elíptica (A_R), área total do dispositivo CAO (A_T) e a razão entre a área da restrição elíptica e a área total (ϕ_n). O grau de liberdade analisado é a razão entre o comprimento dos eixos da restrição elíptica (d_1/d_2).

Para isso, foi aplicado o método *Constructal Design*, que se baseia na Teoria *Constructal* desenvolvida por Adrian Bejan (Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012). Em problemas de engenharia, o *Constructal Design* tem sido amplamente aplicado na área de mecânica de fluidos e transferência de calor. O uso do método em problemas de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica também vem destacando-se. Em Gomes (2009b) realizou-se um estudo comparativo dos campos de velocidade entre o método Ar, onde se faz a análise somente do ar dentro do dispositivo sem a coluna de água, e o método *Volume of Fluid* (VOF), em Gomes (2012b) o autor utiliza o método *Constructal Design* para em conjunto com o estudo numérico bidimensional otimizar geometricamente um dispositivo do tipo CAO variando alguns graus de liberdade e assim obter a maximização da potência hidropneumática, o trabalho descrito em Gomes (2013) a investigação segue como continuidade da pesquisa descrita anteriormente, mas com o detalhe da utilização da escala real e assim buscar a otimização da potência hidropneumática. Em Gomes (2014) o autor faz um estudo da otimização geométrica utilizando *Constructal Design* e também descreve uma pesquisa da restrição presente na chaminé a qual representa a turbina, é utilizada duas formas geométricas para representar a mesma onde se observa que a restrição no formato elíptico assemelha-se mais ao caso real e assim busca-se uma otimização dos diâmetros da restrição física. É possível notar um aumento dos trabalhos envolvendo *Constructal Design* e conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, em especial dispositivos que seguem o princípio de funcionamento de Coluna de Água Oscilante.

Para a solução numérica, o domínio computacional (dispositivo CAO acoplado a um tanque de ondas) é construído e discretizado no software GAMBIT[®], enquanto para as simulações computacionais dos escoamentos utiliza-se o 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 para o tratamento da interação água-ar. Esse modelo computacional já foi utilizado em: Gomes et al. (2012), Liu et al. (2008a) e Ramalhais (2011).

2 DISPOSITIVO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

2.1 Princípio de Funcionamento

Os dispositivos do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) 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 em seu interior, 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, devido à pressão inferior no interior da câmara hidropneumática (Cruz e Sarmento, 2004). Para ter o aproveitamento desses sentidos opostos do fluxo de ar, normalmente são utilizadas turbinas do tipo *Wells*, as quais apresentam a propriedade de manterem o mesmo sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento. Essa turbina, acoplada a um gerador, é responsável pela conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica.

2.2 Domínio Computacional

Para as simulações de um dispositivo do tipo CAO integrado a um tanque de ondas, que pode ser verificado na Fig. 2, o domínio computacional é dimensionado baseado nas seguintes características da onda: período (T), altura (H), profundidade (h). Assim o comprimento (C_T) e a altura (H_T) do tanque de ondas podem ser definidos em relação às características da onda gerada que estão descritas na Tabela 1 (Gomes et al., 2012b). Mesmo não havendo uma regra geral para definir as dimensões de um tanque de ondas, no entanto, é necessário levar em conta alguns aspectos: a profundidade de propagação da onda é adotada como o nível de água no tanque de ondas, isto é, a profundidade (h); para o tamanho do tanque de ondas se faz necessário considerar o comprimento da onda incidente, é recomendável que a extensão horizontal do tanque de ondas tenha pelo menos cinco vezes o comprimento da onda incidente. Assim, a simulação numérica sem efeitos de onda de reflexão pode ser realizada, em um intervalo de tempo definido. A altura do tanque de ondas é definida através da profundidade e altura da onda incidente.

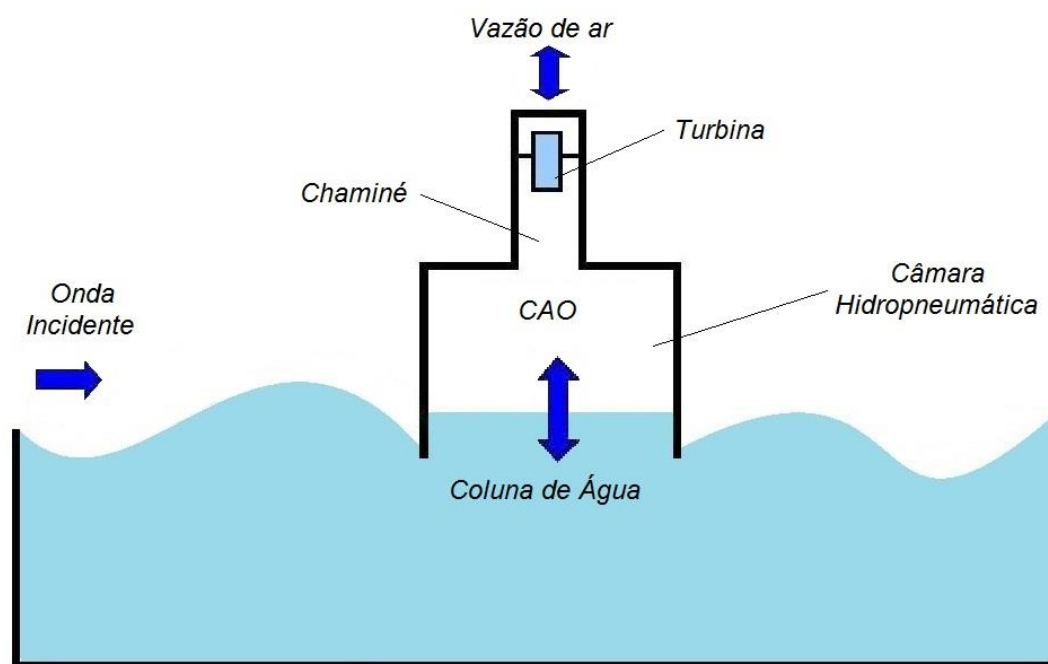


Figura 1. Representação do princípio de funcionamento do dispositivo Coluna de Água Oscilante (Gomes, 2014)

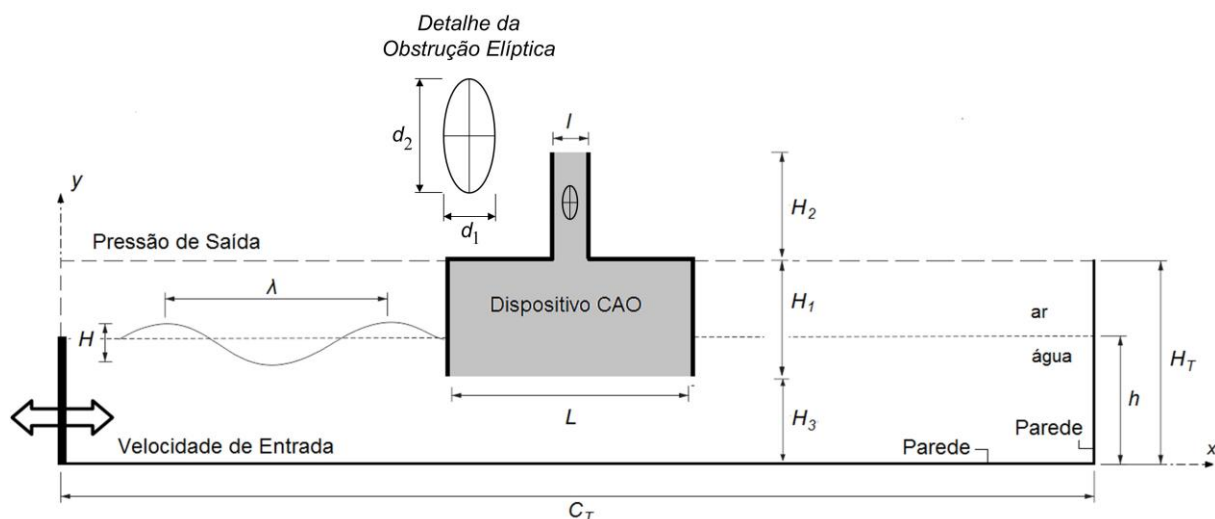


Figura 2. Representação esquemática do domínio computacional (Adaptado de Gomes, 2014).

As dimensões das características geométricas e o clima de ondas empregados no presente trabalho são apresentados na Tabela 1. Os dimensionamentos utilizados para o dispositivo CAO e para o tanque de ondas estão relacionadas com as medidas otimizadas encontradas em Gomes (2014).

Tabela 1. Dimensões do problema e clima de ondas.

Dimensões	Valor
Período da onda (T)	5,0 s
Altura da onda (H)	1,0 m
Comprimento da onda (λ)	37,6 m
Profundidade de propagação da onda (h)	10,0 m
Comprimento do tanque de ondas (C_T)	188,0 m
Altura do tanque de ondas (H_T)	13,0 m
Posição do dispositivo em relação ao fundo (H_3)	9,50 m

2.3 Condições de Contorno

No problema em consideração, a onda incidente é gerada no lado esquerdo do tanque de ondas, como pode ser visto na Fig. 2. A condição de contorno empregada neste trabalho é baseada na Metodologia Função utilizada em Gomes (2014). Esta metodologia consiste em aplicar na região onde são formadas as ondas a condição de velocidade prescrita,

considerando uma variação da velocidade da onda. A velocidade varia em função do espaço e do tempo com base na Teoria de Stokes de 2ª ordem. A onda utilizada é classificada como de alta ordem, entretanto, a influência dos termos de alta ordem é negligenciada, sem perda significativa (Dean & Dalrymple, 1991), as componentes de velocidade são dadas por:

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

$$w = Agk \frac{\sinh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} A^2 \omega k \frac{\sinh 2k(k + z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (2)$$

Onde A é a altura da onda incidente (m), dado por $H/2$; 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 inferior do tanque e a lateral direita é adotada a condição de não deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula, na parte superior do tanque e na saída da chaminé do dispositivo CAO é aplicada a condição de contorno de pressão atmosférica. Com relação às condições iniciais, o fluido é considerado em repouso.

2.4 Formulação do Problema e Constructal Design

O *Constructal Design* é um conceito muito amplo e o seu precedente, a Teoria *Constructal*, abrange uma gama de processos físicos, como explica Bejan em um de seus livros (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 facilitação de acesso 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 ocorra um acesso mais fácil para as correntes que fluem através dele (Bejan e Lorente, 2008).

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 às limitações geométricas do problema ou restrições globais (parâmetros que são mantidos constantes durante o processo de otimização) (Gomes et al., 2012a).

No presente trabalho a função objetivo é maximizar a potência hidropneumática, variando o grau de liberdade d_1/d_2 , que representa a razão entre as diagonais da obstrução em formato elíptico, (vide Fig. 2). A escolha da obstrução em formato elíptico se deve pelo fato de a mesma ser posicionada no centro da chaminé de saída do dispositivo CAO e, pelo fato de ser simétrica, oferece resistência ao escoamento tanto na etapa de compressão quanto na descompressão, representando assim o efeito de uma turbina de uma forma mais realística. Foram testadas 6 dimensões de restrição física, com as características geométricas do dispositivo fixas, variando somente os diâmetros (d_1 e d_2) da restrição física. A dimensão d_1 representa o comprimento do eixo na direção x da elipse (o que é equivalente a dizer que é o

comprimento da restrição) e d_2 representa o comprimento do eixo na direção y da elipse (o que equivale ao diâmetro da restrição). Foram consideradas três restrições globais: Área da restrição elíptica (A_R), que é definida pela multiplicação das diagonais da elipse por π , a área total do dispositivo CAO (A_T), a qual se define pela soma da área da câmara hidropneumática e a área da chaminé do equipamento, e a razão entre a área da restrição elíptica e a área total (φ_n), as mesmas são definidas da seguinte forma:

$$A_R = d_1 d_2 \pi \quad (3)$$

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

$$\varphi_n = \frac{A_R}{A_T} \quad (5)$$

3 MODELO MATEMÁTICO E NUMÉRICO

3.1 Modelo *Volume of Fluid*

Neste trabalho emprega-se o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), utilizado para a solução de escoamentos compostos de dois ou mais fluidos imiscíveis. A formulação do modelo VOF baseia-se no fato de que as duas ou mais fases são impenetráveis, ou seja, o volume ocupado por uma fase não pode ser ocupado por outra. Assim, para representar as fases contidas em cada volume de controle é necessário o conceito de fração volumétrica (α). Para a representação da propagação de ondas oceânicas regulares são consideradas duas fases: água e ar. Portanto, as células com valores $\alpha_{\text{água}}$ entre 0 e 1 contêm 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 (neste caso $\alpha_{\text{ar}} = 1$); e, por sua vez, as que apresentam $\alpha_{\text{ar}} = 0$ estão cheias de água ($\alpha_{\text{água}} = 1$) (Fluent, 2009; Hirt and Nichols, 1981).

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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (6)$$

Pela equação da fração volumétrica:

$$\frac{\partial(\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \quad (7)$$

Uma única equação da quantidade de movimento é resolvida ao longo do domínio e o campo de velocidades é compartilhado entre as fases. As equações de quantidade de movimento são dadas por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\begin{smallmatrix} \tau \\ \tau \end{smallmatrix} \right) + \rho \vec{g} \quad (8)$$

Onde: ρ é a densidade do fluido (Kg/m^3), t é o tempo (s), $\vec{v}$ é o vetor velocidade do fluido (m/s), p é a pressão estática (Pa), $\left(\begin{smallmatrix} \tau \\ \tau \end{smallmatrix} \right)$ é o tensor das tensões (Pa) e $\vec{g}$ 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 o valor médio para a massa específica e a viscosidade, respectivamente:

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{Ar}} \rho_{\text{Ar}} \quad (9)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{Ar}} \mu_{\text{Ar}} \quad (10)$$

Todas simulações foram realizadas usando *upwind* e PRESTO para a discretização de momentum e pressão, respectivamente. A velocidade-pressão de acoplamento é realizada pelo método PISO, enquanto o método GEO-RECONSTRUCTION é empregado para resolver a fração volumétrica (Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 2007). Todas as simulações numéricas foram efetuadas em um computador Intel Core i7 com 8.0 Gb de RAM, utilizando processamento em série.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo VOF tem sido empregado para simulações numéricas de conversores de energia das ondas do mar. A verificação e a validação desta metodologia pode ser encontrada na literatura como (Horko, 2007), (Liu et al., 2008a), (Liu et al., 2008b), (Gomes et al., 2009), (Gomes, 2010), (Ramalhais, 2011), (Gomes et al., 2012a). 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 solução numérica obtida é comparada com a equação analítica para a variação da superfície livre da água, proposta por Dean e Dalrymple (1991), definida por:

$$\eta(x, t) = A \cos(kx - \omega t) + \frac{A^2 k \cosh(kh)}{4 \sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos 2(kx - \omega t) \quad (11)$$

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:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (12)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (13)$$

Na Fig. 3, foram comparados os resultados obtidos numericamente com os obtidos pela Eq. (11) 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.

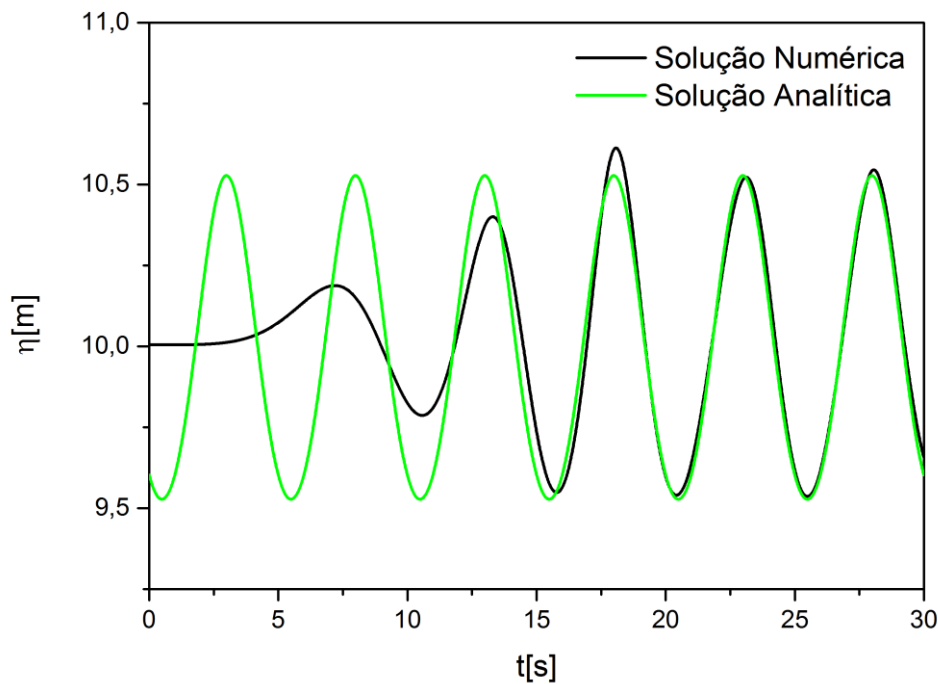


Figura 3. Elevação da superfície livre da água ao longo do tempo.

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.

Os parâmetros mantidos constantes em todas as simulações foram: $A_R = 0,4988$, $A_T = 53,7126$ e $\varphi_1 = 0,0093$, estes valores foram escolhidos com base nos dados já descritos em Gomes (2014) onde o autor desenvolveu uma análise para a restrição elíptica, porém sem variar os dois eixos da restrição, o que é feito no presente trabalho, e determina que a área da câmara CAO (H_1L) é 70% da área total (A_T).

Assim, analisando o grau de liberdade d_1/d_2 é possível verificar o desempenho das diferentes configurações geométricas da obstrução elíptica, que representa a turbina, e definir qual conduz a uma maximização da potência hidropneumática sem obstruir o escoamento de ar na chaminé do dispositivo, estes valores dos graus de liberdade podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2. Variações geométricas da restrição.

Casos	d_1 [m]	d_2 [m]	d_1/d_2	Área [m ²]	L [m]	l [m]	H_1 [m]	H_2 [m]
1	1,0000	0,6351	1,5745	0,4988	16,7097	2,3176	2,2497	6,9529
2	1,2500	0,5081	2,4601	0,4988	16,7097	2,3176	2,2497	6,9529
3	1,5000	0,4234	3,5427	0,4988	16,7097	2,3176	2,2497	6,9529
4	1,7500	0,3629	4,8223	0,4988	16,7097	2,3176	2,2497	6,9529
5	2,0000	0,3175	6,2992	0,4988	16,7097	2,3176	2,2497	6,9529
6	2,2500	0,2823	7,9702	0,4988	16,7097	2,3176	2,2497	6,9529

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). Na Fig. 4 é possível observar a discretização do domínio computacional para o dispositivo CAO. Na direção vertical o tanque de ondas está dividido em três regiões: A, B e C, onde a região B apresenta um refinamento de 40 volumes, pois a superfície livre localiza-se nesta área (o tamanho desse intervalo é equivalente à $H/20$). Para as regiões A e C foi adotado um refinamento de 10 e 90 volumes, respectivamente. Para completar o domínio computacional, quadriláteros com 0,1 m de lado foram utilizados na discretização do dispositivo CAO.

Considerando as dimensões apresentadas na Tab.1, o dispositivo CAO é fixado a uma distância de 75,2 m (distância que representa duas vezes o comprimento da onda incidente) a partir da geração da onda no canto esquerdo do tanque, vide Fig. 2.

Para cada simulação foi empregado um passo de tempo de 0,01 s. Esta escolha foi feita com base em Gomes (2014), onde foram obtidas recomendações para a simulação numérica deste problema. O tempo total de escoamento simulado foi de 30 s, quando o efeito de ondas reflexivas ainda não se faz presente na região onde se encontra o dispositivo CAO, uma vez que o tanque tem comprimento $C_T = 118\text{m}$.

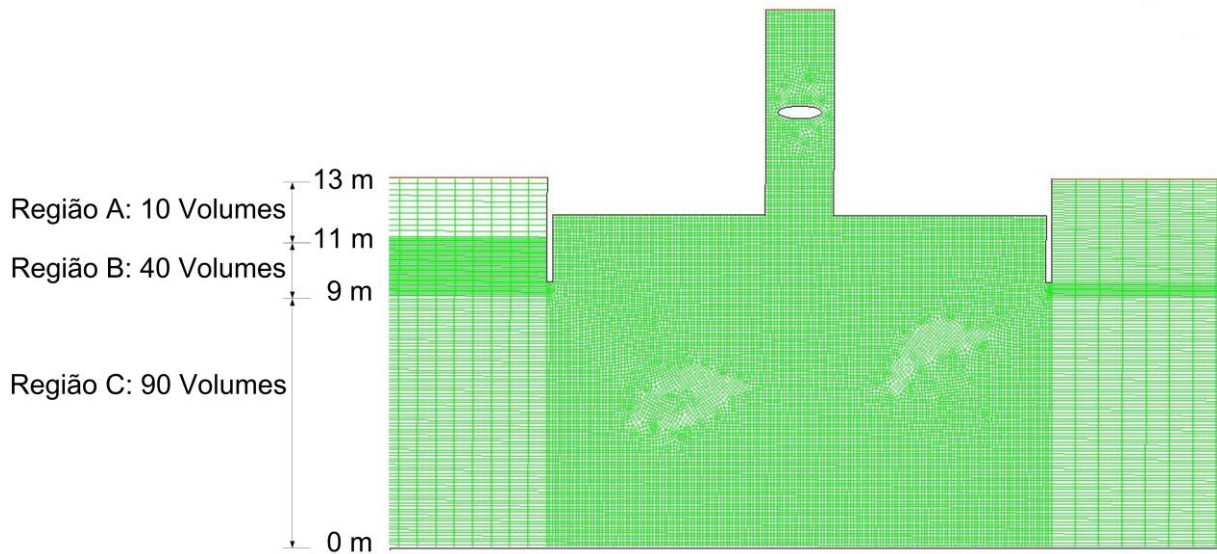


Figura 4. Discretização do domínio computacional do caso ótimo e detalhe do dispositivo CAO.

Neste trabalho são avaliados: a vazão mássica transiente (na saída da chaminé), a pressão transiente (no interior da câmara), a eficiência e também a potência hidropneumática para cada um dos casos, mostrados na Tab. 2. Os valores médios foram calculados empregando a média transiente *Root Mean Square* (RMS), que representa uma técnica estatística aplicada para quantidades variáveis transientes (Marjani et al. 2006):

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (14)$$

onde: T é o intervalo de tempo de interesse e x a variável de interesse a ser analisada com a média RMS.

Os valores médios obtidos para a vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência são apresentados na Tab. 3. Para todos os casos simulados, foi considerada a perda de carga gerada pela restrição de fluxo imposta pela turbina. Desta forma, a potência hidropneumática disponível foi calculada por (Dizadji and Sajadian, 2011):

$$P_{hid} = \left(P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (15)$$

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 (Oliveira et. Al, 2012):

$$v_{ar} = \frac{\dot{m}}{A\rho_{ar}} \quad (16)$$

onde: A representa uma área em corte transversal da chaminé (m^2), como o estudo feito remete a um caso bidimensional, é considerada unitária a terceira dimensão.

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:

$$\frac{1}{A} \int \phi dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \phi_i |A_i| \quad (17)$$

onde: ϕ é chamado de 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, temos a seguinte relação para pressão total, a qual nos possibilita calcular a pressão estática (Fluent, 2009).

$$p = p_e + p_d \quad (18)$$

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

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (19)$$

A vazão mássica é calculada através da seguinte expressão:

$$\int \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \sum_{i=1}^n \rho_i \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \quad (20)$$

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:

$$\varepsilon = \frac{E_{CAO}}{P_{INC} T_W} \quad (21)$$

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

$$E_{CAO} = \int_0^T p(t)q(t)dt \quad (22)$$

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

$$q(t) = v(t)LL_1 \quad (23)$$

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

A potência incidente ao dispositivo CAO é dada por:

$$P_{INC} = \frac{\rho g A^2 \omega}{4k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (24)$$

onde: ρ é a massa específica da água (998.2 kg/m³), g é a aceleração da gravidade (m/s²), A amplitude da onda, 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. (24) é igual a 5.692,65 W.

Tabela 3. Resultados para vazão mássica, pressão, potência hidropneumática e eficiência.

Casos	Vazão mássica [Kg/s]	Pressão [Pa]	Potência hidropneumática [W]	Eficiência [%]
1	14,408433	38,027936	107,669831	35,88665796
2	13,959589	44,278028	143,622780	41,56949377
3	13,599054	61,110500	254,076196	70,74688826
4	11,764052	127,716364	546,270341	151,8809993
5	10,255095	272,992584	997,182605	250,3164563
6	4,681167	1773,923310	2674,263155	518,2824535

Os resultados apresentados na Tab. 3 indicam que variando o grau de liberdade d_1/d_2 ocorre uma diminuição da passagem de ar na saída da chaminé, fazendo com que ocorra um aumento na pressão no interior do dispositivo CAO. Da mesma forma, ocorre uma diminuição da vazão mássica, pois a área da restrição elíptica tornou menor o escoamento de ar em função de oferecer uma maior obstrução a passagem do mesmo na chaminé do dispositivo, consequentemente, a potência também aumenta. Entretanto, deve-se ressaltar que a forma da restrição elíptica é mais próxima da geometria de uma turbina e toma-se o cuidado para que o escoamento de ar não seja totalmente interrompido, assim a escolha da melhor potência hidropneumática não se dá somente pelo caso que apresenta o maior valor, mas sim dentre os casos estudados o que apresenta a maximização da potência hidropneumática sem ocorrer uma obstrução abrupta do escoamento do ar na chaminé de saída do dispositivo CAO, como foi estudado em Gomes(2014).

Analisando a Fig. 5, é possível verificar um valor que apresenta um melhor desempenho para o grau de liberdade d_1/d_2 sem ocorrer uma obstrução abrupta do escoamento, onde temos $d_1 = 1,5000$ m e $d_2 = 0,2434$ m, assim observa-se que $\dot{m} = 13,60$ kg/s; $P = 61,11$ Pa; $P_{hid} = 254,08$ W; $\varepsilon = 70,75\%$. A escolha desse valor deve-se ao fato de que é levado em conta o projeto da turbina, uma vez que esta terá pás que precisarão se mover no interior da chaminé, entre o corpo da turbina e as paredes da chaminé. Isso reforça a escolha da restrição 3, pois fazendo a diferença entre o comprimento da saída da chaminé (l) e o diâmetro da restrição 3 (d_1) o resultado é 0,8 m, ou seja, aproximadamente 34,5 % da dimensão l livre, estes valores estão coerentes com os encontrados em Gomes (2014).

A Fig. 5 apresenta a variação da potência hidropneumática em relação ao grau de liberdade dado pela razão d_1/d_2 , onde é possível observar que a medida que a razão aumenta há também um aumento da potência. Porém, nesse caso, a maior potência encontrada não representa um valor ótimo para a razão d_1/d_2 uma vez que o respectivo valor representa uma obstrução que impede o escoamento de ar na chaminé do dispositivo, ou seja, uma restrição maior do que seria praticável em um caso real, o que afetaria o desempenho do conversor. Vale destacar que a medida que a razão d_1/d_2 aumenta o valor de d_2 diminui.

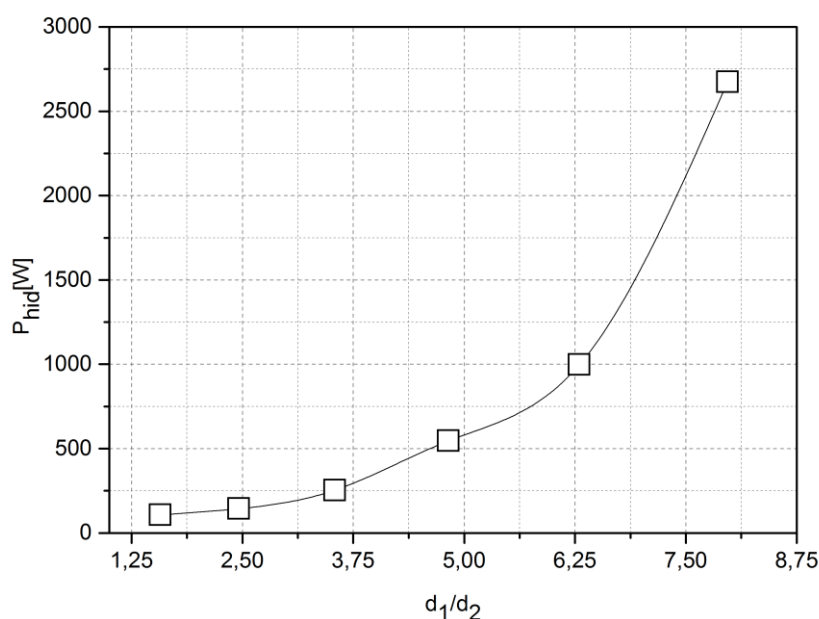


Figura 5. Variação da potência em relação aos diferentes valores de d_1/d_2 .

Analisando os casos estudados e observando a Tab. 3 é possível perceber um aumento da potência hidropneumática, pois como é visto na Eq. (15) ela depende da pressão estática e da vazão mássica.

Os valores ótimos dos eixos da restrição elíptica são obtidos, após a análise dos dados observados na Tab. 3. A potência hidropneumática depende da pressão e da vazão mássica. Assim, analisando o caso 3, o qual foi considerado o caso com melhor desempenho por apresentar um valor de potência hidropneumática que é coerente com uma restrição a qual não bloqueia o escoamento de ar na chaminé do dispositivo. Observa-se que a relação d_1/d_2 , se mostra mais favorável ao fluxo de massa que escoar na compressão e descompressão, na Fig. 6 e Fig. 7 é possível ver que para os valores de d_1 e d_2 que representam o grau de liberdade com melhor desempenho, se observa uma potência hidropneumática satisfatória para um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica sem afetar diretamente o desempenho.

Os resultados mostram que a vazão mássica influencia mais na potência hidropneumática, pois um aumento menor da mesma compensa inclusive uma pequena descompressão.

Em relação a potência é possível verificar na Tab. 3 um aumento da mesma, este aumento da potência se deve, essencialmente, ao aumento da vazão mássica e pequena diminuição sutil da pressão no interior da câmara CAO.

A Fig. 8, mostra para o caso considerado ótimo, a topologia da velocidade na direção vertical no dispositivo CAO, mostrando assim as velocidades na etapa de compressão e descompressão.

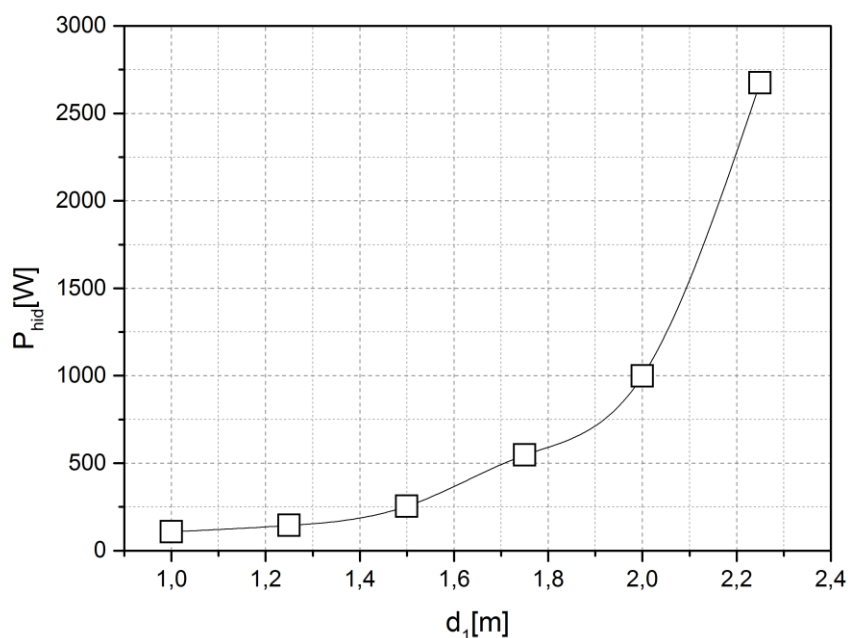


Figura 6. Variação da potência em relação aos diferentes valores de d_1 .

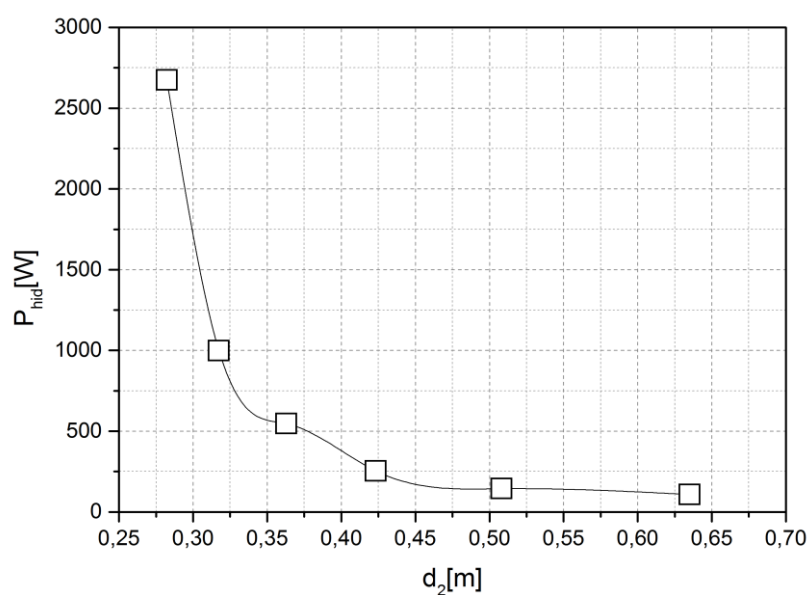


Figura 7. Variação da potência em relação aos diferentes valores de d_2 .

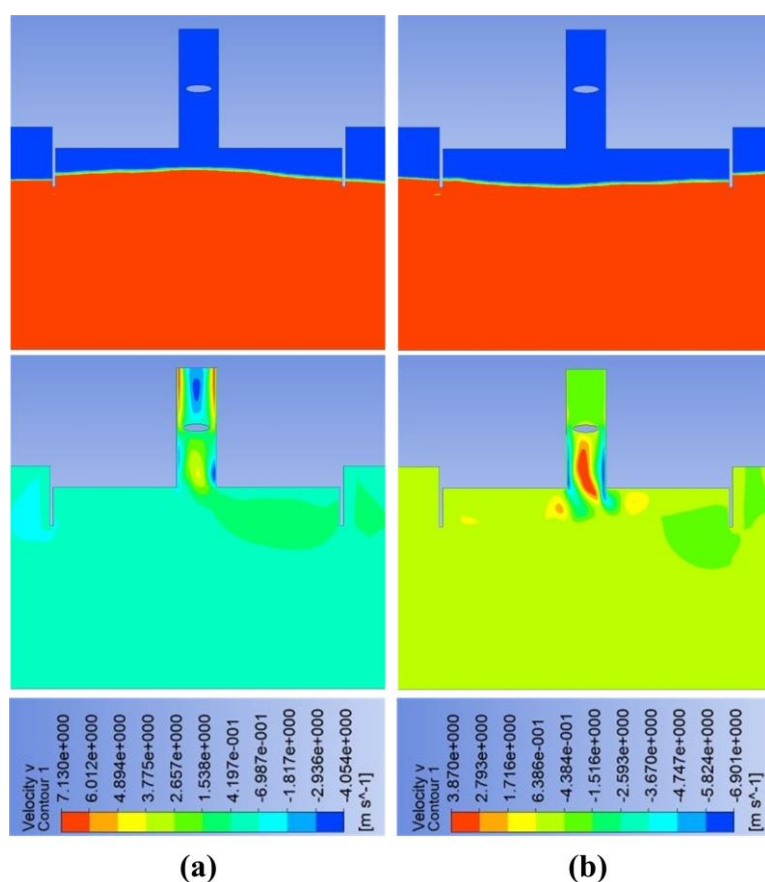


Figura 8. Topologias da velocidade na direção y do caso ótimo durante a: (a) compressão e (b) decompressão.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico com o objetivo de tornar o modelo computacional adotado mais realístico, para isso foi realizado um estudo com o propósito de representar o efeito da turbina no dispositivo CAO, através de restrições físicas. Foram testadas diferentes configurações de corpos elípticos. Para tanto, o método *Constructal Design* foi usado para definir as diversas variações das diagonais da obstrução elíptica, permitindo definir qual combinação geométrica que possibilita um melhor desempenho do sistema CAO sem que ocorra a obstrução total do escoamento de ar na chaminé do dispositivo, possibilitando analisar a influência da restrição sobre o escoamento de ar pelo dispositivo CAO. Foram avaliados os seguintes parâmetros do conversor: pressão, potência hidropneumática, vazão mássica e eficiência. O grau de liberdade considerado foi a razão d_1/d_2 (eixo horizontal e vertical, respectivamente).

A variação dos valores de d_1 e d_2 , com d_1 crescendo e d_2 decrescendo, propiciou a diminuição da vazão mássica na fase de compressão e descompressão bem como também se observou o aumento da pressão para todas as razões calculadas, uma vez que a região de obstrução se mostrou cada vez maior a medida que se aumenta o valor de d_1 .

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.

Analisando os diferentes valores de d_1 e d_2 , possibilitou-se a obtenção de um valor do grau de liberdade $d_1/d_2=3,5427$ em que se atingiu uma maximização da potência hidropneumática, sem haver um bloqueio total do escoamento de ar na chaminé do dispositivo, que é dependente direta da pressão e vazão mássica. Este valor encontrado se assemelha com as recomendações teóricas descritas em (Gomes, 2014).

Portanto, a aplicabilidade do método *Constructal Design* para a otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas foi verificada, como já foi observado na literatura. Os resultados mostram que com o uso do *Constructal Design* é possível definir uma configuração geométrica da restrição elíptica, que otimiza o desempenho do dispositivo CAO.

Para trabalhos futuros, espera-se realizar uma investigação do problema tridimensional para a restrição da turbina e trabalhar em termos da pressão e vazão mássica para assim modelar a obstrução de forma mais próxima a um caso real, sempre observando as recomendações obtidas através do método *Constructal Design*.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e CNPq pelo suporte financeiro. Os autores E. D. dos Santos, L. A. Isoldi e L. A. O. Rocha agradecem ao CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Aneel, 2008, *Atlas de Energia Elétrica no Brasil*, 3ª ed., Agência Nacional de Energia Elétrica.
- 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, 87 p.
- Bejan, A., & Lorente, S., 2008, *Design with Constructal Theory*, Wiley.
- Bejan, A. & Zane, J., 2012, *Design in Nature*, Doubleday.
- 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.
- 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, *Computational 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.

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 dimensions of an oscillating water column wave energy device*, In Proceedings of the 11th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, Brasov, Romania.

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.

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.