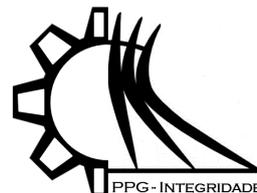




ISSN 2447-6102



Artigo

Avaliação numérica e geométrica do efeito da inserção de um anteparo triangular na parede frontal de um conversor de energia das ondas do mar do tipo Coluna de Água Oscilante

Oliveira, M.R.¹, Isoldi, L.A.², Rocha, L. A. O.³, Santos, E.D.⁴ Gomes, M.N.⁵

^{1,2,4} Universidade Federal do Rio Grande (FURG); rodriguesdeoliveira95@gmail.com, liercioisoldi@gmail.com, elizaldodossantos@gmail.com.

³ Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos); laorocha@gmail.com

⁵ Instituto Federal do Paraná – Campus Paranaguá; mateus.gomes@ifpr.edu.br

* Autor correspondente: mateus.gomes@ifpr.edu.br; Tel.: +55 41985172050

Received: 06/11/2020; Accepted: 05/12/2020; Published: 31/12/2020

Resumo: O presente artigo apresenta um estudo numérico bidimensional sobre a influência de um anteparo em um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica. O objetivo é avaliar, numericamente e geometricamente, o efeito da utilização de um anteparo na potência hidropneumática disponível no dispositivo do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO). O domínio computacional consiste em um canal de ondas com um dispositivo CAO *onshore*. Para a análise geométrica foi aplicado o Método Design Construtal. O problema apresenta uma restrição geométrica: a área do anteparo (A_2) e um grau de liberdade: H_2/L_2 (razão da altura e comprimento do anteparo). Nas simulações numéricas, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte de fração volumétrica são resolvidas através do Método Volumes Finitos (MVF). O modelo multifásico *Volume Of Fluid* (VOF) é aplicado para a interação ar-água. Observou-se que a geometria do dispositivo CAO que propiciou a maior potência hidropneumática disponível, foi a geometria de razão $H_2/L_2 = 0,025$. Os resultados mostraram uma diferença de cerca de 94% no comportamento da potência hidropneumática disponível no dispositivo CAO. Essa diferença ocorreu devido a variação do grau de liberdade H_2/L_2 , quando foi adotado $H_2/L_2 = 0,025$ foi obtida a maior potência hidropneumática disponível enquanto quando $H_2/L_2 = 0,2$ foi obtida a menor. Por fim, foi possível concluir que o aumento da razão H_2/L_2 resultou na diminuição da média RMS da potência hidropneumática disponível do dispositivo CAO.

Palavras-chave: Coluna de Água Oscilante (CAO), Design Construtal e anteparo.

1. Introdução

As emissões globais de gases de efeito estufa têm aumentado quase continuamente desde o início da revolução industrial e quase dobraram desde 1970. A produção e o uso de energia representam, atualmente, cerca de dois terços das emissões totais de gases do efeito estufa. A geração de eletricidade, por sua vez, é responsável por um terço dessas emissões relacionadas à energia (IAEA, 2020).

O Brasil dispõe de grande potencial energético, com destaque para as fontes renováveis de energia. O Plano Decenal de Expansão 2024 adotou, com uma das principais diretrizes, a priorização da participação de fontes renováveis para atender ao crescimento do consumo de energia elétrica no horizonte decenal, compatibilizando esta participação com o atendimento à carga de forma segura, em relação ao compromisso brasileiro de manter seu crescimento econômico apoiado em uma matriz energética limpa (Tolmasquim, 2016).

Segundo EPE (2007) as ondas do mar estão entre as fontes renováveis de maior densidade energética. Além disso, o dispositivo baseado no princípio Coluna de Água Oscilante (CAO) é um dos dispositivos mais promissores para a conversão de energia das ondas, pois além da eficiência da conversão de energia, a capacidade de sobrevivência também deve ser considerada para o processo de exploração de energia (Wang, 2020).



A demanda de energia tem aumentado cada vez mais, o qual evidencia ainda mais a importância em buscar diferentes alternativas de energia renovável. Uma metodologia que pode ser empregada nesse tipo de estudo é a modelagem computacional de conversores de energia das ondas do mar, pois, através da simulação numérica é possível estudar diferentes dispositivos conversores de energia de maneira eficaz. Seja na construção, testes e resultados otimizados de forma rápida e com menor custo. A seguir, são apresentadas algumas pesquisas realizadas empregando metodologias numéricas na análise de dispositivos CAO.

No estudo de Gomes (2009) concluiu-se que a costa da cidade de Rio Grande demonstra potencialidade em gerar energia elétrica, a partir das ondas do mar, através de um conversor de energia das ondas do mar do tipo CAO. Este estudo analisou numericamente o comportamento de um dispositivo CAO, quando submetido a um clima de ondas característicos da cidade de Rio Grande.

Segundo Belkacem e Larbi (2013) o tamanho da câmara e a orientação da parede frontal do dispositivo tem um impacto significativo na performance do dispositivo CAO. Este estudo analisou alguns parâmetros geométricos para discutir o efeito da geometria e as dimensões da câmara na eficiência do dispositivo. Os resultados mostraram que 180° foi o melhor ângulo para a orientação da parede frontal. A partir das simulações, as melhores dimensões encontradas para a largura da câmara foram localizadas entre $0,8h$ e h , onde h é a profundidade da água.

Teixeira (2013) fez otimização da geometria, através do método de busca exaustiva, da câmara no desempenho da potência pneumática com o código Fluinco. A profundidade e espessura da parede frontal foram consideradas iguais a 10,0 m e 0,5 m, respectivamente. A altura da onda igual a 1,0 foi mantido constante. Concluiu-se que a profundidade ótima da parede frontal foi 2,5 m, o comprimento e altura da câmara iguais a 10,0 m e 14,0 m, na devida ordem.

Na pesquisa de Mahnamfar (2017) o principal objetivo foi otimizar um dispositivo CAO variando o ângulo da parede frontal do dispositivo. Para cada estrutura do dispositivo a velocidade de ar no duto da turbina foi analisada para quatro diferentes ondas regulares, profundidades de água e ângulos da parede frontal. A partir dos resultados, percebeu-se que o aumento da eficiência do dispositivo ocorreu quando a altura da abertura da parede frontal foi aproximadamente igual a profundidade de água menos a altura da onda dividido por 2.

Uma das técnicas que pode ser utilizada para avaliar geometricamente o dispositivo CAO é a aplicação do Design Construtal. Esse método é baseado na Lei Construtal para obter o acesso mais fácil para as correntes de fluxo. Para aplicá-lo é necessário determinar uma grandeza a ser otimizada, graus de liberdade e restrições geométricas (Bejan, 2000). Em seguida, apresenta-se algumas das diversas aplicações do modelo de Design Construtal, que tem sido estudada ao longo desta pesquisa.

No estudo de Letzow (2014) analisou numericamente o efeito da geometria da rampa e da câmara sobre o desempenho de um dispositivo CAO *onshore*. O principal propósito foi verificar quais geometrias para a câmara (H_1/L_1), rampa (H_2/L_2) e profundidade de submersão da parede frontal (H_3) do dispositivo maximizam a potência disponível. A geometria ótima global obtida para $H_3 = 2,5$ m, $H_1/L_1 = 0,4$ e $H_2/L_2 = 0,8$ apresentou uma potência 37,7% maior do que a obtida para a melhor geometria sem rampa. Em relação ao efeito da rampa (H_2/L_2) sobre a potência, uma vez maximizada, e sobre a geometria ótima da câmara (H_1/L_1) foi bastante influenciado por H_3 .

Na pesquisa de Lara (2015) foi realizado um estudo numérico, com diferentes configurações geométricas no dispositivo CAO, a fim de maximizar a potência hidropneumática. Os resultados mostraram que a potência máxima obtida foi 190 W para razões de H_1/L_1 , razão entre a altura da câmara e comprimento do dispositivo, H_2/l , razão entre a altura e comprimento do duto da turbina, e H_3 , profundidade de submersão, iguais a 0,135 m, 6,0 m e 9,5 m respectivamente. Já o menor valor obtido da potência hidropneumática foi de quase 11 W, o que mostra que com base no Design Construtal é possível ter uma redistribuição de geometria para melhorar o desempenho do dispositivo.

Lima (2019) efetivou um estudo numérico e geométrico de um dispositivo CAO com duas câmaras. Os graus de liberdade analisados foram H_1/L_1 , razão entre a altura da câmara em relação ao comprimento do primeiro dispositivo, e H_2/L_2 , altura entre a câmara em relação à altura e comprimento do segundo dispositivo, e e_2 , espessura da parede do dispositivo. Os resultados mostraram que a média RMS (*Root Mean Square*) maior na potência obtida foi 5715,2 W para $H_1/L_1 = H_2/L_2 = 0,2613$ e $e_2 = 2,22$ m.

Com isso, os resultados demonstram a importância da avaliação geométrica e a eficiência do Design Construtal para a otimização de dispositivos do tipo CAO para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica. O presente estudo também emprega o método Design Construtal para avaliar numericamente o efeito de um anteparo triangular, localizado na parede frontal do dispositivo, na potência hidropneumática disponível em um dispositivo CAO.

A simulação numérica é feita no software Fluent, baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF), onde faz parte do pacote de programas da empresa Ansys. O modelo Multifásico Volume of Fluid (VOF) é aplicado no presente estudo para a interação da ar-água, assim como nos trabalhos de Gomes (2009), Belkacem e Larbi (2013), Teixeira (2013), Letzow (2014), Lara (2015), Mahnamfar (2017), e Lima (2019).

2. Métodos e Materiais

O dispositivo CAO é parcialmente submerso e possui a parte inferior aberta para o mar como mostra a Fig. 1. Segundo Falcão (2010), o princípio básico de funcionamento do dispositivo CAO é através do ar, pois o ar é comprimido no interior da câmara hidropneumática, de concreto ou aço.

Assim, há uma elevação da pressão no interior da câmara, então o ar que se encontra dentro da câmara hidropneumática é forçado a passar pelo duto da turbina (Cruz e Sarmiento, 2004). O ar passa pelo duto da turbina acionando uma turbina (Wells, Impulso ou Denniss-Auld). Analogamente, quando a superfície livre sofre uma redução, em sua altura dentro da câmara, há uma diminuição da pressão, succionando o ar para o interior da câmara através do duto da turbina (Cruz e Sarmiento, 2004).

As turbinas do tipo Wells são mais utilizadas, pois, conservam o sentido de rotação, independente do fluxo do ar (Falcão, 2010).

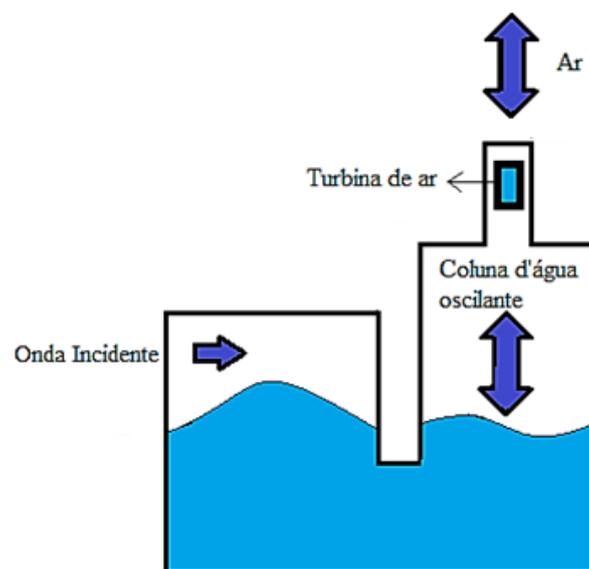


Figura 1. Esquema de funcionamento de um sistema CAO.

Na Figura 2 é possível observar uma representação do domínio computacional do dispositivo CAO, inserido em um canal de ondas, onde $H_T = 14$ m e $L_T = 327$ m. A seguir, na Tabela 1 são apresentadas as principais características de uma onda média representativa de um espectro de ondas, característico da região sul do Brasil, usada neste estudo.

Neste estudo é considerado uma câmara com espessura 0,5 m, $H_3 = 2,5$ m para o comprimento da borda frontal, $H_1 = 5,657$ m e $L_1 = 14,142$ m para a altura e comprimento. Além de que, o diâmetro e comprimento do duto da turbina são dados por 0,6 m e 1,0 m, respectivamente.

Estas configurações geométricas são usadas devido a geometria ótima encontrada no estudo de Letzow (2017). As dimensões a serem estudadas são: a altura (H_2) e o comprimento (L_2) do anteparo triangular (conforme ilustra a Fig. 2).

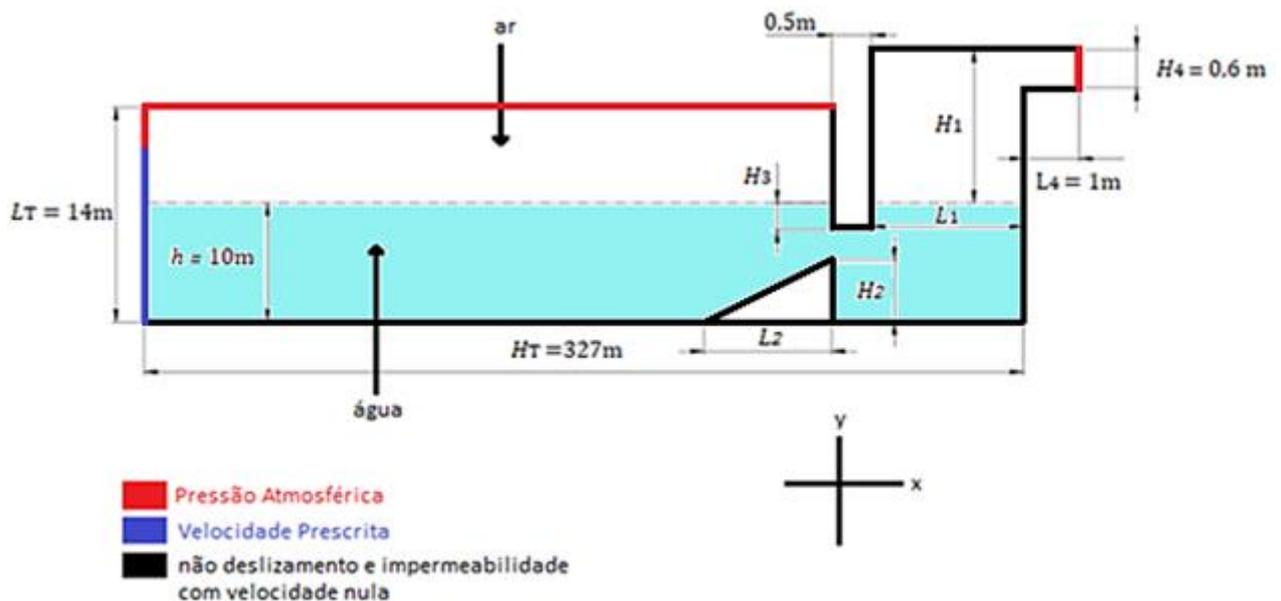


Figura 2. Domínio computacional de um dispositivo CAO inserido em um canal de ondas.

Tabela 1. Características da onda

Período (T)	7,5 s
Comprimento (λ)	65,4 m
Altura (H)	1 m
Profundidade (h)	10 m

No que diz respeito ao gerador de ondas numérico a condição empregada neste estudo é a velocidade prescrita, o que é possível observar na região em azul na Fig. 2 (Letzow, 2014; Gomes, 2014; Lara, 2015). Esta velocidade é variada em função do espaço e tempo, de acordo com a Teoria linear de ondas (Dean e Dalrymple, 1991).

Já na superfície superior do canal, na extremidade esquerda e na saída do duto da turbina, é aplicada uma condição de contorno de pressão atmosférica, como mostra nas regiões em vermelho, na Fig. 2. Nas demais regiões do canal de ondas: superfície inferior e superfície lateral direita são impostas a condição de não deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula (linhas pretas na Fig. 2). É possível observar na Figura 2 que abaixo de 10 m o fluido é a água e acima o ar.

Segundo Barreiro (2009) o canal de ondas deve ser dividido na vertical em 3 regiões R_1 , R_2 e R_3 , conforme Fig. 3. Estas divisões são recomendadas para a construção da malha numérica. Para isto, as regiões R_1 e R_3 são considerados volumes com 35 e 90 na direção y . Na região R_2 é considerado um refinamento com 60 volumes na direção y (equivalente a $H/20$) e com 239 volumes na direção x (equivalente a $\lambda/50$).

Para desenhar a geometria foi usado o DesignModeler, e para geração da malha o Mesh, no Workbench Ansys. Estes programas foram usados com finalidade de auxiliar na construção e discretização dos modelos CFD.

Nas Figuras 3 e 4 apresentam-se a discretização espacial aplicada ao dispositivo e ao anteparo. O número de volumes na direção y sofreram variações devido a parametrização da malha, adaptando-a para cada caso. Nas regiões próximas as paredes tiveram um refinamento maior, devido aos maiores gradientes do campo de velocidades nessas regiões, sendo gerados acima de 72000 volumes finitos em uma malha regular.

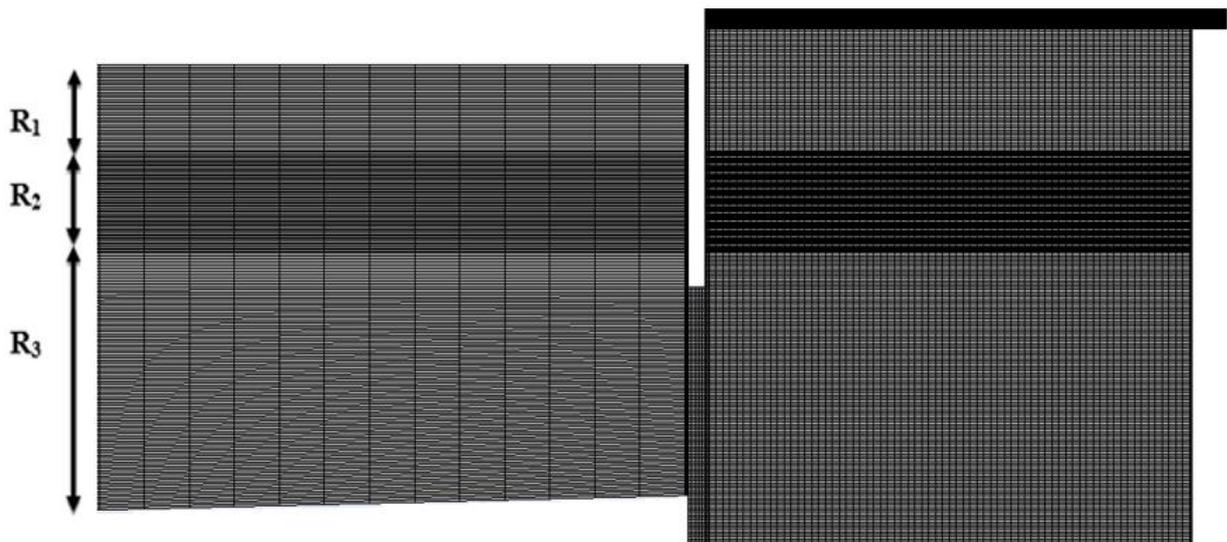


Figura 3. Discretização espacial aplicada ao dispositivo CAO onshore em escala real

Os fatores de sub-relaxação de 0,1 e 0,7 foram impostos para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento. Os resultados das equações de conservação de massa e quantidade de movimento nas direções x e y foram consideradas convergidas quando os resíduos foram menores do que 10^{-6} .

Logo após, um estudo de independência de malha foi feito para a determinação da discretização espacial empregada. Para este estudo foram realizadas quatro simulações refinando apenas a região do dispositivo CAO, pois, na região do tanque é utilizada a metodologia *stretched* de Barreiro (2009).

Os valores avaliados são a média da elevação da água dentro do dispositivo e a média RMS da vazão mássica no duto da turbina. Para o cálculo da variação, x_i representa o caso atual analisado e x_{i+1} representa o próximo caso. Desta forma, os valores de altura da superfície livre da onda, vazão mássica e suas variações são apresentados na Tabela 2, o que mostra que todos os casos conduziram a resultados concordantes.

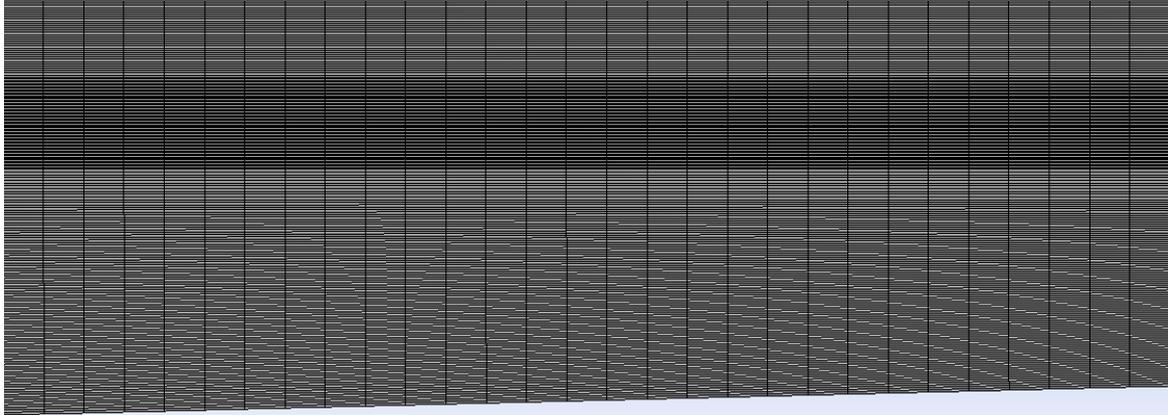


Figura 4. Discretização espacial aplicada no anteparo

Tabela 2. Teste de independência de malha

Cas o	Número de Volumes	η (m)	Variação	
			$\left \frac{x_{i+1} - x_i}{x_i} \right < 2E-04$	$\left \frac{x_{i+1} - x_i}{x_i} \right < 2E-04$
			\dot{m} (kg/s)	
1	48944	10,01795	3,55214	-
2	53818	10,01798	3,55373	4,47E-04
3	62928	10,01795	3,55301	2,02E-04
4	72021	10,01796	3,55371	1,96E-04

2.2. MODELO MATEMÁTICO E NUMÉRICO

As equações utilizadas neste trabalho são: conservação de massa, quantidade de movimento e transporte de fração volumétrica.

Desse modo, a equação de conservação da massa em um escoamento isotérmico, laminar e incompressível é dada pela seguinte equação dada por Schlichting et al. (1979):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

sendo que ρ é a massa específica da mistura (kg/m^3) e $\vec{v} = (u, v)$ é o vetor velocidade do escoamento (m/s).

A equação de conservação da quantidade de movimento é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

onde p é a pressão (N/m^2), t é o tempo (s), $\rho \vec{v}$ são as forças de campo (empuxo). O termo $\vec{\tau}$ é tensor taxa de deformação (N/m^2) para um fluido Newtoniano e \vec{g} é a gravidade (m/s^2).

Para a mistura do fluido ar-água e a interação com o dispositivo CAO o modelo VOF é usado. Este modelo é usado para fluidos com mais de duas fases. Logo, a soma das frações de volume, dentro de um volume de controle, devem ser unitárias ($0 \leq \alpha_q \leq 1$). Dessa forma, se $\alpha_{\text{água}} = 0$ então $\alpha_{\text{ar}} = 1$, pois o volume de controle estaria vazio de água e cheio de ar. Caso o fluido tem uma mistura de ar e água tem-se que $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$. Assim, a equação da fração volumétrica é usada para representar o ar e a água dentro do volume de controle.

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) \right] + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (3)$$

onde \dot{m}_{pq} é a transferência de massa da fase p para a fase q , \dot{m}_{qp} é a transferência de massa da fase q para a fase p . Já a fase primária é computada com base na seguinte restrição:

$$\sum_{q=1}^n (\alpha_q) = 1 \quad (4)$$

Além disso, as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas para a mistura. Nesse sentido, é necessário obter os valores de massa específica e viscosidade para a mistura, que podem ser escritas por:

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (5)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (6)$$

Sendo assim, para resolver as equações (1), (2) e (3), o código comercial, baseado no MVF, FLUENT é usado. Em todas as simulações numéricas é adaptado a primeira ordem de advecção e a pressão (PRESTO), para a discretização dos termos advectivos e pressão, enquanto a reconstrução geométrica é aplicada para a fração volumétrica. Por fim, o problema da pressão-velocidade é resolvido através do método PISO.

Todas as simulações numéricas foram resolvidas usando computadores com processadores i7 Intel Core com 32,0 GB de memória RAM. O tempo de processamento para cada simulação foi aproximadamente 44 horas.

2.3. VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A verificação do modelo VOF foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa foi realizada a verificação da geração da onda e na segunda etapa foi considerada a interação do ar-água e a estrutura do dispositivo.

2.3.1. Sondas de medição

Na Figura 4 são apresentadas as sondas de medição e suas posições no domínio computacional. As sondas A, B e C (linhas vermelhas) são para a medição da elevação da água a partir das linhas. O cálculo dessa medida é através da integral no software FLUENT:

$$\int \phi dA = \sum_{i=1}^n \phi_i |A_i| \quad (7)$$

onde ϕ_i é a quantidade de água em cada volume e A_i representa o comprimento de cada volume, pois é uma linha.

A sonda D (linha azul) fica no centro do duto da turbina da câmara e mede a pressão estática, com uma média ponderada em uma área, podendo ser calculada por:

$$\frac{1}{A} \int \phi \, dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \int \phi_i |A_i| \quad (8)$$

sendo que ϕ o campo variável, o que nesse caso é a pressão estática p_e (Pa), n o número de volumes e A_i é o comprimento das linhas.

A pressão estática pode ser calculada por:

$$p = p_e + p_d \quad (9)$$

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

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (10)$$

Ainda na sonda D é também calculada a vazão mássica através da seguinte expressão:

$$\int \rho \vec{v} \, d\vec{A} = \sum_{i=1}^n \int \rho_i \vec{v}_i \vec{A}_i \quad (11)$$

onde \vec{v} (m/s) a velocidade na direção y e A (m²) área da superfície que é atravessado pelo fluxo do ar.

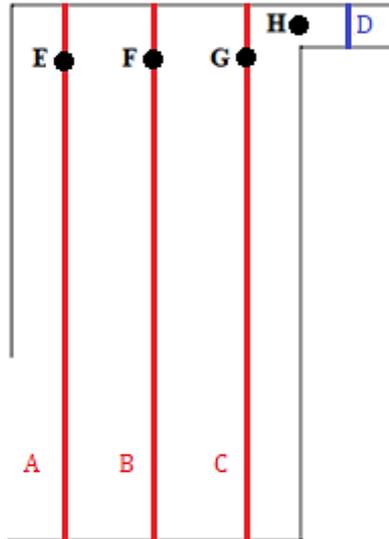


Figura 4. Sondas de medição no dispositivo CAO

As sondas E, F, G, H (pontos pretos) são pontos de medição da pressão total. Para calcular os valores médios é usado a média RMS, indicada por Marjani et. al. (2006):

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 \, dt} \quad (12)$$

onde x é a posição espacial [m].

Já para o cálculo da potência hidropneumática é utilizada a seguinte expressão, conforme em Dizardji e Sajadian (2011),

$$P_{\text{hid}} = \left(P_{\text{ar}} + \frac{\rho_{\text{ar}} v_{\text{ar}}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{\text{ar}}} \quad (13)$$

onde P_{ar} é a pressão estática no duto da turbina do dispositivo CAO, ρ_{ar} é a massa específica do ar, \dot{m} é a vazão mássica de no ar no duto da turbina e v_{ar} é a velocidade do ar que pode ser dada por, $v_{\text{ar}} = \dot{m}/A\rho_{\text{ar}}$ onde A é a área do duto de saída.

2.3.2. Verificação da propagação da onda em um canal

A verificação do modelo numérico é importante para estimar o erro numérico, sendo assim uma maneira de analisar da melhor forma possível o modelo matemático.

Para tal, a elevação da superfície livre que pode ser determinada de forma analítica através da Eq. (14).

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (14)$$

Para a verificação foi feita a comparação entre a solução analítica e numérica obtida na posição $x = 50$ m do canal de ondas, conforme Fig. 5. O tempo total de simulação foi aproximadamente 16 horas. A partir disso, é possível observar que houve um comportamento similar entre as soluções numéricas e analíticas, especialmente quando a propagação fica estável ($15 \text{ s} < t < 45 \text{ s}$).

O erro numérico é a diferença do modelo analítico e numérico (Ferziger e Peric, 1996). Logo, na comparação dos resultados o erro numérico foi 7%. Porém, notou-se que a média do erro numérico entre o intervalo $15 \text{ s} < t < 45 \text{ s}$, onde a propagação é estável, foi 3%. Essa diferença dos erros está relacionada a reflexão, pois a onda coincidi com o dispositivo e retorna.

Gomes (2014) considerou $T = 5,0$ s, e avaliou três valores para o passo de tempo ($T/1000$, $T/800$ e $T/500$), onde concluiu que com esses passos de tempo os erros numéricos são inferiores a 5%. Assim, nessa pesquisa é utilizado o passo de tempo $T/500 = 0,015$.

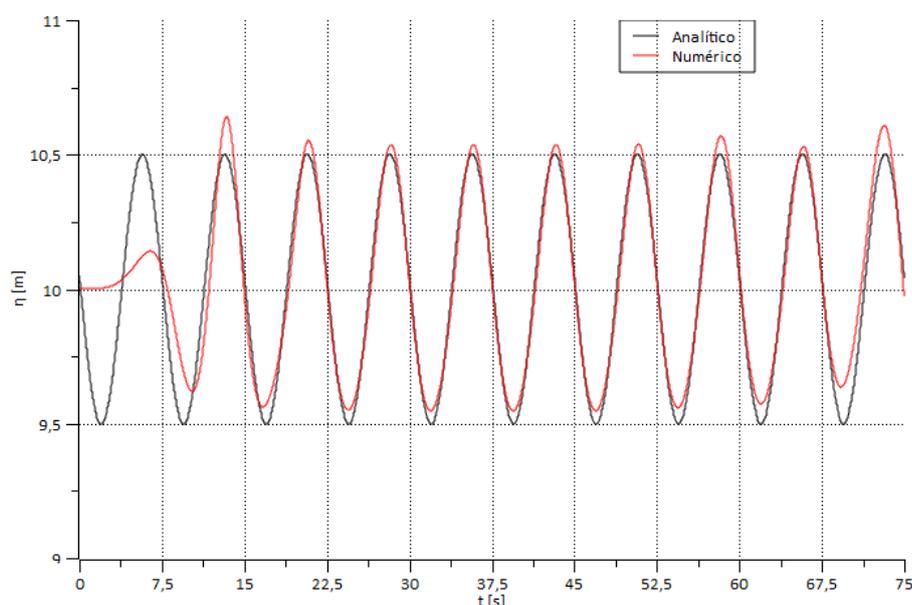


Figura 5. Comparação entre a solução analítica e numérica obtida em $x = 50$ m com passo de tempo $T/500$.

2.3.3. Verificação considerando o dispositivo CAO

A segunda etapa apresenta a verificação do modelo numérico com a interação entre água, o ar e a estrutura do dispositivo CAO. Para verificar, qualitativamente, o modelo foi reproduzido parte do trabalho de Letzow (2017), onde a solução numérica para vazão mássica e variação de pressão do dispositivo CAO são comparadas com resultados numéricos.

Para isto, foi reproduzido o caso 1 de Letzow (2017), onde $H_1/L_1 = 0,2$ (razão da altura e o comprimento do dispositivo). Na Figura 6 é possível observar uma comparação entre os resultados numéricos para a pressão na câmara hidropneumática do dispositivo. A solução numérica tem uma diferença maior nos picos inferiores. No entanto, a diferença do cálculo da média RMS do presente estudo e do Letzow (2017) é de 5%, o que mostra ter um comportamento qualitativo.

Na Figura 7 tem-se a comparação entre os resultados numéricos para a vazão mássica no duto da turbina. A diferença da média RMS é aproximadamente 5% também e, observando o gráfico, nota-se o mesmo comportamento qualitativo para as soluções apresentadas.

A partir dos resultados apresentados nas Figura (6) e Figura (7) observa-se que o modelo empregado no presente trabalho representa devidamente o comportamento do ar. É importante destacar que o modelo matemático e numérico empregado neste estudo considera o escoamento no regime laminar.

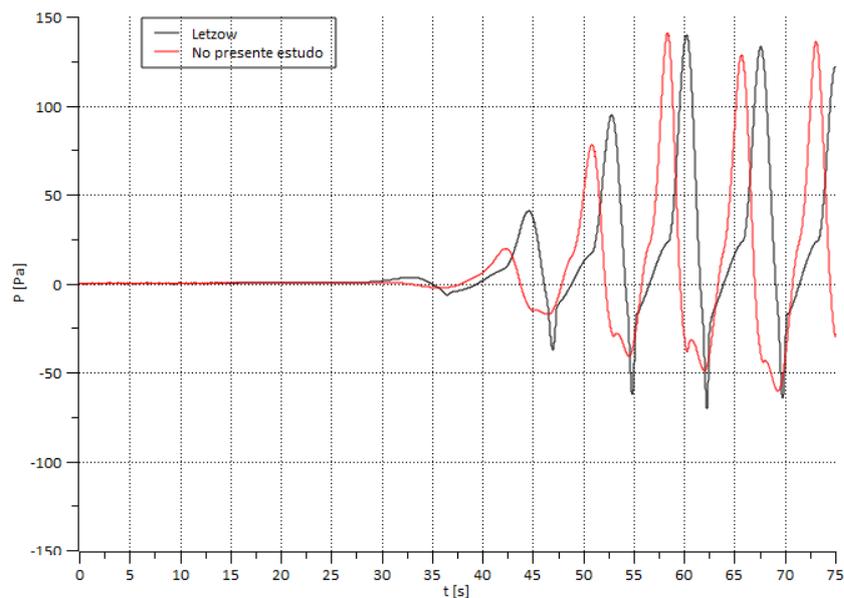


Figura 6. Diferença de pressão na câmara hidropneumática do dispositivo $H_1/L_1 = 0,2$

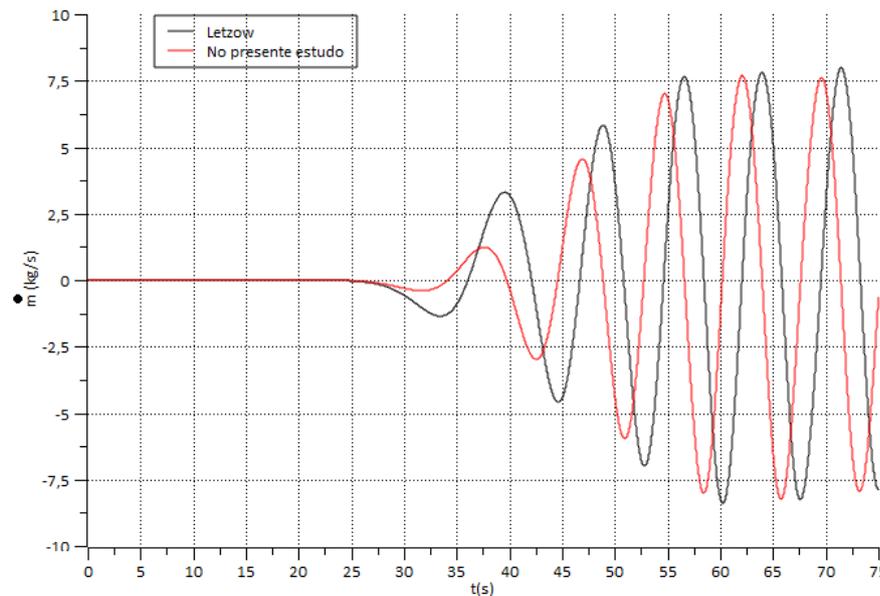


Figura 7. Comparação da vazão mássica no duto da turbina função do tempo para $H_1/L_1 = 0,2$

2.1. MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL

A Teoria Construtal foi desenvolvida por Bejan (1997). Esta teoria é denominada como o princípio físico, que conduz a formação determinística da forma e estrutura em sistemas de fluxos (BEJAN, 2000).

Vários exemplos de sistemas construídos podem ser encontrados na natureza, o que mostra que existe uma direção para onde os sistemas abertos caminham, sempre com o objetivo de melhorar o desempenho, como por exemplo, a ramificação dos vasos sanguíneos nos pulmões de um corpo humano, que é necessária para que o sangue oxigenado chegue aos demais órgãos; a ramificação das árvores, que tem a função de transporte da seiva que nutre a planta, entre outros (Bejan e Zane, 2012).

Dessa maneira, a forma circular da seção transversal dos dutos (veias, tubos, canais), a forma das seções transversais dos rios e a maneira como as veias se interligam para atingir o coração são determinadas por um princípio, ou seja, existe uma direção favorável para onde os sistemas abertos (vivos) se deslocam (Bejan, 2000). Isso acontece devido a tendência desses sistemas buscarem o melhor acesso do fluxo. Porém, existe o aparecimento das imperfeições nos sistemas, mas a redistribuição das imperfeições em sistemas de fluxo complexo é obtida fazendo mudança na arquitetura do fluxo. Isso vale para sistemas animados e inanimados (Bejan e Zane, 2012).

A Lei Construtal, baseada na Teoria Construtal, refere-se à configuração do fluxo e sua evolução no tempo. Pois afirma que para um sistema finito, onde há escoamento, sobreviver ao longo do tempo a sua configuração deve mudar com o tempo, de modo que facilite o acesso às suas correntes (fluido, energia etc.) (Bejan, 2000).

O Design Construtal é um método, baseado na Lei Construtal, para obter o acesso mais fácil para as correntes de fluxo. O principal objetivo do Design Construtal é a geometria, onde a geometria apresenta o mesmo propósito da natureza: a melhoria de sistemas de fluxo sujeito a restrições de forma e estrutura (Bejan, 2000). Esse método tem sido aplicado na área de engenharia para a melhoria do desempenho de sistemas. Além do mais, essa ferramenta pode ser utilizada para avaliar geometricamente o dispositivo CAO.

Para aplicar esse método é necessário determinar uma grandeza a ser otimizada (potência), graus de liberdade (razão da altura e comprimento do anteparo) e restrições geométricas (área do anteparo triangular) (Bejan, 2000). Segundo Bejan e Lorente (2008) as áreas precisam ser mantidas constantes, pois, a partir dessas restrições ocorre escoamento com área finita.

As áreas A_1 e A_T são descritas por:

$$A_1 = H_1 \cdot L_1 \quad (15)$$

onde L_1 e H_1 são o comprimento e a altura da câmara do dispositivo.

$$A_T = A_1 + H_4 \cdot L_4 \quad (16)$$

onde L_4 e H_4 são o comprimento e a altura do duto da turbina, sendo $A_1 = 80 \text{ m}^2$ e $H_4 \cdot L_4 = 0,6 \text{ m}^2$.

A área do anteparo triangular é dada por:

$$A_2 = \frac{H_2 \cdot L_2}{2} \quad (17)$$

Para não ter a possibilidade de o anteparo triangular sobrepor a parede frontal a seguinte restrição é utilizada.

$$H_2 < h - H_3 \quad (18)$$

reescrevendo a Eq. (17):

$$2 \frac{A_2}{A_2} = \frac{H_2}{A_2^{1/2}} \cdot \frac{L_2}{A_2^{1/2}} \quad (19)$$

adimensionalizando a Eq. (19):

$$\hat{H}_2 \cdot \hat{L}_2 = 2 \quad (20)$$

onde

$$\hat{H}_2 = \frac{H_2}{A_2^{1/2}} \quad (21)$$

$$\hat{L}_2 = \frac{L_2}{A_2^{1/2}} \quad (22)$$

temos

$$\hat{L}_2 = \sqrt{\frac{2}{\hat{H}_2}} \quad (23)$$

$$\hat{H}_2 = \hat{L}_2 \cdot \left(\frac{\hat{H}_2}{\hat{L}_2} \right) \quad (24)$$

O processo de análise é dividido em duas etapas. O primeiro passo é utilizar o caso base $H_3 = 2,5 \text{ m}$ e $H_1/L_1 = 0,4$ (Letzow, 2017). Já o segundo passo é avaliar cada valor de H_2/L_2 : 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,15; 0,2 considerando a área do anteparo (A_2) constante. Sendo estipulado o valor de 6 simulações.

3. Resultados e discussões

Para fazer a análise da avaliação geométrica do anteparo triangular, inserido em dispositivo CAO *onshore*, é utilizado o método Design Construtal. O monitoramento dos valores é dado por uma sonda (linha) localizada no meio do duto da turbina.

Este estudo utiliza o caso base ótimo de Letzow (2017): $H_1/L_1 = 0,4$ e $H_3 = 2,5$ m, onde H_1 refere-se à altura e L_1 a largura correspondente da câmara do dispositivo CAO e H_3 a profundidade de submersão da parede frontal. Para a variação do anteparo triangular foi assumida uma área constante $A_2 = 40,0$ m² sendo analisados os seguintes valores de $H_2/L_2 = 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,15; 0,2$, onde H_2 representa a altura e L_2 o comprimento do anteparo triangular fixo na entrada da parede frontal do dispositivo.

Dessa forma, foi feita uma avaliação geométrica do desempenho de um dispositivo CAO com um anteparo triangular. O método Design Construtal foi aplicado a fim de verificar o efeito das dimensões de comprimento e de altura do anteparo triangular na potência hidropneumática disponível.

Na Figura 8 é possível verificar o efeito da razão H_2/L_2 sobre a vazão mássica gerada no duto da turbina do dispositivo CAO. A geometria que apresentou uma condição ótima foi $H_2/L_2 = 0,025$, neste caso, a média RMS da vazão mássica foi de $\dot{m} = 3,55$ kg/s. A menor média RMS da vazão mássica foi $\dot{m} = 2,87$ kg/s, i.e., uma diferença de 19%. Observa-se que o comportamento de H_2/L_2 não teve influência sobre a vazão mássica no duto da turbina, pois, apresentou-se quase constante na variação de H_2/L_2 .

Na Figura 9 apresenta-se o efeito de H_2/L_2 sobre a pressão gerada no duto da turbina. Os valores de pressão RMS diminuíram no aumento de H_2/L_2 . É possível perceber que há uma decaída maior na média RMS para os valores maiores que $H_2/L_2 > 0,1$. A média RMS da pressão em $H_2/L_2 = 0,1$ foi $p = 11,75$ Pa e para a pior geometria ($H_2/L_2 = 0,2$) foi $p = 9,19$ Pa, ou seja, teve uma decaída de aproximadamente 28%. Já a diferença da média da pressão do extremo superior ($H_2/L_2 = 0,025$) para o extremo inferior ($H_2/L_2 = 0,2$) foi 50%, o que se percebe uma influência de H_2/L_2 na pressão no duto da turbina.

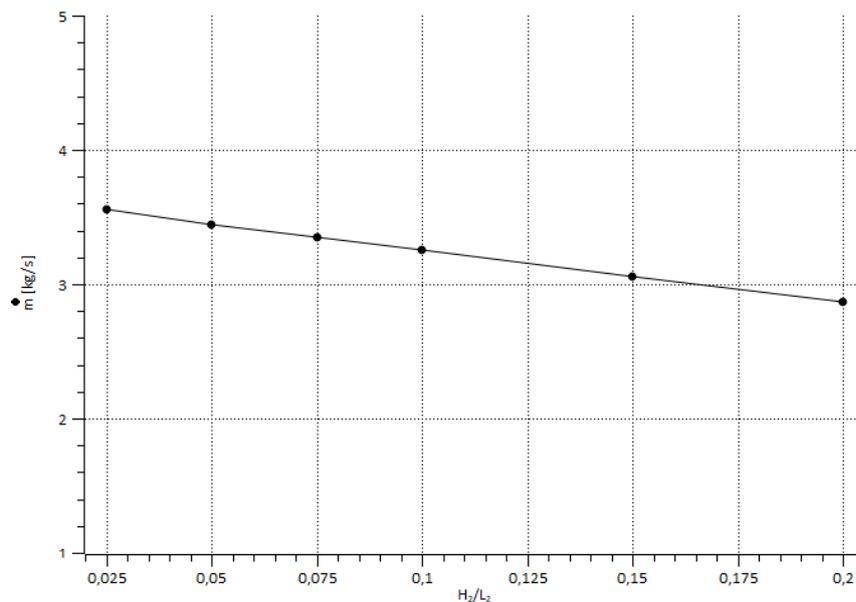


Figura 8. Efeito de H_2/L_2 sobre a vazão mássica RMS média no tempo

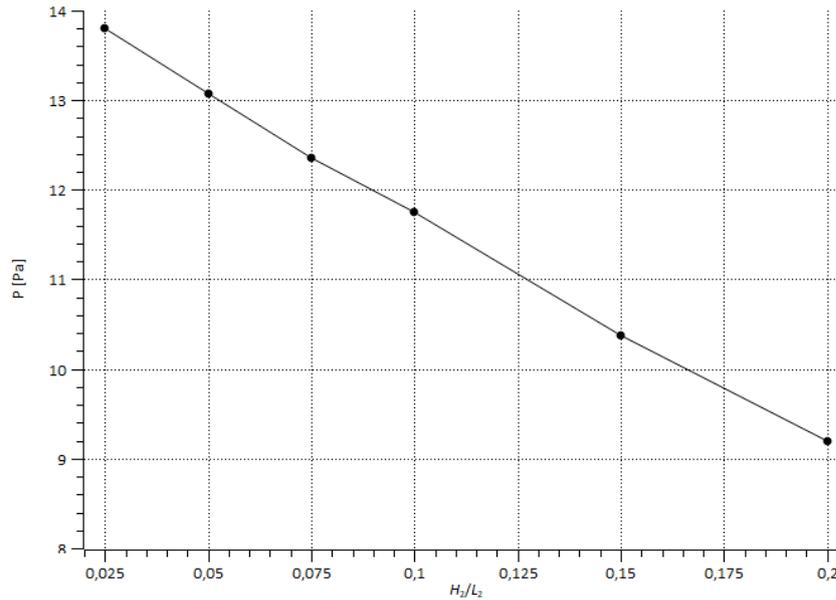


Figura 9. Efeito de H_2/L_2 sobre a pressão RMS média no tempo

Na Figura 10 é possível observar o comportamento da média RMS para a potência hidropneumática quando o grau de liberdade H_2/L_2 é variado. Tem-se que os valores médios (RMS) máximos da potência são obtidos nos primeiros valores de H_2/L_2 avaliados. A geometria ótima, sendo a média da potência hidropneumática, é quando $H_2/L_2 = 0,025$ é igual a $P_{hid} = 253,17$ W. Já a pior geometria ocorre quando $H_2/L_2 = 0,2$ é igual a $P_{hid} = 130,43$ W, tendo uma diferença de aproximadamente 94 %. Portanto, percebe-se a importância da análise geométrica no desempenho do dispositivo CAO.

Na Figura 11 apresenta-se o comportamento transiente da vazão mássica no duto da turbina. Pode ser observado um comportamento oscilante da vazão mássica no duto da turbina para a razão de $H_2/L_2 = 0,025$ em função do tempo. Isto acontece devido a elevação e redução da superfície livre da onda dentro da câmara hidropneumática.

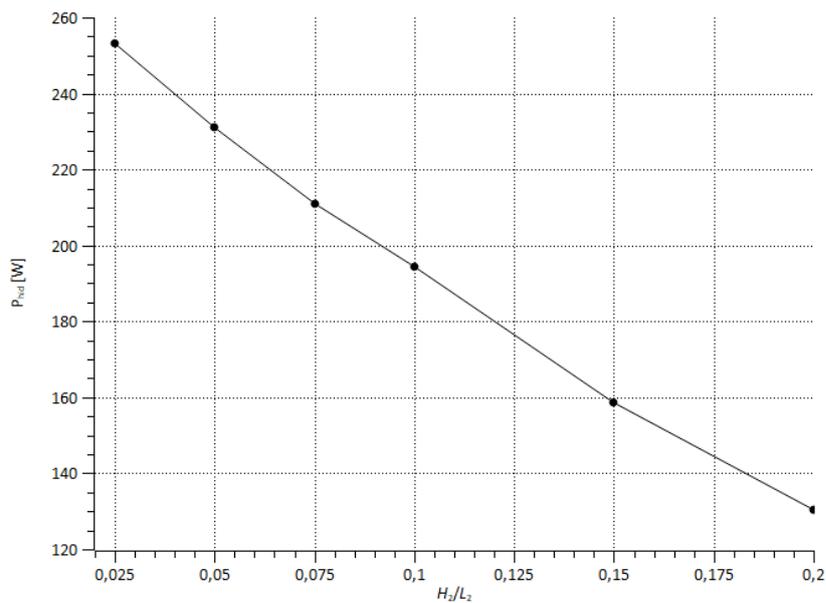


Figura 10. Efeito de H_2/L_2 sobre a potência RMS média no tempo

No estudo de Letzow (2017), a média RMS da vazão no duto da turbina para o caso ótimo $H_1/L_1 = 0,4$, sem o anteparo triangular, foi $\dot{m} = 3,71$ kg/s. Já a maior média RMS da vazão encontrada neste estudo foi $\dot{m} = 3,53$ kg/s. Ou seja, a inserção do anteparo triangular na parede frontal do dispositivo teve um decréscimo de 5% na média RMS da vazão mássica. Logo, a imposição do anteparo triangular não apresentou ter influência sobre a média RMS da vazão mássica.

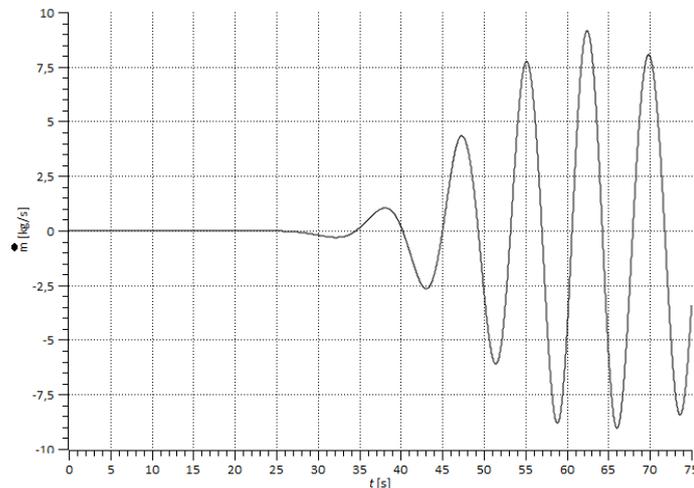


Figura 11. Vazão mássica em função do tempo para a razão de $H_2/L_2 = 0,025$

Na Figura 12 avalia-se a pressão em função do tempo para a razão de $H_2/L_2 = 0,025$ para o anteparo triangular fixo na entrada da parede frontal. Nota-se um comportamento oscilante na pressão. Contudo, a magnitude não foi semelhante nas regiões de picos e vales. As magnitudes nos picos foram maiores que as obtidas nos vales. Provavelmente, isto acontece devido a saída se dar para pressão atmosférica e a entrada para a câmara fechada, ou seja, por possuírem diferentes pressões.

A melhor média RMS da pressão na câmara hidropneumática disponível foi $P = 42,00$ Pa. No entanto, no trabalho do Letzow (2017) foi $P = 39,76$, Pa. O que mostra que a inserção do anteparo teve um aumento de 6% na pressão da câmara.

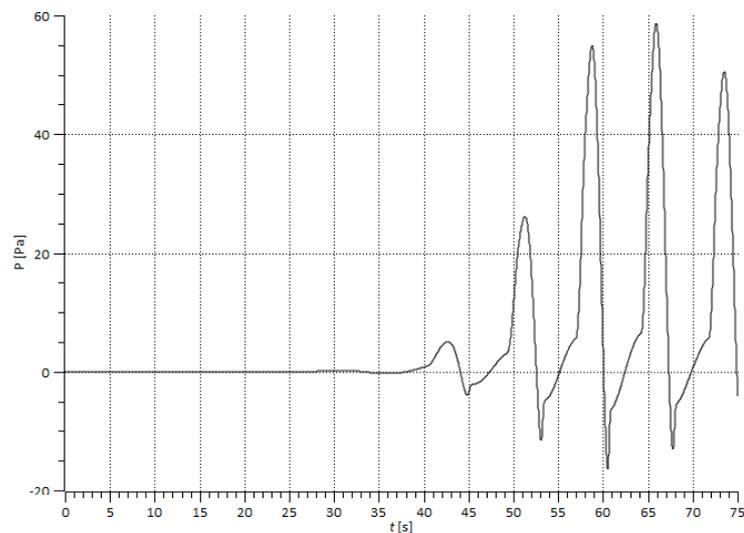


Figura 12. Pressão em função do tempo para a razão de $H_2/L_2 = 0,025$

Para avaliar a potência RMS em função do tempo para o melhor caso obtido $H_2/L_2 = 0,025$ a Fig. 13 ilustra o comportamento transiente da potência no duto da turbina. Na comparação da média RMS da potência com os resultados do estudo de Letzow (2017) para o dispositivo sem o anteparo triangular, foi possível perceber que a inserção do anteparo triangular apresentou um desempenho pior na potência hidropneumática disponível. Deste modo, a inserção resultou em um decréscimo de aproximadamente 20%.

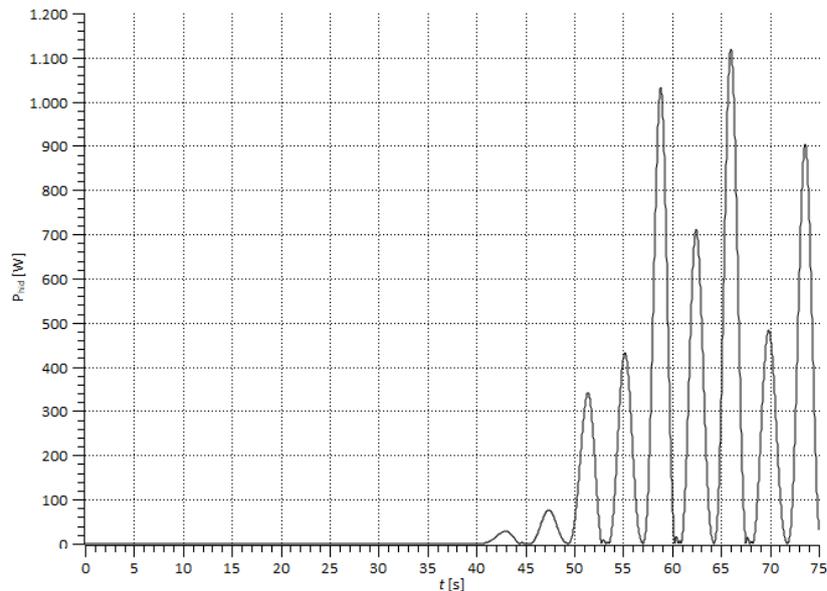


Figura 13. Potência RMS em função do tempo para a razão de $H_2/L_2 = 0,025$

Consequentemente, os resultados mostraram que a inserção do anteparo na parede frontal do dispositivo dificulta a chegada do escoamento de ar. No estudo de Letzow (2014) a imposição do anteparo triangular no fundo do tanque mostrou ter influência positiva para o caso base $H_1/L_1 = 0,4$ e $H_3 = 2,5$ m sobre o comportamento transiente do escoamento, podendo ser um parâmetro geométrico importante para analisar nesse tipo de dispositivo.

4. Conclusão

Neste trabalho foi realizado um estudo numérico com o objetivo de avaliar as geometrias de um dispositivo CAO *onshore*. Para essa análise foi utilizado o método Design Construtal e considerado o dispositivo com a área do anteparo triangular constante, variando se largura e altura. Apresentou-se um grau de liberdade H_2/L_2 (razão entre altura e comprimento do anteparo triangular) e uma restrição geométrica (área do anteparo triangular) a fim de determinar a melhor condição de potência média no duto da turbina.

Desta forma, foi resolvido um escoamento transiente de uma mistura de ar-água no regime laminar. As equações de conservação da massa, quantidade de movimento e fração volumétrica foram resolvidas através do MVF.

A etapa da modelagem computacional foi dividida em 3 partes: primeira parte foi o pré-processamento, onde foram usados o Design Modeler e Mesh no Workbench-Ansys. A segunda etapa foi o processamento através do software Ansys e o modelo VOF. Por fim, no pós processamento analisou-se os resultados a partir de gráficos e tabelas.

Os resultados mostraram a importância da aplicabilidade e a eficiência do método Design Construtal para analisar o efeito geométrico no dispositivo do tipo CAO, para a conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica. Pode-se concluir que a inserção do anteparo triangular mostrou ser importante para avaliação geométrica, no dispositivo CAO, pois, essa geometria teve bastante influência no comportamento da potência hidropneumática disponível, sendo a melhor geometria obtida para $H_2/L_2 = 0,025$.

Por outro lado, na comparação do dispositivo CAO sem o anteparo percebeu-se que a média RMS foi menor, ou seja, a inserção do anteparo triangular na parede frontal do dispositivo piorou a potência hidropneumática disponível. Sendo assim, é possível concluir que a inserção de um anteparo triangular tem influência no desempenho da potência do dispositivo.

5. Agradecimentos

Os autores M. R. de Oliveira, L. A. Isoldi, M. N. Gomes e E. D. Santos agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

6. Referências

1. IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY). Climate Change and Nuclear Power 2020. 2020. Disponível em: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1911_web.pdf>.
2. TOLMASQUIM, M. T. Energia renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Oceânica. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016.
3. WANG, Rong-quan; NING, De-zhi. Dynamic analysis of wave action on an OWC wave energy converter under the influence of viscosity. **Renewable Energy**, v. 150, p. 578–588, 2020.
4. EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). Plano Nacional de Energia 2030. 2007. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE%202030%20-%20Outras%20Fontes.pdf>>.
5. GOMES, M. das N.; ISOLDI, L. A.; OLINTO, C. R.; *et al.* Vetor. **Modelagem computacional de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante para a costa de Rio Grande**, v. 19, n. 2, p. 58–73, 2009.
6. BELKACEM, B.; LARBI, S. Contribution to the Geometry Optimization of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter. **Energy Procedia**, v. 36, p. 565–573, 2013.
7. TEIXEIRA, P. R. F.; DAVYTT, D. P.; DIDIER, E.; *et al.* Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier–Stokes equations. **Energy**, v. 61, p. 513–530, 2013.
8. MAHNAMFAR, F.; ALTUNKAYNAK, A. Comparison of numerical and experimental analyses for optimizing the geometry of OWC systems. **Ocean Engineering**, v. 130, p. 10–24, 2017.
9. BEJAN, A. **Shape and Structure: From Engineering to Nature**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2000.
10. LETZOW, M. Avaliação geométrica da câmara de um dispositivo OWC onshore inserido em um tanque com rampa triangular em escala real empregando o constructal de design. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil, 2014.
11. LARA, M. F. E. Estudo numérico bidimensional com aplicação de Design Constructal 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 de Mestrado em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2015.
12. LIMA, Y. T. B.; GOMES, M. das N.; CARDOZO, C. F.; *et al.* Analysis of Geometric Variation of Three Degrees of Freedom through the Constructal Design Method for a Oscillating Water Column Device with Double Hidropneumatic Chamber. **Defect and Diffusion Forum**, v. 396, p. 22–31, 2019.
13. POULLIKKAS, A. **Introduction to Power Generation Technologies**. New York: Nova Science Publishers, 2009.
14. LÓPEZ, I.; IGLESIAS, G. Efficiency of OWC wave energy converters: A virtual laboratory. **Applied Ocean Research**, v. 44, p. 63–70, 2014.
15. FALCÃO, A. F. de O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 899–918, 2010.
16. CRUZ, J. M. B. P.; SARMENTO, A. J. N. A. Energia das ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais. Alfragide: Instituto do Ambiente, 2004.
17. DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. Singapura: World Scientific, 1991.
18. BARREIRO, T. G. Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.
19. GOMES, M. das N. Design Construtal de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2014.
20. BEJAN, A. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume. **International Journal of Heat e Mass Transfer**, v. 40, n. 4, p. 799–816, 1997.
21. BEJAN, A.; LORENTE, S. **Design with Constructal Design**. 1. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.

22. LETZOW, M.; LEVIEN, F.; PONS, R.; *et al.* Avaliação geométrica da câmara de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo OWC para diferentes comprimentos da borda frontal. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 3, p. 454–471, 2017.
23. SCHLICHTING, H. **Boundary Layer Theory**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 1979.
24. MARJANI, A. E. *et al.* **3D Unsteady Flow Simulation in an OWC Wave Converter Plant**. In: PROCEEDINGS INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE. 2006.
25. DIZARDJI, N.; SAJADIAN, S. E. Modeling and optimization of the chamber of OWC system. **Energy**, v. 36, p. 2360–2366, 2011.
26. FERZIGER, J. H; PERIC, M. **Computacional Methods for Fluid Dynamics**. 1. ed. Berlim: Springer, 1996.