



REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DA CÂMARA DE UM DISPOSITIVO DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO OWC PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS DA BORDA FRONTAL¹

MAX LETZOW², FELIPE VILELA LEVIEN², RAFAEL DOS PASSOS PONS², MATEUS DAS NEVES GOMES³, JEFERSON AVILA SOUZA², LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA⁴, LIÉRCIO ANDRÉ ISOLDI², ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS²

¹ Apresentado no 7º Conferência Sul em Modelagem Computacional (MCSul) e do VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO).

² Universidade Federal do Rio Grande, Escola de Engenharia, Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil, max.letzow@gmail.com, felipelevien@hotmail.com, raffapp@gmail.com, jasouza@furg.br, liercioisoldi@furg.br, elizaldosantos@furg.br,

³ Instituto Federal do Paraná, Campus Paranaguá, Rua Antônio Carlos Rodrigues, 453, Paranaguá, PR, Brasil, mateus.gomes@ifpr.edu.br.

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Sarmiento Leite, 425, CEP 90.050-170, Porto Alegre, RS, Brasil, luizrocha@mecanica.ufrgs.br.

RESUMO - Este trabalho apresenta uma avaliação do desempenho de um dispositivo onshore de conversão de energia das ondas dos oceanos do tipo Coluna de Água Oscilante (*Oscillating Water Column* - OWC) em energia elétrica. O dispositivo é submetido à atuação de uma onda que é propagada ao longo de um canal com a presença do dispositivo OWC no final deste canal. As simulações numéricas consistiram na solução das equações de conservação de massa e

quantidade de movimento para a mistura ar-água e uma equação de transporte para a fração volumétrica através do método de volumes finitos (*MVF*). A metodologia Constructal em associação com a busca exaustiva é aplicada a fim de determinarem-se as dimensões ótimas da razão entre a altura e comprimento da câmara hidropneumática do equipamento. Para tal, impõe-se uma restrição geométrica que fixa o valor da área da câmara em um valor constante. O objetivo do trabalho é avaliar a geometria que maximiza a potência do dispositivo para uma condição específica de onda, avaliar a influência do efeito entre altura e comprimento do dispositivo (H_1/L_1) sobre a potência disponível para dois diferentes valores de comprimento de borda frontal $H_3 = 2,5$ m e $5,0$ m e verificar a existência ou não de uma geometria ótima universal. Verificou-se que a geometria ótima, a qual forneceu maior valor de potência hidropneumática, foi a geometria para o qual a razão $H_1/L_1 = 0,4$ e o comprimento $H_3 = 2,5$ m. A condição de geometria ótima foi obtida para uma razão intermediária de H_1/L_1 .

Palavras-chave: Coluna de Água Oscilante, Avaliação Geométrica, Constructal Design.

INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios da atualidade está em suprir a demanda energética do mundo, pois todos buscam maior crescimento econômico que aliado a urbanização e industrialização, implicam em um aumento ao acesso a energia, especialmente eletricidade. Mesmo em regiões pouco desenvolvidas, a energia elétrica se mostra necessária, tanto para saneamento básico, transportes, como para telecomunicações. Para atender a estas necessidades, pensando ainda na preservação da natureza, é necessário promover o uso das energias alternativas, as quais atualmente suprem apenas 20% do consumo de energia mundial. Uma dessas alternativas é a energia elétrica a partir das ondas do mar. Segundo o Projeto EONDAS (2009), o potencial energético médio anual das ondas de águas profundas na costa do Brasil varia entre 15 kW/m e 25 kW/m (medida por metro de frente de onda), a exceção da região do litoral sul, que apresenta valores entre 25 e 30 kW/m. Sabendo que a costa brasileira tem cerca de 8.000 km de extensão e tomando-se um valor médio para o potencial energético de 20 kW/m, o potencial energético total para o Brasil resultaria em aproximadamente 160 GW.

As ondas oceânicas são uma forma indireta de energia solar, visto que, o sol aquece a superfície da Terra, o que gera uma diferença de temperatura, fazendo com que o ar se mova e

forme os ventos. Como os ventos passam pela superfície dos oceanos, eles transferem parte da sua energia cinética para a água, produzindo as ondas que por sua vez podem viajar a longas distâncias. Quando se aproximam do litoral as águas tornam-se mais rasas e sua velocidade diminui, resultando no aumento da sua altura. Por fim a onda quebra na costa e libera uma grande quantidade de energia. Estima-se que a quantidade de energia cinética contida em uma onda é de até 110 kW/m. Ao capturar a energia dessa onda, o que ocorre é a conversão da energia cinética em energia elétrica (Schlager e Weisblatt, 2006).

O dispositivo de Coluna de Água Oscilante (Fig. 1) é um processo de conversão de energia cinética em eletricidade que segue duas fases: quando uma onda entra na estrutura o ar que se encontrava dentro dela é forçado a passar por uma turbina, como consequência direta do aumento de pressão na "câmara de ar". Quando a onda regressa ao mar o ar passa novamente na turbina, desta vez no sentido inverso, dada a pressão inferior no interior da câmara hidropneumática. Para aproveitar ambos os movimentos de sentidos opostos é adequado o uso de uma turbina que mantenha o sentido de rotação, independente do sentido do escoamento, como por exemplo, uma turbina do tipo Wells, que possui a propriedade de manter o sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento. O grupo turbina/gerador é o responsável pela produção de energia elétrica (Cruz e Sarmiento, 2004).

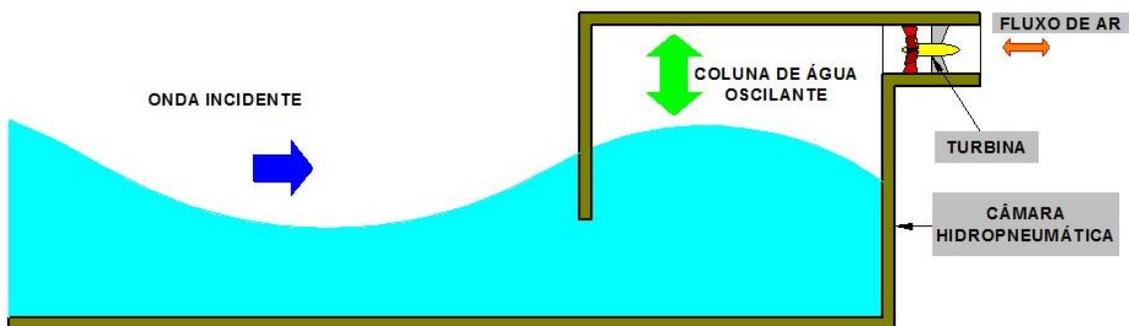


Figura 1. Dispositivo de Coluna de Água Oscilante (OWC).

O uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos da engenharia é resolvido atualmente através da tecnologia. Tratando-se de energia das ondas do mar existem alguns estudos relacionados à modelagem computacional, inclusive utilizando o software *FLUENT*[®]. A seguir apresentam-se algumas publicações recentes que utilizam o software

FLUENT[®] na modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas do mar.

Em Horko (2007) foi apresentado um estudo aplicando o código comercial *FLUENT*[®] e um modelo VOF (*Volume of Fluid*) para recriar um sistema completo *OWC* em um tanque de ondas, em uma análise bidimensional. O foco deste trabalho foi verificação da influência da geometria da parede frontal do dispositivo, definida como front lip, e foi considerado o efeito dessa geometria sobre a eficiência hidrodinâmica.

Em Conde e Gato (2008) foi analisado o escoamento do ar pelo interior de uma câmara de coluna de água oscilante equipada com duas chaminés assimétricas, visando investigar o possível *spray* de ar-água e sua influência no funcionamento das turbinas. Uma modificação da geometria a câmara de ar, utilizando uma chicana de placa horizontal para defletir o ar das turbinas foi proposto e provou ser muito eficaz na redução do risco de produção de água por pulverização a partir do fluxo para o interior.

Marjani et al. (2008) apresenta um estudo completo do sistema *OWC*, semelhante ao da ilha do Pico em Portugal, incluindo a modelagem da turbina.

Em Liu et al. (2008) é apresentada a modelagem computacional de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante. São estudados casos com diferentes geometrias de *OWC*, e também com diferentes características de ondas. Foram estudados casos tanto bi como tridimensional.

Em Seibt et al. (2014) apresentou-se um modelo computacional capaz de simular o princípio de funcionamento de alguns conversores de energia das ondas (*WEC*). Para fazer isso, o dispositivo é acoplado em um tanque de ondas, onde as ondas do mar são reproduzidas. O método de volumes finitos (*FVM*) e *VOF* são adotados. Os resultados mostraram que o princípio de funcionamento do conversor pode ser numericamente reproduzido, demonstrando o potencial da modelagem computacional para estudar este fenômeno.

Em Isoldi et al. (2015) o princípio de funcionamento de um conversor de Coluna de Água Oscilante foi analisado com uma metodologia numérica tridimensional, utilizando o método de volumes finitos e o *VOF*. As ondas incidentes na câmara hidropneumática do dispositivo *OWC* provocaram uma oscilação da coluna de água no interior da câmara resultando em um fluxo de ar alternado através da chaminé. O ar aciona uma turbina que é acoplada a um gerador elétrico. O objetivo deste trabalho foi investigar a influência da forma da geometria da câmara

hidropneumática no fluxo de ar. Para isso, seis casos foram estudados em escala de laboratório e os resultados mostraram que a variação da forma da câmara do dispositivo *OWC* pode melhorar em até 12,4% o fluxo de massa de ar que passa pela região da turbina.

Gomes et al. (2015a) realizou uma comparação entre dois tipos de restrições físicas na chaminé do dispositivo *OWC*, visando determinar numericamente a queda de pressão imposta pela turbina no fluxo de ar dentro do *OWC*. Inicialmente, uma restrição física assimétrica foi inserida no duto da chaminé e investigada. Subsequentemente, uma segunda restrição foi proposta, em que uma restrição física simétrica de forma elíptica foi analisada. Com isso, foi possível estabelecer uma estratégia para reproduzir a perda de pressão em um dispositivo *OWC* causada pela presença da turbina, bem como para gerar a curva característica.

Gomes et al. (2015b) estudou o fluxo de onda dentro de um tanque e o princípio físico operacional dos três conversores diferentes de energia das ondas: coluna de água oscilante, galgamento e placa submersa. Os conversores de energia das ondas são avaliados em laboratório e em escala real. Os resultados mostraram a precisão da abordagem numérica para a estimativa do fenômeno físico do fluxo no interior de tanques de onda, assim como, a sua interação com os dispositivos estudados. Os resultados apresentados demonstraram recomendações teóricas sobre a influência dos parâmetros geométricos (como razões entre as alturas e comprimentos da câmara de *OWC*, rampa do dispositivo de galgamento e a distância da placa com o fundo do mar do tanque de ondas). Os resultados mostraram a importância de formas geométricas com o desempenho dos dispositivos. Além disso, é avaliada a influência de vários parâmetros de ondas (tais como período de onda e profundidades relativas) sobre o desempenho dinâmico do fluido nos dispositivos e os parâmetros geométricos dos dispositivos. Percebe-se a não ocorrência de formas ideais universais.

Em Lorenzini et al. (2015), o *Constructal Design* e uma modelagem computacional foram aplicadas a uma otimização geométrica de um dispositivo de Coluna de Água Oscilante. O objetivo era converter a energia elétrica máxima variando e analisando a influência dos três graus de liberdade propostos: H_1/L (relação entre a altura e o comprimento da câmara de *OWC*), H_2/l (relação entre a altura e o comprimento da chaminé) e H_3 (submersão, que está relacionada com a câmara e a chaminé do dispositivo, e a localização em relação a profundidade do mar, respectivamente). Existem duas restrições propostas: área total de secção *OWC* (A_1) e área total

de dispositivo *OWC* (A_2). O domínio computacional consiste de uma *OWC* inserido em um tanque em que as ondas regulares em escala real são geradas. Os resultados levaram a uma recomendação teórica sobre a geometria *OWC* e sua submersão que maximiza desempenho do dispositivo, uma vez que uma redistribuição da geometria *OWC* e uma variação no valor da sua submersão poderia melhorar o poder de suspensão hidropneumática de 10,7 W para 190,8 W para relações H_1/L , H_2/l e H_3 igual a 0,135; 6,0 e 9,5 m, respectivamente, e ondas incidentes caracterizadas por um período de 5 s e o comprimento de onda de 37,6 m.

A Teoria *Constructal* explica como ocorre a organização, a diversidade e a complexidade de sistemas naturais onde existem escoamentos através do tempo e espaço (Bejan, 2000; Bejan et al, 2008).

O método *Constructal Design* tem sido empregado para explicar muitos fenômenos na natureza. Esse método tem sido largamente aplicado na área de engenharia para melhoria de desempenho de sistemas. Essa ferramenta é fundamentada na Lei *Constructal*, que diz que para um sistema de fluxo persistir no tempo (para sobreviver) deve evoluir de tal modo que ele forneça mais e mais fácil acesso às correntes que fluem através dele (Bejan et al, 2008).

MATERIAL E MÉTODOS

É avaliado o escoamento de uma onda sobre um dispositivo *OWC* (conforme ilustra a Fig. 2). Será estudada uma onda com altura $H = 1,0$ m, período $T = 7,5$ s e comprimento de onda igual a $\lambda = 65,4$ m que é propagada ao longo de um canal de profundidade de $d = 10$ m com a presença de um dispositivo de conversão de energia das ondas no final deste canal de comprimento $L = 327,0$ m. A altura total do tanque de ondas é de 14,0 m.

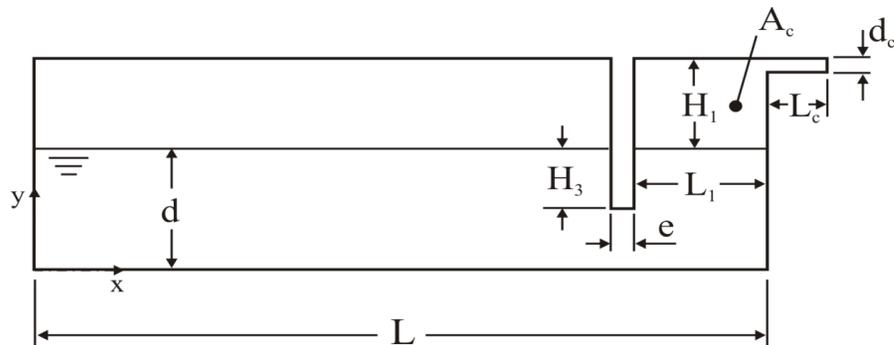


Figura 2. Ilustração do domínio a ser simulado para a otimização geométrica da câmara para valores de H_3 .

Neste estudo será considerada uma câmara com espessura $e = 0,5$ m e dois diferentes valores para o comprimento da borda frontal $H_3 = 2,5$ m e $5,0$ m (estudado no trabalho de Oliveira, 2012). Além disso, o diâmetro e comprimento da chaminé serão dados por $d_c = 0,6$ m e $L_c = 1,0$ m, respectivamente. As dimensões a serem estudadas são: a altura entre a linha de repouso da água e o teto da câmara onde está presente o ar (H_1), o comprimento da câmara (L_1) e o comprimento da borda frontal (H_3).

Para a otimização da câmara geométrica será imposta uma restrição de área ocupada pelo ar quando o nível de água está em repouso $A_c = 80$ m². O problema é submetido aos graus de liberdade H_1/L_1 e H_3 , sendo que os valores de H_1 e L_1 para a área da câmara variam conforme Eq. 1.

$$A_c = H_1 \cdot L_1 \quad (1)$$

Foram realizadas simulações para cada valor de e e H_1/L_1 correspondente a um valor de H_3 , totalizando 16 simulações. Os valores correspondentes a H_1 e L_1 estão mostrados na Tab. 1.

Tabela 1. Valores de H_1 e L_1 avaliados no estudo de otimização geométrica da câmara.

H_1/L_1	0,2	0,4	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0
H_1 (m)	4,00	5,66	8,00	8,94	10,95	12,64	15,49	20,00
L_1 (m)	20,00	14,14	10,00	8,94	7,30	6,32	5,16	4,00

Modelagem matemática

Para cada geometria de área da câmara (H_1/L_1) associada ao valor de borda frontal (H_3) é necessário realizar a solução numérica do problema.

O modelo *VOF* pode representar dois ou mais fluidos imiscíveis resolvendo um único conjunto de equações do movimento e localizando a fração de volume de cada um dos fluidos ao longo do domínio (FLUENT, 2006). A formulação *VOF* baseia-se no fato de que as duas ou mais fases são imiscíveis. Isso deve conduzir a bons resultados tratando-se da mistura ar-água devido à grande diferença na massa específica entre cada componente da mistura. Para cada fase adicional acrescentada ao modelo, a fração volumétrica é calculada no volume. Em cada volume de

controle, a soma da fração volumétrica de todas as fases é unitária. Os campos para todas as variáveis e propriedades são compartilhados pelas fases e representam valores médios calculados no volume, contanto que a fração volumétrica de cada uma das fases seja conhecida localmente. Assim, as variáveis e propriedades em um determinado volume representam uma das fases ou uma mistura de fases, dependendo dos valores da fração do volume (Hirt & Nichols, 1981; Ling et al, 2001; Lv et al., 2011).

A localização entre as fases é definida pela solução da equação da continuidade para a fração de uma ou mais fases. A análise consiste em encontrar a solução de um fluxo de mistura de água e ar. Para isso, as equações de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte de fração volumétrica são resolvidos com o método de volumes finitos (*MVF*). A equação de conservação da massa para um escoamento isotérmico, laminar e incompressível com duas fases (ar e da água):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

Onde ρ é a densidade da mistura (kg/m^3), t é o tempo (s) e \vec{v} é o vetor velocidade do fluxo (m/s).

A equação de conservação da quantidade de movimento é:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \left(\overset{=}{\tau} \right) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

Onde p é a pressão (N/m^2), $\rho \vec{g}$ e \vec{F} são a flutuabilidade e as forças externas do corpo (N/m^3), respectivamente, e $\overset{=}{\tau}$ é o tensor taxa de deformação (N/m^2), que, para um fluido newtoniano, é dado por:

$$\overset{=}{\tau} = \mu \left[\left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (4)$$

Em que μ é a viscosidade dinâmica (kg/(ms)), I é um tensor unitário, o segundo termo do lado direito está relacionado com a tensão deviatória (N/m²). A fim de lidar com o fluxo da mistura de ar e água, para avaliar a sua interação com o dispositivo, é empregado o método *VOF*.

Modelagem computacional

No presente estudo utiliza-se o modelo *VOF* para reproduzir a interação da água com o ar, bem como a interação do fluido com a estrutura do conversor do tipo *OWC*. Assim, para representar o domínio computacional é necessário indicar além da estrutura do dispositivo *OWC* também a região onde a onda se propaga, ou seja, um tanque de ondas.

Conforme Fig. 3, a parte superior do tanque de ondas e na saída da turbina, denominada de pressão de saída, é aplicada a condição de contorno de pressão atmosférica. Na condição de contorno denominada parede, na parte inferior, lateral e superior do tanque e paredes da câmara, é considerada uma velocidade nula. No que diz respeito ao gerador de onda, a mesma será realizada através da imposição de um campo de velocidades conhecido e caracterizado pela teoria linear de ondas localizado na parede vertical da origem do tanque.

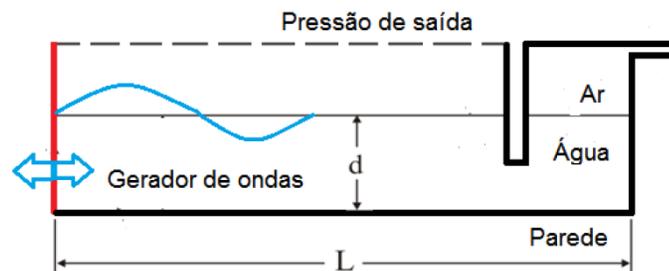


Figura 3. Representação esquemática do tanque de ondas.

Com relação a discretização espacial, a mesma foi realizada com aproximadamente 180.000 volumes finitos retangulares, conforme ilustrado na Fig. 4. Além disso, foi considerada uma malha do tipo stretched com maior refinamento próximo a superfície de interface entre água e ar e na região próxima a chaminé do dispositivo *OWC*.

Neste trabalho, foi utilizado o esquema de advecção *upwind* para os termos advectivos e o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade *PISO* (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*). Para o método de reconstrução geométrica (*Geo-Reconstruction*) utiliza-se representação da interface entre os fluidos a aproximação *piecewise-linear*.

Foi adotado nas simulações de avaliação geométrica o passo de tempo de $\Delta t = 1.0 \times 10^{-2}$ s, o tempo médio de cada simulação foi de aproximadamente 168 horas. A solução foi considerada convergida quando os resíduos para as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e do transporte da fração volumétrica foram 10^{-6} , 10^{-6} e 10^{-6} , respectivamente.

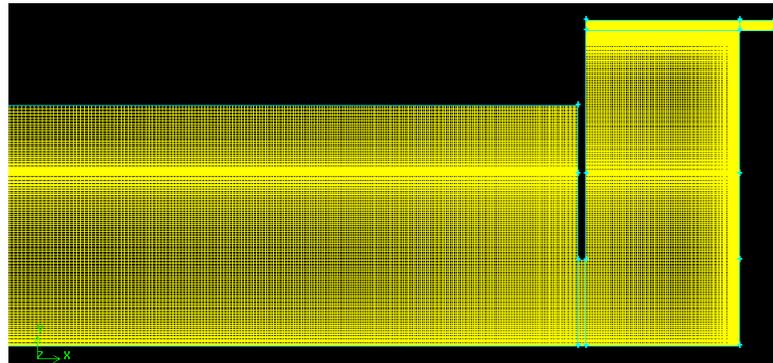


Figura 4. Discretização espacial do tanque de ondas com volumes retangulares.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta uma representação esquemática da posição das sondas localizadas dentro e fora da câmara. A primeira sonda l_1 está localizada a 160 m da borda esquerda do tanque de ondas, a sonda l_2 está localizada $1/3$ de L_1 a partir da borda frontal da câmara e a sonda l_3 está localizado $2/3$ de L_1 a partir da borda frontal da câmara. O ponto p_1 está localizado $1/2$ de L_1 a partir da borda frontal da câmara e $1/2$ de H_1 a partir do nível estático da água. O ponto p_2 encontra-se no ponto médio do bocal de entrada da chaminé.

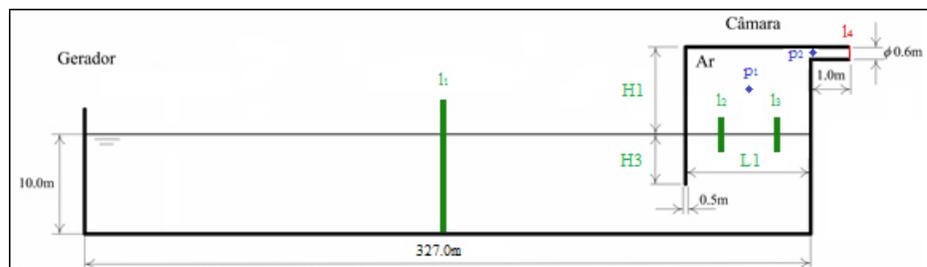


Figura 5. Representação esquemática da posição de sondas localizadas no interior do canal e da câmara OWC.

Os valores temporais de vazão média e pressão total foram registrados por uma sonda numérica posicionada na entrada do duto da turbina, no ponto p_2 . Conhecendo-se a vazão e a pressão, para cada instante de tempo, pôde-se calcular a potência hidropneumática através da Eq. 5. Os valores médios das variáveis que dependem do tempo - vazão mássica, pressão total e potência hidropneumática são representados, para cada valor de razão H_1/L_1 , através de média *RMS* (*Root Mean Square*). Considerou-se a média *RMS*, por ser uma média quadrática a ferramenta mais adequada para representar o valor médio de uma variável que depende do tempo.

$$\dot{W} = \left(\Delta P_{2RMS} + \frac{1}{2} \rho \Delta V_{2RMS}^2 \right) \cdot \dot{V}_{RMS} \quad (5)$$

Onde \dot{W} é a potência temporal média, ΔP é a variação da pressão, V é a velocidade.

A seguir, apresenta-se uma avaliação do desempenho de um dispositivo *OWC* instalado no final deste canal.

A Figura 6 ilustra o comportamento instantâneo da vazão mássica na chaminé do dispositivo. Pode ser observado que há um comportamento oscilante da vazão mássica em decorrência da elevação e redução da superfície livre da onda dentro da câmara hidropneumática. Dessa forma, os resultados mostram que, qualitativamente, o modelo numérico representa adequadamente o comportamento do escoamento.

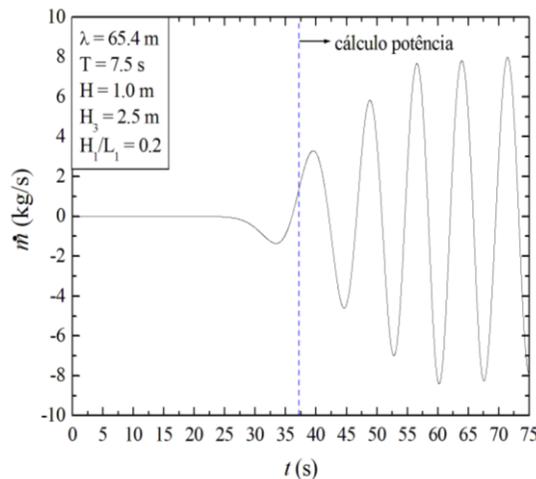


Figura 6. Vazão mássica em função do tempo na chaminé para $H_1/L_1 = 0.2$.

Observar-se que na Fig. 7 a curva apresenta um comportamento oscilante, porém, não simétrico como na vazão mássica, com magnitudes dos picos atingindo valores maiores do que as magnitudes encontradas nos vales. Esta condição se deve, provavelmente, ao fato de a saída se dar para pressão atmosférica e a entrada se dar para a câmara fechada (que possui pressões diferentes da atmosférica).

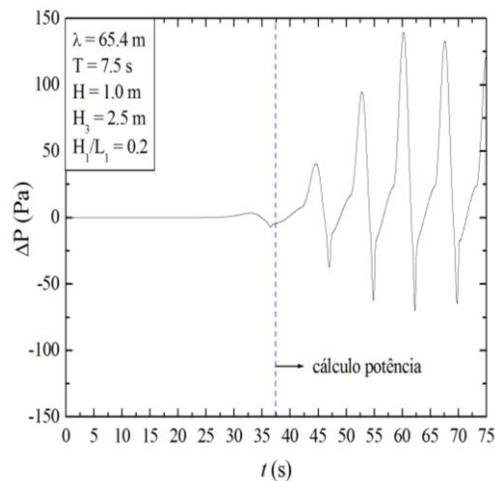


Figura 7. Diferença de pressão na câmara hidropneumática em função do tempo para $H_1/L_1 = 0.2$.

A Figura 8 apresenta variação da potência hidropneumática e da pressão *RMS* com a variação do tempo.

A potência disponível sofre grande oscilação, o que indica a necessidade de algum dispositivo para manter a rotação da turbina e, conseqüentemente, a conversão de energia, para tanto, é utilizado a turbina tipo *Wells* apropriada para escoamentos bidirecionais. Além disso, algumas vezes o escoamento e a diferença de pressão encontram-se defasadas no tempo, o que leva a potências instantâneas de menor magnitude. Isso indica uma necessidade no dimensionamento geométrico da câmara para que a mesma maximize a potência disponível.

Com base na Eq. (5) é possível verificar que a potência disponível é composta pela diferença de pressão, a energia cinética do escoamento e a vazão mássica.

A Figura 9 apresenta a influência valores de H_1/L_1 na vazão mássica *RMS*, em que $H_3 = 2,5$ m e $H_3 = 5,0$ m atingem picos maiores para valores de $H_1/L_1 < 1,0$, e iguais ou inferiores para valores de $H_1/L_1 > 1,5$.

Observa-se que há uma geometria intermediária que conduz a maior vazão mássica e as maiores razões de H_1/L_1 conduzem a resultados ruins de vazão mássica. Estes resultados podem ter como causa provável o escoamento de ar formado pela elevação e redução da superfície livre da onda na câmara hidropneumática não ter intensidade suficiente para chegar na região da chaminé.

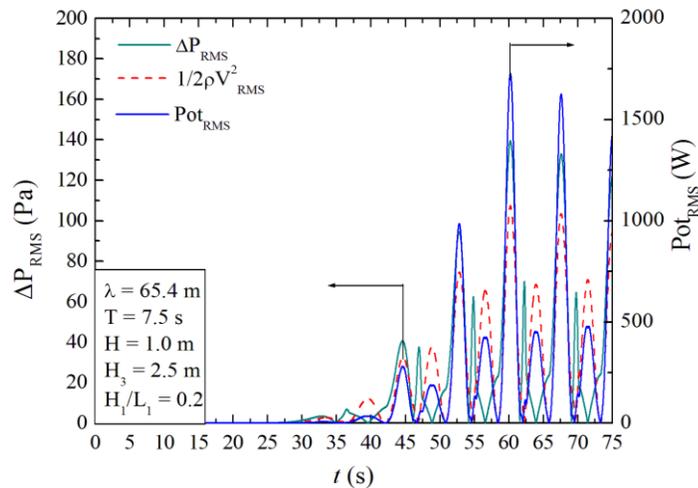


Figura 8. Gráfico de ΔP_{RMS} (estática e dinâmica) em função do tempo para $H_1/L_1 = 0.2$.

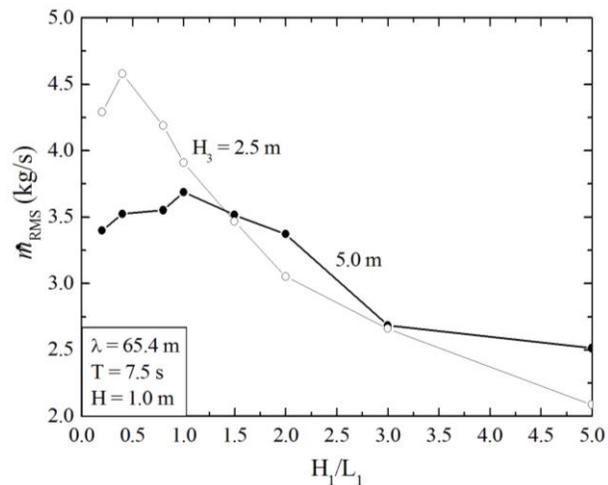


Figura 9. Efeito da razão H_1/L_1 sobre a vazão mássica RMS.

O efeito de H_1/L_1 na pressão está representada nas Fig. 10. Pode-se observar que a maior variação de pressão para $H_3 = 2,5$ m ocorreu com $H_1/L_1 = 0,4$, diferentemente de $H_3 = 5,0$ m, em que a maior variação de pressão foi obtida com $H_1/L_1 = 0,8$. Dessa forma, é possível observar que

a geometria tem influência significativa sobre a vazão mássica e diferença de pressão na câmara hidropneumática.

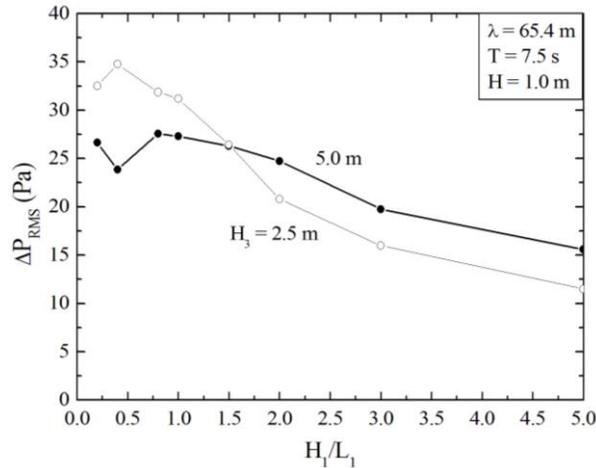


Figura 10. Efeito da razão H_1/L_1 sobre ΔP_{RMS} .

A Figura 11 apresenta uma comparação da ΔP_{RMS} em função do tempo para diferentes casos de H_1/L_1 com a condição $(H_1/L_1)_o = 0,4$. A menor eficiência ocorre com $H_1/L_1 = 5,0$. Observa-se que o caso ótimo teve melhor desempenho em todos os instantes de tempo do que os casos extremos (inferior e superior).

Na Figura 12 apresentam-se os resultados finais das simulações. A geometria ótima foi alterada em função da variável H_3 , sendo que para $H_1/L_1 < 1,5$ o melhor desempenho é obtido para $H_3 = 2,5$ m enquanto que para $H_1/L_1 > 1,5$ o comprimento $H_3 = 5,0$ m começa a apresentar um melhor desempenho. Pode ser observado que uma variável geométrica do dispositivo (no caso a variável H_3) possui influência sobre o efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível do dispositivo. Também pode ser observado que o emprego do *Construtal Design* permitiu maximizar o desempenho em 768,7%.

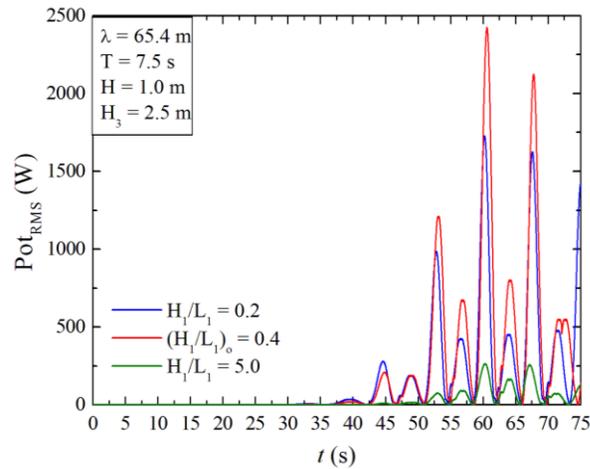


Figura 11. Comportamento instantâneo da Potência RMS para diferentes razões de H_1/L_1 .

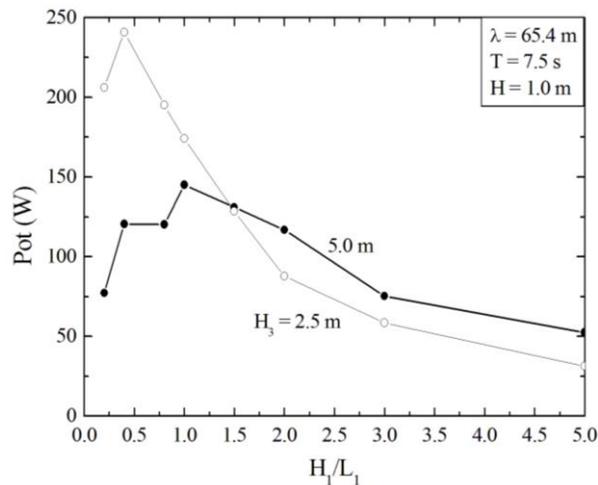


Figura 12. Efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível para duas diferentes magnitudes de H_3 .

CONCLUSÕES

Os resultados mostraram a aplicabilidade do *Constructal Design* para o projeto (recomendação teórica) de dispositivos de conversão de energia das ondas em energia elétrica e o aumento do desempenho para os dois valores de H_3 estudados, mostrando a importância da avaliação geométrica nestes dispositivos. Foi obtida uma recomendação teórica para o projeto de uma câmara hidro-pneumática de um dispositivo de conversão de energia das ondas em energia elétrica do tipo *OWC*, sendo a melhor geometria obtida para $H_3 = 2,5$ m e $(H_1/L_1)_o = 0,4$. Pode-se concluir que não há uma geometria ótima universal que conduz ao dispositivo que irá extrair a maior quantidade de energia das ondas, sendo assim os resultados mostram que o comprimento de H_3 influencia no dimensionamento da geometria da câmara, razão H_1/L_1 .

Para os casos estudados, o desempenho ótimo ocorreu para $H_3 = 2,5$ m do que para $H_3 = 5,0$ m. Contudo, em algumas faixas de H_1/L_1 o desempenho para $H_3 = 5,0$ m mostrou-se melhor do que $H_3 = 2,5$ m, evidenciando novamente que não há uma geometria que leve sempre ao melhor desempenho, sendo necessária uma avaliação local para cada caso. Cabe destacar que as geometrias ótimas foram obtidas para razões intermediárias de H_1/L_1 e que os extremos (principalmente o superior que representa uma câmara de elevada altura) conduzem a piores desempenhos.

AGRADECIMENTOS

Os autores J. A. Souza, L. A. O. Rocha, L. A. Isoldi e E. D. dos Santos agradecem ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa. Todos os autores agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

BEJAN, A. Shape and Structure, from Engineering to Nature, **Cambridge University Press**, Cambridge, UK, 2000.

BEJAN, A., Lorente e Lee, J. Unifying constructal theory of tree roots, canopies and forests. **J. Theor. Biol.**, 2008.

CONDE, J. M. P. e GATO, L. M. C. Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter, **Renewable Energy**, vol. 33, pp. 2637-2644, 2008.

CRUZ, J. e SARMENTO, A. Energia das Ondas – Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais. **Instituto do Ambiente**, 2004.

FLUENT 6.2, 2005. Documentation Manual. Disponível em: <<http://www.fluent.com/software/fluent/index.htm>>.

FLUENT 6.3, 2006. Documentation Manual. Disponível em: <<http://www.fluent.com/software/fluent/index.htm>>.

FLUENT (version 6.3.16), ANSYS, Inc., 2007.

GOMES, M. N., SANTOS, E. D. dos, ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O. Numerical Analysis including Pressure Drop in Oscillating Water Column Device. **Open Engineering**, v. 5, p. 229-237, 2015a.

GOMES, M. N. ; LARA, M. F. E. ; IAHNKE, S. L. P. ; MACHADO, B. N. ; GOULART, M. M.; SEIBT, F. M. ; DOS SANTOS, E. D. ; ISOLDI, L. A. ; ROCHA, L. A. O. Numerical Approach of the Main Physical Operational Principle of Several Wave Energy Converters: Oscillating Water Column, Overtopping and Submerged Plate. **Defect and Diffusion Forum**, v. 362, p. 115-171, 2015b.

HIRT, C. W., NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, **J. Comput. Phys.** 39, 201–225, 1981.

HORKO, M. CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy Converter, Tese de Mestrado em Engenharia e Ciência, Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Western, Australia, 145 p, 2007.

ISOLDI, L. A. ; GRIMMLER, J. DO A. M. ; LETZOW, M. ; SOUZA, J. A. ; GOMES, M. N. ; ROCHA, L. A. O. ; DOS SANTOS, E. D. 3D Numerical Analysis About The Shape Influence Of The Hydro-pneumatic Chamber In An Oscillating Water Column (OWC). **Engenharia Térmica**, v. 14, p. 03-08, 2015.

LING, L., YONGCAN, C. e YULIANG, L. Volume of fluid (VOF) method for curved free surface water flow in shallow open channel, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing, 2001.

LIU, Z., HYUN B. e HONG, K. Application of Numerical Wave Tank to OWC Air Chamber for Wave Energy Conversion, **International Offshore and Polar Engineering Conference**, 2008.

LORENZINI, G., LARA, M. F. E., ROCHA, L. A. O.; GOMES, M. N., SANTOS, E. D. DOS, ISOLDI, . A. 2015. Constructal Design Applied To The Study Of The Geometry And Submergence Of An Oscillating Water Column. **Heat and Technology**, v. 33, p. 31-38, 2015.

LV, X., ZOU, Q. e REEVE, D. Numerical simulation of overflow at vertical weirs using a hybrid level set/VOF method, **Adv. Water Resour.** Vol. 34, pp 1320-1334, 2011.

MARJANI, A, RUIZ, F. C., RODRIGUEZ, M. A. e SANTOS, M. T. P. 2008. Numerical modelling in wave energy conversion Systems. **Energy**, v. 33, no. 8, p. 1246-1253, ago 2008.

OLIVEIRA, L. O. Otimização das dimensões da câmara hidropneumática de um equipamento de extração de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante utilizando a metodologia constructal design. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande – RS, 2012.

Projeto EONDAS - Relatório Final, Petrobras/CENPES e Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Documento de acesso restrito, Rio Grande/RS, 2009.

SCHLAGER, N. e WEISBLATT, J. *Alternative energy*. Thomson Gale, 2006.

SEIBT, F. M., LETZOW, M., GOMES, M. N., SOUZA, J. A., ROCHA, L. A. O., SANTOS, E. D. DOS e ISOLDI, L. A. Computational modeling Applied to the Study of Wave Energy Converters (WEC). **Marine Systems & Ocean Technology**, v. 9, nº 2, pp 77 – 84, Dec 2014.