



## V SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, 07 a 09 de Novembro de 2012

### OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA 2D COM CONSTRUCTAL DESIGN DE UM DISPOSITIVO DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE EM ESCALA DE LABORATÓRIO

M. N. Gomes<sup>1,2</sup>, C. D. Nascimento<sup>1</sup>, B. L. Bonafini<sup>1</sup>, E. D. Santos<sup>3</sup>, L. A. Isoldi<sup>3</sup>, L. A. O. Rocha<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Federal do Paraná – IFPR Campus Paranaguá  
Rua Antônio Carlos Rodrigues 453, Bairro Porto Seguro, Paranaguá, PR, Brasil  
e-mail: [mateus.gomes@ifpr.edu.br](mailto:mateus.gomes@ifpr.edu.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Rua Sarmento Leite, 425, CP. 90050-170, Porto Alegre, RS, Brasil.  
e-mail: [luizrocha@mecanica.ufrgs.br](mailto:luizrocha@mecanica.ufrgs.br)

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio Grande  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica  
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil  
e-mail: [elizaldosantos@furg.br](mailto:elizaldosantos@furg.br) , [liercioisoldi@furg.br](mailto:liercioisoldi@furg.br)

#### RESUMO

*O presente trabalho apresenta um estudo numérico bidimensional sobre a otimização da geometria de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica cujo princípio de funcionamento é o de coluna de água oscilante (CAO), empregando Constructal Design. Neste trabalho o grau de liberdade  $H_1/L$  (razão entre a altura e comprimento da câmara coluna de água oscilante) foi variado, enquanto o outro grau de liberdade:  $H_2/l$  (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) foi mantido fixo. A área da câmara do dispositivo CAO ( $\phi_1$ ) e a área total do dispositivo CAO ( $\phi_2$ ) são mantidas constantes, e são as restrições do problema. Nesse estudo é empregada uma onda com características regulares e com dimensões em escala de laboratório. O objetivo é otimizar a geometria do dispositivo afim de maximizar a potência absorvida pelo dispositivo sujeito a um clima de ondas definido. Para a solução numérica é empregado um código comercial 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. O domínio computacional é representado por um tanque de ondas com um dispositivo CAO acoplado. Assim é possível analisar o conversor sujeito a incidência de ondas regulares. Uma forma ótima é obtida quando  $(H_1/L)_o = 0,84$ . A geometria ótima obtida foi aproximadamente 10 vezes mais eficiente do que a alcançada para a pior configuração geométrica ( $H_1/L = 0.14$ ), mostrando a aplicabilidade de Constructal Design para este tipo de problema.*

**Palavras-chave:** *constructal design, energia das ondas, coluna de água oscilante (CAO), otimização geométrica.*

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios da atualidade está em suprir a demanda energética do mundo, dessa forma, são muitas as discussões a respeito de energia elétrica, no âmbito da geração e principalmente do consumo da mesma. Uma das variáveis para definir o grau de desenvolvimento de um país, é a facilidade de acesso da população aos serviços de infra-estrutura, como saneamento básico, transportes, telecomunicações e energia (ANEEL, 2008).

Por esses aspectos, os países ultimamente têm investido na exploração de novas fontes de energia, e em especial nas chamadas fontes renováveis de energia. E uma dessas que tem merecido destaque é transformação da energia contida nos oceanos em energia elétrica. Segundo Cruz e Sarmento (2004), 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 gravíticos 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. Uma vez criadas às 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. 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.

O critério de classificação adotado para dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, na maioria das referências, está relacionado com a distância do dispositivo à costa. Agrupando-os desta forma em dispositivos costeiros (onshore), com acesso por terra; dispositivos próximos da costa (near-shore), em profundidade de 8 a 20m e dispositivos afastados da costa (offshore), em profundidades acima de 25m (Cruz e Sarmento, 2004).

Uma outra classificação possível está associada ao modo de conversão de energia das ondas em energia elétrica, isto é, ao tipo de dispositivo. Assim, existem fundamentalmente três classes principais de conversores de energia das ondas (Cruz e Sarmento, 2004), que são: coluna de água oscilante (CAO); corpos flutuantes, podendo ser de absorção pontual (point absorbers) ou progressivos (surging devices); e galgamento. Esta classificação não encerra a possibilidade de existirem outros tipos de dispositivos que não se encaixam nesta classificação. Um exemplo é o dispositivo que utiliza uma placa horizontal em conjunto com uma turbina, ambos submersos.

O objetivo deste trabalho é otimizar a geometria de um dispositivo do tipo CAO para o melhor aproveitamento da energia presente no clima de ondas estabelecido. Vale destacar que, neste trabalho é estudado o princípio de funcionamento de um dispositivo CAO. Espera-se que, caso o princípio se mostre adequado para a otimização geométrica de casos mais simplificados, o mesmo possa ser extrapolado para a otimização geométrica de dispositivos reais a serem inseridos no mar. Uma forma de otimização que pode ser empregada é o Constructal Design que é baseado na Teoria Constructal desenvolvida por Adrian Bejan (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012). A Teoria Constructal explica como a geração de estruturas submetidas a alguma espécie de fluxo que são vistas em qualquer lugar na natureza (seção transversal de rios, pulmões, movimentação de massas na atmosfera, tecidos vascularizados entre outros) pode ser fundamentada através de um princípio do acesso aos fluxos no tempo. Este princípio é a Lei Constructal, que afirma que para um determinado sistema persistir ao longo do tempo (sobreviver) sua configuração geométrica deve evoluir de forma a facilitar o acesso das correntes do fluxo através deste sistema (Bejan e Lorente, 2008).

No campo da engenharia, Constructal Design tem sido predominantemente empregado para a otimização geométrica de problemas na área de mecânica dos fluidos e transferência de calor. Em Lopes et al. (2011) o método constructal design foi empregado em um sistema de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO afim de otimizar a relação entre o comprimento de entrada da câmara CAO e o comprimento de saída da chaminé do dispositivo. Além desse estudo, Machado et al. (2012) aplicaram os conceitos de teoria constructal com a finalidade de otimizar um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica baseado no princípio de galgamento. Ambos trabalhos apresentam resultados que mostram a pertinência da aplicação de Constructal Design em sistemas de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica.

Neste trabalho utiliza-se Constructal Design com o objetivo de otimizar o grau de liberdade  $H_1/L$  (razão entre a altura e comprimento da câmara coluna de água oscilante) de modo que quando o dispositivo é submetido a um clima de ondas regular ele possa transformar o máximo possível da potência da onda incidente em potência hidropneumática. O outro grau de liberdade:  $H_2/l$  (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) foi mantido constante. A área da câmara do dispositivo CAO ( $\phi_1$ ) e a área total do dispositivo CAO ( $\phi_2$ ) são mantidas constantes, e são as restrições geométricas do problema.

A modelagem do domínio computacional (câmara e tanque de ondas) foi feita no software GAMBIT<sup>®</sup> e as simulações numéricas foram realizadas com um código computacional implementado no aplicativo de dinâmica dos fluidos computacional FLUENT<sup>®</sup>, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF) (FLUENT, 2007; Versteeg e Malalasekera, 2007). O modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) é aplicado no tratamento da interação água-ar,

semelhante ao utilizado por (Gomes,2010), (Horko, 2007), (Liu et. al. ,2008a), (Liu et. al. ,2008b), (Liu et. al. , 2011) e (Ramalhais , 2011). O domínio computacional é representado por um tanque de ondas com um dispositivo CAO acoplado. Assim é possível analisar o conversor sujeito a incidência de ondas regulares.

## 2. MODELAGEM COMPUTACIONAL DE DISPOSITIVOS CAO

### 2.1. Dispositivo Coluna de Água Oscilante (CAO)

Os dispositivos de coluna d'água oscilante são, basicamente, estruturas ocas parcialmente submersas, abertas para o mar abaixo da superfície livre da água como mostra a Fig. 1. De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), o processo de geração de eletricidade segue duas fases: quando uma onda entra na estrutura o ar que se encontrava dentro dela é forçado a passar por uma turbina, como consequência direta do aumento de pressão na "câmara 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 de ar". Para aproveitar estes movimentos opostos, normalmente, utiliza-se a turbina do tipo Wells, que possui a propriedade de manter o sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento. O grupo turbina/gerador é o responsável pela produção de energia elétrica.

### 2.2. Domínio computacional

A partir do conhecimento das características principais do clima de ondas (período ( $T$ ), altura ( $H$ ) e profundidade de propagação ( $h$ )) é possível determinar o comprimento ( $C_T$ ) e a altura do tanque de ondas ( $H_T$ ) apresentado na Fig. 1. Não existe uma regra geral que estabeleça as dimensões do tanque de ondas, porém algumas questões devem ser consideradas. A profundidade de propagação da onda é a mesma do tanque, representada por  $h$ . Para o comprimento do tanque é preciso considerar o comprimento da onda. É possível definir que o comprimento do tanque deva ser cinco vezes maior que o comprimento da onda. Assim garante-se a simulação numérica da onda sem efeitos de reflexão por um tempo razoável de propagação e sem aumentar desnecessariamente o tamanho do domínio computacional da malha, fator que influencia diretamente no esforço computacional.

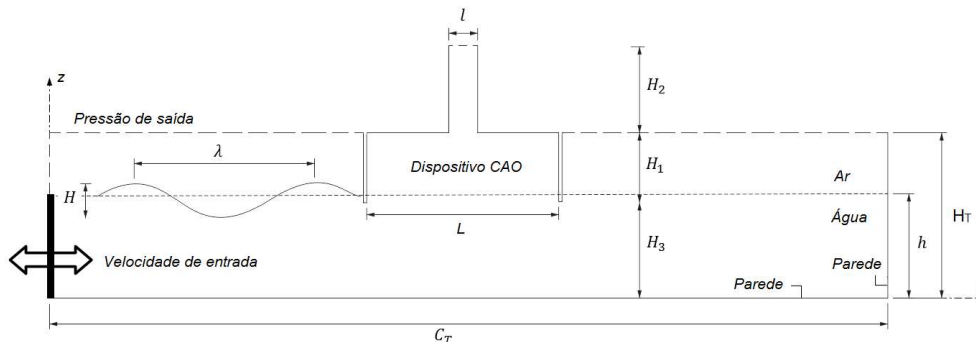


Figura 1. Representação esquemática do domínio computacional.

Com relação à altura do tanque é preciso considerar a profundidade mais a altura da onda. Assim é possível definir que a altura do tanque seja dada pela profundidade mais três vezes a altura da onda. Dessa forma as dimensões dessas características são apresentadas na Tab. 1. Por fim, é importante destacar que a medida  $H_3$  esta relacionada ao quanto o dispositivo CAO esta afundado em relação a superfície livre, para a determinação dessa medida considerou-se um estudo apresentado em (Gomes, 2010) que indica que quando o dispositivo esta afundado em um quarto da altura da onda em consideração tem-se que o dispositivo CAO absorve mais potência da onda incidente.

### 2.3. Condições de contorno

Como é possível observar na Fig. 1, no que diz respeito ao gerador de onda numérico, a condição de contorno é baseada na Metodologia Função empregada em Gomes et. al (2009). Esta metodologia consiste em aplicar ao gerador de ondas uma velocidade de entrada (velocity inlet) através de uma UDF. A velocidade varia em função do espaço e do tempo com base na Teoria de Stokes de 2ª ordem. É importante ressaltar que de acordo com a classificação proposta por Chakrabarti (2005) a onda adotada neste trabalho, descrita na Tab. 1, é considerada de alta ordem, entretanto aqui será considerada como uma onda de segunda ordem uma vez que os termos de alta ordem pouco influenciam na modelagem da propagação da onda. Assim, as equações impostas na superfície de entrada 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 amplitude da onda (m);  $g$  a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);  $\lambda$  é o comprimento da onda (m),  $k$  é o número de onda dado por  $k = 2\pi/\lambda$  (m<sup>-1</sup>);  $h$  é a profundidade (m);  $T$  é o período da onda (s);  $\omega$  é a frequência dada por  $\omega = 2\pi/T$  (Hz);  $x$  é a posição espacial (m);  $t$  é o tempo (s) e  $z$  é a variação da posição entre a superfície livre da água e o fundo do mar (m).

Tabela 1. Características da onda e do tanque.

Características	Valores
Período ( $T$ )	0.800 s
Altura ( $H$ )	0.140 m
Comprimento ( $\lambda$ )	1.000 m
Profundidade ( $h$ )	0.500 m
Comprimento do Tanque ( $C_T$ )	5.000 m
Altura do Tanque ( $H_T$ )	0.800 m
Profundidade da CAO ( $H_3$ )	0,465 m

Com relação às outras condições de contorno, na parte superior da superfície lateral esquerda, bem como na superfície superior do tanque e da saída da chaminé da CAO é aplicada uma condição de contorno de pressão atmosférica (vide superfície tracejada da Fig. 1). Nas demais superfícies do tanque de ondas: superfície inferior e superfície lateral direita é imposta uma condição de não-deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula. Com relação às condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso.

É possível ainda destacar uma equação que descreve o movimento da superfície livre de forma analítica:

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

onde  $z$  é variação da posição da superfície livre da água até o fundo do mar. Maiores detalhes desta teoria podem ser encontrados em McCormick (1976) e Dean e Dalrymple (1991).

### 3. FORMULAÇÃO CONSTRUTAL

Para aplicar *Constructal Design* na otimização geométrica de um sistema físico é necessário, basicamente, um objetivo (uma grandeza a ser otimizada: vazão mássica, potência, energia e etc), graus de liberdade (parâmetros geométricos que podem variar durante o processo de otimização) e restrições geométricas (parâmetros que são mantidos constantes ao longo do processo de otimização).

Neste trabalho o objetivo é maximizar a potência que passa através da chaminé do dispositivo CAO variando-se o grau de liberdade  $H_1/L$  (razão entre a altura e comprimento da câmara coluna de água oscilante) e mantendo-se as restrições e outros graus de liberdade constantes, ver Fig. 1, de modo que quando o dispositivo é submetido a um clima de ondas regular ele possa transformar o máximo possível da potência da onda incidente em potência hidropneumática.

Para o presente trabalho são impostas duas restrições geométricas globais: a área da entrada do dispositivo CAO ( $\phi_1$ ) e a área total do dispositivo CAO ( $\phi_2$ ), que são dadas respectivamente por:

$$\phi_1 = H_1 L \quad (4)$$

$$\phi_2 = \phi_1 + H_2 l \quad (5)$$

Além disso, o grau de liberdade  $H_2/l$  (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) é mantido fixo para todas as simulações realizadas ( $H_2/l = 3.0$ ).

#### 4. MODELO MATEMÁTICO E NUMÉRICO

O método *volume of fluid* é um modelo numérico multifásico que permite tratar adequadamente da interação entre água e ar no interior do tanque de ondas. Nessa formulação, a superfície livre pode ser identificada pela fração de volume ( $f$ ) variável. Dentro de cada célula da malha (elemento), se  $f = 1$  o elemento contém somente água. Quando  $f = 0$  então a célula contém somente ar e quando  $0 < f < 1$ , tem-se a existência de água e ar simultaneamente na célula. Somente um conjunto de equações da continuidade e momentum são escritas para ambos os fluidos no modelo VOF. Para um fluido Newtoniano, as equações da continuidade e do momentum pode ser escritas como (FLUENT, 2006; Gomes et al., 2009):

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (7)$$

onde  $\vec{v}$  é o vetor velocidade (m/s),  $\rho$  é a massa específica (kg/m<sup>3</sup>),  $t$  o tempo (s),  $\vec{g}$  o vetor aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>),  $p$  a pressão (Pa) e  $\vec{\tau}$  o tensor tensão (Pa). A fração volumétrica é modelada adicionando ao sistema uma equação de transporte para  $f$  tal que:

$$\frac{\partial (\rho f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho f \vec{v}) = 0 \quad (8)$$

Como já foi dito, para a solução das equações de conservação da massa e quantidade de movimento, foi empregado o software FLUENT<sup>®</sup>, que é um código comercial baseado no MVF (FLUENT, 2006). Para todas as simulações foi considerado o esquema de advecção *upwind* para tratamento dos termos advectivos, enquanto a discretização espacial para a pressão foi realizada através do método PRESTO e o método GEO-RECONSTRUCTION para a fração volumétrica. Quanto ao acoplamento pressão-velocidade foi empregado o método PISO. Além disso, empregaram-se os fatores de sub-relaxação para as equações da conservação da massa e quantidade de movimento de 0.3 e 0.7, respectivamente. Todas as soluções foram realizadas usando computadores com 2 processadores AMD Athlon com 3.0 Gb de memória RAM. Para reduzir o tempo de processamento das simulações foi empregada a técnica do processamento paralelo disponibilizada pelo software FLUENT<sup>®</sup> (FLUENT, 2006).

#### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo Volume of Fluid vem sendo largamente empregado para a simulação numérica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica. Validações e verificações desse modelo numérico aplicado a energia das ondas do mar, e principalmente dispositivos do tipo CAO, podem ser encontradas em Horko (2007), Liu et. al. (2008a), Liu et. al. (2008b), Gomes et. al (2009), Gomes (2010), Ramalhais (2011), Liu et. al. (2011) e Gomes et. al (2012).

Neste estudo foram adotados os seguintes valores para as constantes do problema:  $\phi_1 = 0.14$ ,  $\phi_2 = 0.20$  e  $H_2/l = 3.0$ . Assim, variando o grau de liberdade  $H_1/L$  é possível calcular as dimensões dos dispositivos CAO. Os casos e as dimensões geométricas das simulações empregadas neste trabalho podem ser vistas na Tab. 2. Destaca-se que para a escolha do valor de  $\phi_1$  considerou-se a situação inicial, Caso 1, em que o comprimento do dispositivo CAO ( $L$ ) é igual ao comprimento da onda incidente ( $\lambda$ ), e posteriormente o comprimento  $L$  foi diminuindo em relação a  $\lambda$ .

Tabela 2. Variações da geometria do dispositivo CAO.

Caso	$H_1/L$	$L$ [m]	$H_1$ [m]	$L$ [m]	$H_2$ [m]
1	0.14	1.0000	0.1400	0.1414	0.4242
2	0.28	0.7071	0.1979	0.1414	0.4242
3	0.42	0.5773	0.2424	0.1414	0.4242
4	0.56	0.5000	0.2800	0.1414	0.4242
5	0.70	0.4472	0.3130	0.1414	0.4242
6	0.84	0.4082	0.3429	0.1414	0.4242
7	0.98	0.3779	0.3704	0.1414	0.4242
8	1.26	0.3333	0.4200	0.1414	0.4242
9	2.24	0.2500	0.5600	0.1414	0.4242

Em todos os casos foi utilizada uma malha com volumes quadrados de 0.01 m × 0.01 m e um avanço no tempo de 0.001 s. Considerando as características mencionadas na Tab. 1 e ilustradas na Fig. 1 define-se que o dispositivo CAO esta a uma distância de 2.00 m a direita do gerador de ondas, ou seja, dois comprimentos de onda. Dessa forma estima-se que a propagação da onda fique estável, na região do dispositivo CAO, após a geração da terceira onda, ou seja, quando  $t \geq 2.4$  s. Em todos os casos foram consideradas a propagação de oito ondas (4.8 s), espaço de tempo em que ainda não aparecem os efeitos de reflexão da onda, uma vez que o tanque de ondas possui  $C_T = 5.00$  m.

Foram analisados comportamento da vazão mássica (na saída da chaminé do dispositivo CAO), a pressão (no interior da câmara CAO), bem como a potência hidropneumática absorvida ao longo do tempo. Para as análises foi considerado o intervalo de tempo  $2.4 \text{ s} \leq t \leq 4.8 \text{ s}$ . Para calcular os valores médios foi considerada a média RMS (Root Mean Square), dada pela seguinte equação indicada por Marjani et. al. (2006):

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (9)$$

As médias obtidas para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática são apresentadas na Tab. 3. É importante destacar que na saída da chaminé do dispositivo CAO é considerada a condição de pressão atmosférica, desconsiderando assim a perda de carga ocasionada pela turbina o que causaria um aumento de pressão no interior da câmara CAO. Para avaliar a potência hidropneumática é utilizada a seguinte expressão, utilizada por Dizadji e Sajadian (2011) Oliveira (2012):

$$P_{hid} = \left( P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (10)$$

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

De acordo com os resultados apresentados na Tab. 3, quando o grau de liberdade  $H_1/L$  é variado tem-se que os valores médios (RMS) máximos da vazão mássica, pressão e potência hidropneumática, concentram-se entre os casos 3 e 7, ou seja, para um comprimento de dispositivo CAO entre 0.37m e 0.57 m o equivalente a aproximadamente 1/3 e 1/2, respectivamente, do comprimento da onda em consideração que é de 1.00 m. Esse fato fica mais evidente ainda com a Fig. 2a e 2b. Porém definimos que o critério de otimização é a potência hidrodinâmica absorvida pelo dispositivo CAO, assim conforme a Fig. 2b é possível definir a geometria do caso 6 como ótima, quando se tem  $H_1/L = 0,84$ , um comprimento de entrada da câmara CAO  $L = 0,4082$  m (o equivalente a aproximadamente 2/5 do comprimento da onda incidente) e altura da câmara CAO  $H_1 = 0,3429$  (o equivalente a 7/20 da altura da onda incidente).

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

Caso	$H_1/L$	Vazão mássica [kg/s] média	Pressão [Pa] Média	Potência [W] média	Potência [W] Um período	Eficiência [%]
1	0.14	0.3450	3.9048	0.0823	0.3437	2.23
2	0.28	0.5321	5.950	0.2135	1.8668	12.16
3	0.42	0.6065	7.0401	0.3146	2.9860	19.45
4	0.56	0.6267	7.4167	0.3503	3.5033	22.82
5	0.70	0.6300	7.3061	0.3541	3.5529	23.14
6	0.84	0.6244	7.6967	0.3671	3.6677	23.89
7	0.98	0.6159	7.6392	0.3638	3.6007	23.46
8	1.26	0.5881	7.3223	0.3379	3.2858	21.40
9	2.24	0.5382	6.7528	0.2922	2.7607	17.98

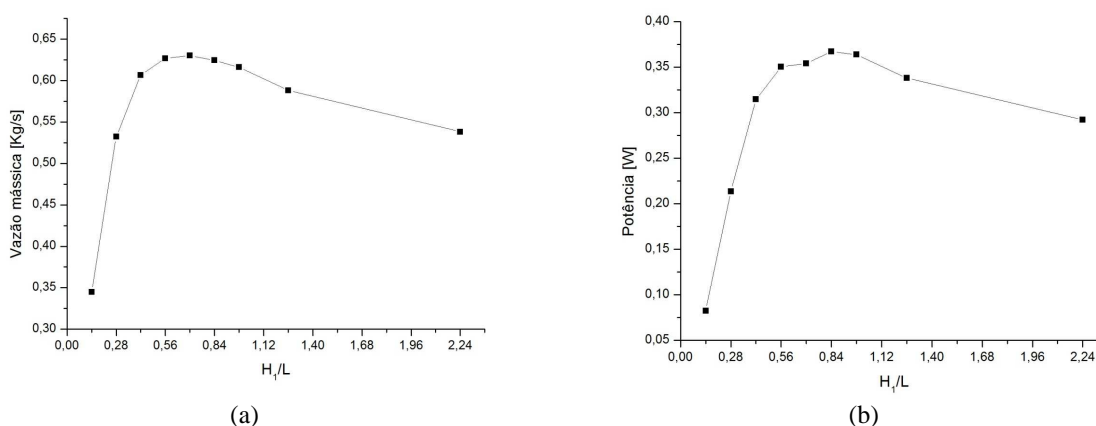


Figura 2. Média RMS para os casos considerados (a) Vazão mássica, (b) Potência.

Um outro aspecto que corrobora o caso 6 como caso ótimo é a eficiência do dispositivo. Conforme apresentado em Gomes (2010) podemos definir a eficiência do dispositivo CAO como sendo a razão entre a potência hidropneumática (absorvida pelo dispositivo CAO) e a potência da onda incidente. De acordo com, McCormick (1981), a potência da onda incidente a um dispositivo CAO é dada pela seguinte expressão:

$$P_i = \frac{\rho g}{8} H^2 c_g b \left[ 1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{k^4 h^6} \right] \quad (11)$$

onde:  $\rho$  é densidade da água ( $998.2 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade,  $H$  a altura da onda,  $c_g$  a celeridade da onda,  $b$  a largura do dispositivo CAO,  $k$  o número de onda e  $h$  a profundidade de água. Com as características da onda considerada tem-se que a potência da onda incidente por metro de frente de onda é  $15.3481 \text{ W}$ . Lembrando que como estamos tratando de casos bidimensionais a largura de todos os dispositivos CAO é considerada unitária. Além disso, se está trabalhando em uma escala de laboratório, fato este que explica a magnitude de energia incidente não ser muito elevada. Assim calcula-se a potência hidropneumática absorvida pelo CAO ao longo de um período da onda ( $4.0 \text{ s} \leq t \leq 4.8 \text{ s}$ ), de acordo com o apresentado na Tab. 3. Vale destacar ainda que, os valores de eficiência obtidos são promissores uma vez que nesse estudo não foi considerado a perda de carga ocasionada pela influência da turbina no duto de saída do dispositivo CAO, o que faz com que a pressão no interior do dispositivo aumente consideravelmente (aumentando a intensidade do mecanismo motriz do escoamento que passa pela turbina).

## 6. CONCLUSÕES

Uma forma ótima é obtida quando  $(H_1/L)_o = 0.84$ , isto é, o caso 6. A geometria ótima obtida foi aproximadamente 10 vezes eficiente do que a alcançada para a pior configuração geométrica ( $H_1/L = 0.14$ ), mostrando a aplicabilidade de *Constructal Design* para este tipo de problema. Em termos de eficiência o melhor caso absorve cerca de 20% a

mais de potência em relação ao pior caso, ainda que não foi considerado a perda de carga ocasionada pela influência da turbina no duto de saída do dispositivo CAO, o que faz com que a pressão no interior do dispositivo aumente consideravelmente

Os resultados obtidos são promissores, pois fornecem, através da otimização geométrica com *Constructal Design*, uma recomendação teórica a respeito de uma geometria de dispositivo CAO de modo que se aproveite uma maior quantidade de energia da onda oceânica. Outro fator importante é que de acordo com a formulação constructal adotada a geometria do dispositivo CAO está atrelada às características da onda. Assim conhecendo o clima de ondas é possível indicar quais as melhores dimensões geométricas a serem adotadas de forma a se captar mais potência da onda.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal do Rio Grande (FURG), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Instituto Federal do Paraná (IFPR) e ao CNPq pelo suporte financeiro (Processo: 555695/2010-7). L. A. O. Rocha também agradece o CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aneel, 2008, "Atlas de Energia Elétrica no Brasil", Agência Nacional de Energia Elétrica. 3ª edição, Brasília.
- Bejan, A., 2000, "Shape and Structure, from Engineering to Nature". Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Bejan, A., Lorente, S., 2008, "Design with Constructal Theory". Wiley, Hoboken.
- Bejan, A., Zane J., 2012, "Design in nature", Doubleday, USA.
- Chakrabarti, S. K., 2005. "Handbook of offshore engineering", vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 661 p.
- Cruz, J. M. B. P., Sarmiento, A. J. N. A., 2004 "Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais", Ed. Instituto do Ambiente, Amadora, Portugal, 61 p.
- Dizadji N., Sajadian S. E., 2011, "Modeling and optimization of the chamber of OWC system", Energy, v. 36, p. 2360 – 2366.
- FLUENT (version 6.3.16), ANSYS, Inc., 2006.
- 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, v. 8, p. 44-50.
- 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 (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil.
- Gomes, M. das N. ; Isoldi, L. A; Santos E. D.; Rocha, L. A. O., 2012, "Análise de malhas para geração numérica de ondas em tanques", Em Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. São Luiz, MA, Brasil. Paper no. 1434.
- Horko, M., 2007, CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy converter, Tese de Mestrado em Engenharia e Ciência, Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Western, Austrália, 145 p.
- Liu, Z.; Hyun B.; Hong, K., 2008a, "Application of Numerical Wave Tank to OWC Air Chamber for Wave Energy Conversion". International Offshore and Polar Engineering Conference.
- Liu, Z.; Hyun B.; Jin, J., 2008b, "Numerical prediction for overtopping performance of OWEC". Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, v. 11, n.1, p. 35-41.
- Liu, Z.; Hyun B.; Hong, K., 2011, "Numerical study of air chamber for oscillating water column wave energy converter", China Ocean Eng., v.25, p.169-178.
- Lopes, N. et al., 2012, "Constructal design optimization of the geometry of an oscillating water column wave energy converter (OWC-WEC)", In Proceedings Constructal law conference, UFRGS, Porto Alegre.
- Machado, B.N., et. Al., 2012, "Constructal design of an overtopping wave energy converter", In Proceedings constructal law conference, UFRGS, Porto Alegre.
- Marjani A. E. e t Al, 2006, "3D unsteady flow simulation in an owc wave converter plant", In Proceedings International Conference on Renewable Energy and Power Quality, Mallorca, Espanha.
- McCormick, M. E., 1981, "Ocean Energy Conversion", John Wiley & Sons, New York.
- Ramalhas, R. dos S., 2011, Estudo numérico de um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO). Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Versteeg, H. K.; Malalasekera, W., 2007, An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method, Pearson, England.

## 9. AVISO DE RESPONSABILIDADE

O(s) autor(es) é(são) os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste paper