



08 a 11 de Outubro de 2018  
Instituto Federal Fluminense  
Búzios - RJ

## **AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE DIFERENTES FORMATOS GEOMÉTRICOS QUADRILATERAIS DA CÂMARA HIDROPNEUMÁTICA DE CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR EM ENERGIA ELÉTRICA DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE SUBMETIDOS À INCIDÊNCIA DE ONDAS REGULARES**

**Mateus das Neves Gomes**<sup>1</sup> – mateus.gomes@ifpr.edu.br

**Liércio André Isoldi**<sup>2</sup> – liercioisoldi@furg.br

**Elizaldo Domingues dos Santos**<sup>3</sup> – elizaldosantos@furg.br

**Luiz Alberto Oliveira Rocha**<sup>4</sup> – luizor@unisinos.br

<sup>1</sup> Instituto Federal do Paraná, Campus Paranaguá – Paranaguá, PR, Brasil

<sup>2,3</sup> Universidade Federal do Rio Grande – Rio Grande, RS, Brasil

<sup>4</sup> Universidade do Vale do Rio dos Sinos – São Leopoldo, RS, Brasil

**Resumo.** Este trabalho aborda a simulação numérica e a análise geométrica de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica, que tem como princípio de funcionamento a Coluna de Água Oscilante (CAO). O objetivo é avaliar a influência da forma geométrica da câmara hidropneumática na potência hidropneumática disponível pelo dispositivo quando submetido a uma onda regular. Para tanto são analisados quatro formatos geométricos quadriláteros: i) Retângulo (RT), ii) Trapézio (TP), iii) Trapézio Invertido (TI) e iv) Duplo Trapézio (DT). É empregado o Design Construtal para a avaliação geométrica. O grau de liberdade analisado foi  $H_1/L$  (razão entre a altura e o comprimento de entrada da câmara hidropneumática). As restrições do problema são a área de entrada e a área total da câmara CAO que são mantidas constantes. Para a solução numérica é empregado um código de dinâmica dos fluidos computacional, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). O modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) é aplicado no tratamento da interação água-ar. Os resultados obtidos indicaram que quando os formatos de Retângulo (RT) e de Trapézio Invertido (TI) são adotados a potência hidropneumática é maior em relação aos demais formatos geométricos analisados.

**Palavras-chave:** Coluna de Água Oscilante (CAO), Constructal Design, Volume of Fluid, Energia das ondas, Ondas regulares.

### **1. INTRODUÇÃO**

A crescente demanda energética no mundo, a realidade do esgotamento dos combustíveis fósseis e a sua variabilidade nos preços têm acelerado o desenvolvimento de projetos relacionados a fontes alternativas de energia. Uma dessas possibilidades é a conversão da

energia das ondas do mar em energia elétrica. O oceano é uma enorme fonte de energia renovável com potencial para satisfazer uma porcentagem importante do abastecimento de eletricidade do mundo.

Uma possibilidade são os dispositivos cujo princípio de funcionamento é o de Coluna de Água Oscilante (CAO), que são estruturas como a mostrada na Fig. 1. Observa-se que uma parte é submersa na água, aberta para o mar abaixo da superfície livre, enquanto outra contém apenas ar. A transformação de energia, segundo Cruz e Sarmiento (2004), acontece de duas maneiras: quando uma onda entra na estrutura o ar que se encontrava dentro dela é forçado a passar por uma turbina devido ao aumento de pressão no interior da câmara; ou quando a onda regressa ao mar o ar passa novamente na turbina no sentido inverso devido à diminuição de pressão no interior da câmara. Por conta de serem movimentos opostos, é recomendado que a utilização de turbinas do tipo Wells, devido a sua propriedade de sempre manter o sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento. Quando a turbina é ligada num gerador, então ocorre a produção de energia elétrica (Cruz e Sarmiento, 2004; Nielsen et al., 2006; Twidell e Weir, 2006; Gomes, 2010).

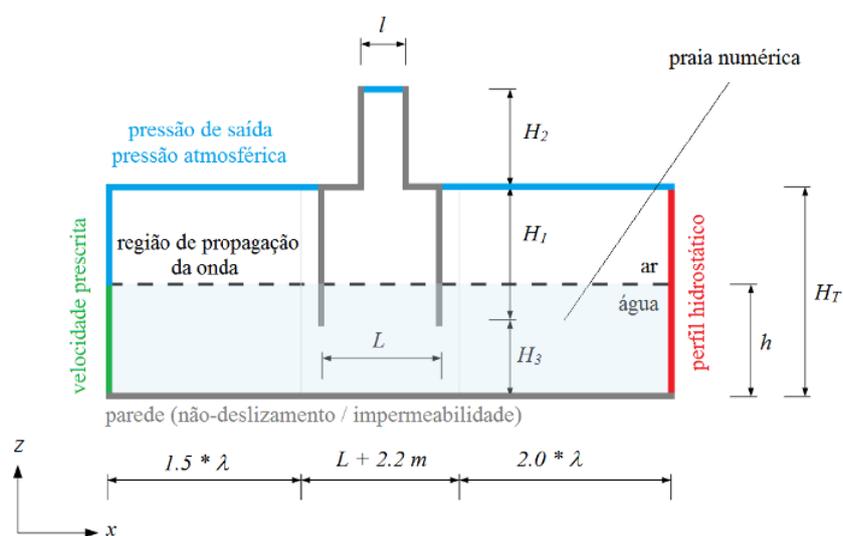


Figura 1 – Representação esquemática do domínio computacional.

Uma das formas de desenvolver tecnologias e/ou dispositivos capazes de converter a energia das ondas do mar em energia elétrica é através de experimentos numéricos que abordem o princípio de funcionamento do dispositivo conversor de energia elétrica tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), em que a modelagem computacional pode ser realizada através do método *Volume of Fluid* (VOF) proposto por Hirt e Nichols (1981). Esse método é recomendado para escoamentos multifásicos em que há dois ou mais fluidos com uma interface muito bem definida, que no presente estudo são o ar e a água. Versteeg e Malalasekera (2007) propõe a solução das equações deste modelo matemático através do Método dos Volumes Finitos (MVF). Uma estratégia para a análise geométrica que pode ser empregada é o Design Construtal que é baseado na Teoria Construtal desenvolvida por Adrian Bejan (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012; Bejan e Lorente, 2013). Em Gomes (2014) o Design Construtal foi empregado para a análise geométrica de dispositivos do tipo CAO.

O objetivo deste trabalho é analisar a influência da forma geométrica da câmara hidropneumática na potência hidropneumática disponível pelo dispositivo quando submetido a uma onda regular. Para tanto são analisados quatro formatos geométricos quadrilaterais: i)

Retângulo (RT), ii) Trapézio (TP), iii) Trapézio Invertido (TI) e iv) Duplo Trapézio (DT), sendo empregado o Design Construtal para a análise geométrica.

## 2. ASPECTOS COMPUTACIONAIS

### 2.1 Representação Computacional

Como ilustrado na Fig. 1, uma maneira de representação computacional da interação fluido estrutura, ou seja, da incidência das ondas oceânicas em dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica é considerar um tanque de ondas, com a inserção do dispositivo a ser analisado, conforme empregado nos trabalhos de Horko, 2007; Liu *et al.*, 2008a e Gomes, 2009. A técnica consiste em gerar numericamente ondas regulares (com características constantes) e/ou ondas irregulares (através de um espectro de ondas oceânicas).

Para este estudo, as seguintes características foram adotadas: ondas regulares com período  $T = 7,5$  s; altura  $H = 1$  m; comprimento de onda  $\lambda = 65,35$  m e profundidade de propagação  $h = 10$  m, com o tanque de ondas inicialmente em repouso. Já o tanque de ondas possui altura total  $H_T = 14$  m enquanto o conversor CAO possui uma profundidade de submersão  $H_3 = 9,5$  m. As demais dimensões (ver Fig. 1) são variadas de acordo com a análise proposta neste trabalho e serão definidas posteriormente.

### 2.2 Condições de Contorno e malha

No que diz respeito às condições de contorno, o gerador de ondas numérico foi posicionado na lateral esquerda do tanque (linha verde na Fig. 1), como condição de contorno de velocidade prescrita. Para a geração de ondas regulares, com características constantes, é empregada a Metodologia Função, definida em Gomes *et al.* (2009). Esta metodologia consiste em aplicar as componentes horizontal ( $u$ ) e vertical ( $w$ ) da velocidade da onda como condição de contorno (velocidade de entrada prescrita) no modelo computacional. Essas componentes da velocidade variam em função do espaço e do tempo e são baseadas na Teoria de Stokes de 2ª ordem. Assim, as equações impostas são dadas por (Dean e Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005):

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

$$w = Agk \frac{\text{senh}(kz + kh)}{\omega \text{senh}(kh)} \text{sen}(kx - \omega t) + A^2 \omega k \frac{\text{senh} 2k(k + z)}{\cos^4(kh)} \text{sen} 2(kx - \omega t) \quad (2)$$

Em que:  $H$  é a altura da onda (m);  $g$  a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );  $\lambda$  é o comprimento da onda (m);  $k$  é o número de onda, dado por  $k = 2\pi/\lambda$  ( $\text{m}^{-1}$ );  $h$  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).

A elevação da superfície livre é dada por (Dean e Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005):

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

Com relação às partes superior esquerda, superior do tanque e da chaminé (linhas em azul na Fig. 1), foi aplicada uma condição de contorno de pressão atmosférica. Nas demais regiões destacadas na cor cinza (paredes) é imposta uma condição de não-deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula. Com relação às condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso, com profundidade  $h = 10,0$  m. Na região da extremidade direita do tanque, após o dispositivo CAO, vide Fig. 1, é considerada uma praia numérica bem como um perfil hidrostático na extremidade direita do tanque de ondas (linha vermelha na Fig. 1). Dessa forma os efeitos de reflexão da onda são eliminados. Essa técnica é uma abordagem totalmente numérica. O método de praia numérica consiste no acréscimo de termos de sorvedouro nas equações de quantidade de movimento em uma determinada região do domínio. A equação relacionada a essa grandeza é dada por (Lisboa *et al.*, 2016; ANSYS, 2016):

$$S = - \left[ C_1 \rho V + \frac{1}{2} C_2 \rho |V|V \right] \left( 1 - \frac{z - z_{fs}}{z_b - z_{fs}} \right) \left( \frac{x - x_s}{x_e - x_s} \right)^2 \quad (4)$$

Em que:  $C_1$  é o coeficiente de resistência linear;  $C_2$  é o de resistência quadrática;  $V$  é o módulo da velocidade do fluido no ponto  $(x, z)$ , em que  $x$  é uma coordenada horizontal e  $z$  vertical;  $\rho$  é a massa específica;  $z_{fs}$  e  $z_e$  são os valores de coordenadas da média da superfície livre e do fundo;  $x_s$  e  $x_e$  são as posições de início e de fim da praia numérica e  $S$  é um termo de sorvedouro de quantidade de movimento.

Para a geração da malha, uma metodologia baseada na técnica de malhas *stretched* (Mavripilis, 1997) foi adotada. Isso significa dizer que em certas regiões de interesse do domínio computacional a malha é mais refinada, como é o caso da região da superfície livre, de acordo com as recomendações de Gomes (2014) e Lisboa (2016). Na região onde está localizado o dispositivo CAO, é considerada uma malha regular com quadriláteros de 0,1 m.

### 3. CONSTRUCTAL DESIGN PARA A ANÁLISE DA FORMA GEOMÉTRICA

A Teoria Construtal explica como a geração de estruturas submetidas a alguma espécie de fluxo/escoamento que são vistas em qualquer lugar na natureza (secção transversal de rios, pulmões, movimentação de massas na atmosfera, tecidos vascularizados, entre outros) pode ser fundamentada através de um princípio do acesso aos fluxos/escoamentos no tempo. Este princípio é a lei Construtal, 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/escoamento através deste sistema (Bejan e Lorente, 2008).

O Design Construtal é um método empregado para a permitir a avaliação de formas geométricas de sistemas submetidos a alguma espécie de fluxo. De acordo com este método o fluxo é maleável e a geometria é deduzida a partir de um princípio de maximização do desempenho global. Além disso, a geometria deve ser submetida a restrições globais e variada de acordo com seus graus de liberdade (Bejan, 2000). Para aplicar o Design Construtal na avaliação geométrica de um sistema físico é necessário um parâmetro de performance (grandeza a ser avaliada: vazão mássica, potência, energia, 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 avaliação).

O objetivo deste trabalho é, através do Design Construtal, analisar a influência da forma geométrica da câmara hidropneumática na potência hidropneumática disponível pelo dispositivo quando submetido a uma onda regular. Para tanto são analisados quatro formatos geométricos quadriláteros, conforme apresentado na Fig. 2: i) Retângulo (RT), ii) Trapézio (TP), iii) Trapézio Invertido (TI) e iv) Duplo Trapézio (DT).

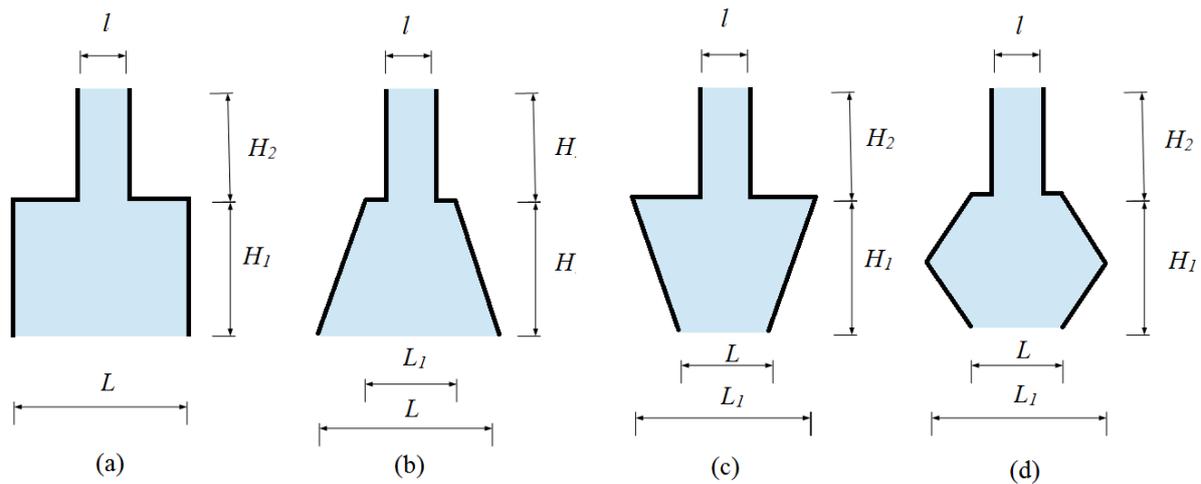


Figura 2 – Formatos geométricos quadrilaterais de dispositivos CAO .

Nos quatro diferentes tipos de formatos geométricos apresentados na Fig. 2 é analisado o grau de liberdade  $H_1/L$  (razão entre a altura e comprimento da câmara CAO). A relação  $H_2/l$  (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) e  $H_3$  (profundidade de submersão da câmara CAO) são mantidas constantes. A área de entrada da câmara hidropneumática ( $A_E$ ) e a área total do dispositivo CAO ( $A_T$ ), respectivamente, são mantidas constantes, iguais em todos os quatro casos indicados na Fig. 2, e são as restrições geométricas do problema.

A área de entrada da câmara hidropneumática quando a forma geométrica é um Retângulo (RT), vide Fig. 2, é dada por:

$$A_{E(RT)} = H_1 L \quad (5)$$

E quando a área de entrada da câmara hidropneumática é um Trapézio (TP), um Trapézio Invertido (TI) ou um Duplo Trapézio (DT), vide Fig. 2, respectivamente é calculada por:

$$A_{E(TP, TI, DT)} = \frac{(L + L_1)}{2} H_1 \quad (6)$$

A área total para os quatro casos é calculada por:

$$A_{T(RT, TP, TI, DT)} = A_{E(RT, TP, TI, DT)} + H_2 l \quad (7)$$

A partir da Eq. (5) é possível obter uma equação que determina a dimensão para o comprimento ( $L$ ) da câmara hidropneumática CAO, quando a mesma tem o formato de um retângulo (RT):

$$L_{(RT)} = \left[ \frac{A_{E(RT)}}{\left(\frac{H_1}{L}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

A partir da Eq. (6) é possível obter uma equação que determina a dimensão para o comprimento ( $L$ ) da câmara hidropneumática CAO, quando a mesma tem formato de um trapézio (TP):

$$L_{(TP)} = \left[ \frac{6 A_{E(TP)}}{5 \left(\frac{H_1}{L}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Neste trabalho a relação  $L_1/L$  é mantida constante sendo dada pela seguinte relação:

$$L_{1(TP)} = \frac{2}{3} L_{(TP)} \quad (10)$$

A partir da Eq. (6) é possível obter uma equação que determina a dimensão para o comprimento ( $L$ ) da câmara hidropneumática CAO, quando a mesma tem formato de um trapézio invertido (TI) e de um duplo trapézio (DT):

$$L_{(TI,DT)} = \left[ \frac{4 A_{E(TI,DT)}}{5 \left( \frac{H_1}{L} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Para ambos os casos, TI e DT, a relação  $L_1/L$  é mantida constante e definida, arbitrariamente, a seguinte relação:

$$L_{1(TI,DT)} = \frac{3}{2} L_{(TI,DT)} \quad (12)$$

Para todos os quatro casos, a partir da Eq. (8), Eq. (9) e Eq. (11) pode ser calculada a altura da câmara hidropneumática ( $H_1$ ):

$$H_1 = L_{(RT,TP,TI,DT)} \left( \frac{H_1}{L} \right) \quad (13)$$

E a partir da Eq. (7) é possível obter as equações que determinam as dimensões para o diâmetro ( $l$ ) e a altura ( $H_2$ ) da chaminé, respectivamente:

$$l_{(RT,TP,TI,DT)} = \left[ \frac{A_{T(RT,TP,TI,DT)} - A_{E(RT,TP,TI,DT)}}{\left( \frac{H_2}{l} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$H_2 = l_{(RT,TP,TI,DT)} \left( \frac{H_2}{l} \right) \quad (15)$$

Vale destacar que a relação  $H_2/l$  é mantida constante,  $H_2/l = 3.0$ , e a profundidade de submersão também é considerada constante  $H_3 = 9,5$  m, para todas as simulações realizadas.

O objetivo é sempre levar em consideração o clima de ondas para a variação da geometria do dispositivo CAO. Assim, como critério para a definição da restrição da área de entrada da câmara hidropneumática ( $A_E$ ) considera-se a situação inicial em que o comprimento do dispositivo CAO ( $L$ ) é igual ao comprimento da onda incidente ( $\lambda$ ) e que a altura do dispositivo CAO ( $H_1$ ) é igual à altura da onda incidente ( $H$ ). Para determinar a restrição da área total do dispositivo CAO ( $A_T$ ) é definido que  $A_E$  representa 70 % de  $A_T$ , conforme indicado em Gomes (2014).

As funções objetivo a serem consideradas ao longo deste trabalho são a média RMS das seguintes grandezas: vazão mássica, pressão e potência hidropneumática.

#### 4. MODELO MATEMÁTICO E NUMÉRICO

O método *Volume of Fluid* (VOF), desenvolvido por Hirt e Nichols (1981), é utilizado nesse trabalho. O método VOF é um modelo multifásico usado para a solução de escoamentos compostos de dois ou mais fluidos imiscíveis. Nesta formulação todas as fases são definidas e o volume ocupado por uma fase não pode ser ocupado por outra fase. Assim, para representar as fases contidas em cada volume de controle é necessário o conceito da fração de volume ( $\alpha$ ). Consequentemente, é necessário que a soma de todas as fases em cada célula seja sempre igual a um. No modelo numérico apresentado neste trabalho somente duas fases são consideradas: a água e o ar. Portanto, as células com valores de  $\alpha_{\text{água}}$  entre 0 e 1 contém a interface entre água e ar (neste caso  $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$ ). As que possuem  $\alpha_{\text{água}} = 0$  estão sem água

e completas de ar ( $\alpha_{ar} = 1$ ); e, por sua vez, as que apresentam  $\alpha_{ar} = 0$  estão cheias de água ( $\alpha_{água} = 1$ ).

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) \quad (16)$$

a equação da fração volumétrica:

$$\frac{\partial (\rho \alpha_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \alpha_q \vec{v}) = 0 \quad (17)$$

E as equações de quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \left( \vec{\tau} \right) + \rho \vec{g} \quad (18)$$

Em que:  $\rho$  é a massa específica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ );  $t$  é o tempo (s);  $\vec{v}$  é o vetor velocidade do escoamento (m/s);  $p$  é a pressão estática ( $\text{N/m}^2$ );  $\mu$  é a viscosidade ( $\text{kg/(ms)}$ );  $\vec{\tau}$  é o tensor de tensões ( $\text{N/m}^2$ ) e  $\vec{g}$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ). Uma vez que as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas para a mistura de ar e água, é necessário calcular valores médios para a massa específica e a viscosidade, respectivamente:

$$\rho = \alpha_{água} \rho_{água} + \alpha_{ar} \rho_{ar} \quad (19)$$

$$\mu = \alpha_{água} \mu_{água} + \alpha_{ar} \mu_{ar} \quad (20)$$

Para solucionar as equações da conservação da massa e da quantidade de movimento foi empregado um código baseado no Método de Volumes Finitos – MVF (ANSYS, 2016). Para todas as simulações, o método PRESTO foi utilizado para a discretização espacial da pressão, enquanto que o método GEO-RECONSTRUCTION foi utilizado para a fração volumétrica. O método PISO foi utilizado para o acoplamento pressão-velocidade. Para solucionar o sistema de equações gerado após a discretização foi utilizado o método Gauss Seidel com *multigrid* algébrico.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cabe destacar que validações e verificações do modelo VOF aplicado à energia das ondas do mar, e principalmente dispositivos do tipo CAO, podem ser encontradas em Horko (2007), Gomes *et al.* (2009), Gomes (2010), Ramalhais (2011), Liu *et al.* (2011) e Gomes (2014). Sendo assim, as mesmas não serão reproduzidas aqui.

Ao todo foram analisadas 32 diferentes configurações geométricas obtidas das Eqs. (5-15), sendo oito variações de  $H_1/L$  por formato geométrico. Para as análises foram considerados 4 ciclos de incidência da onda nos respectivos dispositivos CAO, o equivalente a 30 s, no seguinte intervalo de tempo:  $20 \text{ s} < t < 50 \text{ s}$ . A escolha deve-se ao fato de que neste intervalo a incidência da onda ocorre de forma plena sem efeitos de reflexão.

Uma forma de avaliar o efeito de pistão no interior da câmara CAO é através do fator de amplificação. O mesmo é definido normalizando a altura média de elevação da superfície

livre na câmara CAO ( $H_m$ ) pela altura da onda incidente ( $H$ ),  $H_m / H$  (Ramalhais, 2011). Na Fig. 3(a) é apresentado o comportamento do fator de amplificação em relação à variação do grau de liberdade  $H_1/L$  para os quatro diferentes formatos geométricos de câmara hidropneumática testados. Da Fig. 3(a) é possível notar que a partir de  $H_1/L = 0,06$  o fator de amplificação tende a estabilizar para todos os casos analisados e os valores são ligeiramente diferentes. A exceção é o formato DT que para valores de  $H_1/L > 0,085$  causam uma diminuição no valor da relação  $H_m/H$ .

Para calcular os valores médios da vazão mássica, pressão e potência hidropneumática foi considerada a média RMS (*Root Mean Square*), dada pela seguinte equação, usada em Gomes (2014):

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (21)$$

onde:  $x$  é a variável de interesse e  $N$  é o número de valores considerado na média.

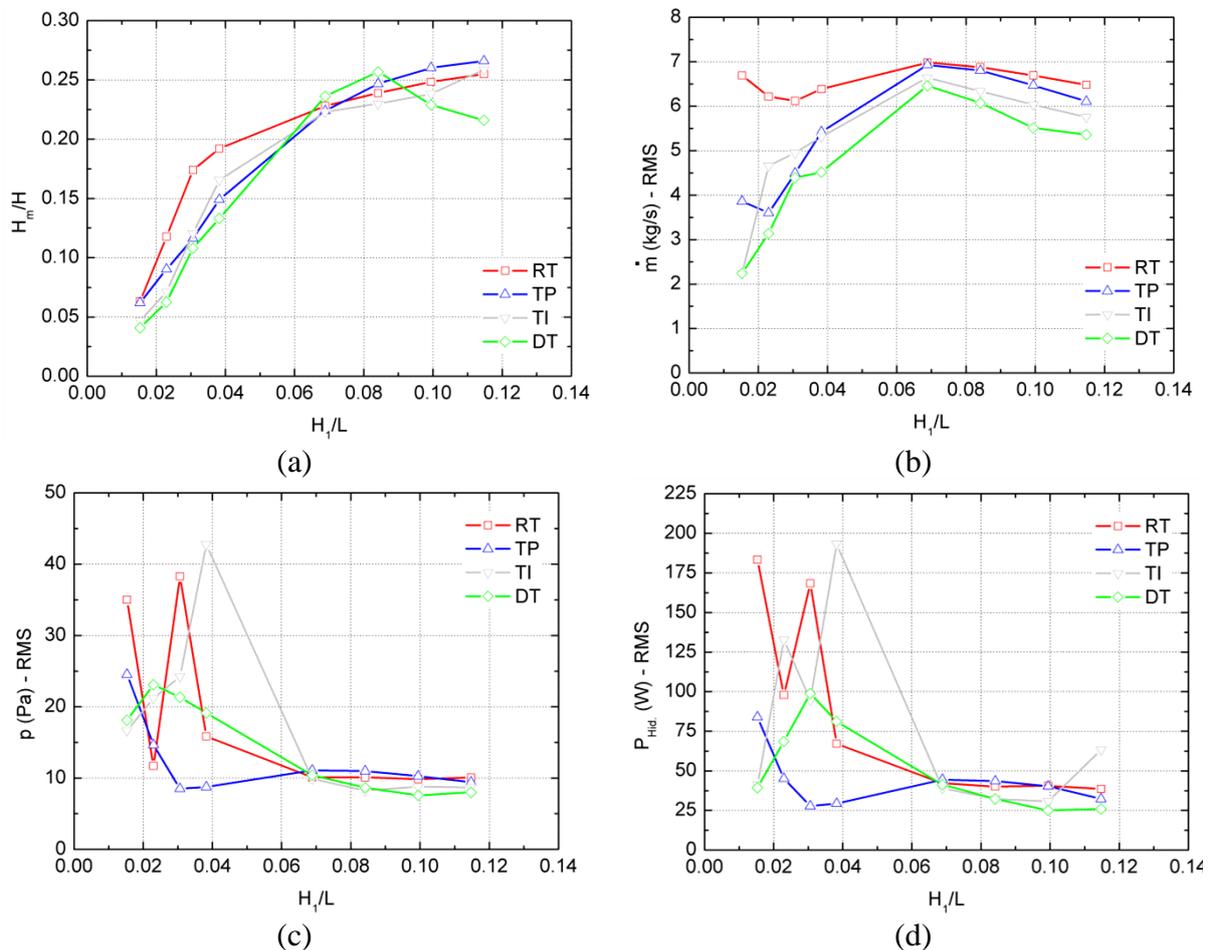


Figura 3 – Resultados obtidos a partir da variação de  $H_1/L$  para: (a) fator de amplificação, (b) média RMS da vazão mássica, (c) média RMS da pressão e (d) média RMS da potência hidropneumática.

Conhecendo-se a vazão mássica e a pressão é possível calcular a potência hidropneumática através da seguinte expressão (Dizadji e Sajadian, 2011):

$$P_{Hid} = \left( P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \left( \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \right) \quad (22)$$

Em que:  $P_{ar}$  é a pressão estática na chaminé do dispositivo CAO (Pa);  $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ );  $\dot{m}$  é a vazão mássica de ar no duto da turbina ( $\text{kg/s}$ ) e  $v_{ar}$  é a velocidade do ar no duto da turbina ( $\text{m/s}$ ), que pode ser dada por:

$$v_{ar} = \frac{\dot{m}}{A \rho_{ar}} \quad (23)$$

sendo  $A$  a área da secção transversal da chaminé ( $\text{m}^2$ ).

Na Fig. 3(b) é apresentado o comportamento RMS da vazão mássica em relação à variação de  $H_1/L$ , observa-se um aproveitamento máximo quando  $H_1/L = 0,0719$ . Além disso, quando é adotado o formato RT a vazão mássica é maior em relação aos casos TP, TI e DT. É importante destacar que quando  $H_1/L = 0,0719$  tem-se uma relação entre o comprimento de entrada da câmara hidropneumática ( $L$ ) e o comprimento da onda incidente ( $\lambda$ ) igual a:  $L/\lambda = 0,5$ , similar ao apresentado em Gomes (2014) para formatos retangulares.

No que diz respeito à pressão, observa-se da Fig 3(c) que quando são adotados os formatos RT e TI são obtidos os maiores valores RMS, próximos a  $H_1/L = 0,04$ , o equivalente a  $L/\lambda = 0,6$ , que também foi obtido em Gomes (2014). Por fim, na Fig. 3(d) é possível notar que os maiores valores RMS para a potência hidropneumática também ocorrem quando os formatos RT e TI são adotados.

## 6. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico com o objetivo de analisar a influência da forma geométrica da câmara hidropneumática na potência hidropneumática disponível pelo dispositivo quando submetido a uma onda regular. Para tanto foram analisados quatro formatos geométricos quadrilaterais: i) Retângulo (RT), ii) Trapézio (TP), iii) Trapézio Invertido (TI) e iv) Duplo Trapézio (DT). Além disso, foi empregado o Design Construtal para a análise geométrica. Os resultados obtidos para os diferentes arranjos geométricos analisados, estão em consonância com os apresentados na literatura para câmaras hidropneumáticas retangulares.

Para as condições de ondas e parâmetros assumidos, os resultados obtidos indicaram que quando os formatos de retângulo e de trapézio invertido são adotados a potência hidropneumática é maior em relação aos demais formatos geométricos analisados. Futuros estudos serão realizados com outras condições de ondas e variando outros parâmetros geométricos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal do Paraná (IFPR), à Universidade Federal de Rio Grande (FURG), à Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISSINOS), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

- Ansys (2016), “Theory Guide FLUENT 2016”.
- 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.
- Bejan, A., Lorente, S. (2013), “Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society”. Journal of Applied Physics, Vol. 113, pp.151301-1 – 151301-20.
- 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, 61 p.
- Dean, R. G., Dalrymple, R.A. (1991), “Water wave mechanics for engineers and scientists”, vol. 2, World Scientific, Singapura, 353 p.
- Dizadji N., Sajadian S. E., (2011), “Modeling and optimization of the chamber of OWC system”, Energy, Vol. 36, pp. 2360 – 2366.
- 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. N. (2014), “Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante”. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil.
- Hirt, C.W. , Nichols, B.D. (1981). “Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries”. Journal of Computational Physics, vol. 39, n. 1, pp. 201-225.
- 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. (2011), “Numerical study of air chamber for oscillating water column wave energy convertor”. China Ocean Eng., v.25 ,p.169-178.
- Lisboa, R.C., Teixeira, P.R.F., Didier, E. (2016), “Simulação de propagação de ondas regulares e irregulares em um canal bidimensional com praia numérica”. VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. Rio Grande do Sul: FURG.
- Mavriplis, D. J., (1997), “Unstructured Grid Techniques”. Annual Reviews Fluid Mechanics , Vol. 29, pp: 473-514.
- Nielsen, F. G., Andersen, M., Argyriadis, K., Butterfield, S., Fonseca, N., Kuroiwa, T., Boulluec, M. L. E., Liao, S. J., Turnock, S. R, Waegter, J. (2006), “Ocean wind and wave energy utilization”, ISSC, Southampton.
- 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.
- Twidell, J., and Weir, T. (2006). “Renewable Energy Resources”, Taylor & Francis, London. Wavegen, 2011, in: [http://www.wavegen.co.uk/what\\_we\\_offer\\_limpet\\_islay.htm](http://www.wavegen.co.uk/what_we_offer_limpet_islay.htm).
- Versteeg, H. K., Malalasekera, W., (2007), “An Introduction to Computational Fluid Dynamics”, Malaysia : Pearson.

## NUMERICAL EVALUATION OF DIFFERENT QUADRILATERAL GEOMETRIC FORMATS FOR THE HYDROPNEUMATIC CHAMBER OF SEA WAVE ENERGY CONVERTERS INTO ELECTRIC ENERGY OF OSCILLATING WATER COLUMN TYPE SUBMITTED TO INCIDENT REGULAR WAVES

**Abstract.** *This work addresses the numerical simulation and the geometrical analysis of a sea wave energy converter into electric energy, which has as operating principle the Oscillating Water Column (OWC). The goal is to evaluate the influence of the geometric shape of the hydropneumatic chamber in the hydropneumatic power available by the device when submitted to a regular wave. To do so, it were analyzed four quadrilateral geometric formats: i) Rectangle (RT), ii) Trapeze (TP), III) Inverted Trapeze (TI) and iv) Double Trapeze (DT). It was employed the Constructal Design for the geometric evaluation. The analyzed degree of freedom was  $H/L$  (ratio between the height and length of the hydropneumatic chamber entrance). The problem constraints are the entrance area and the total area of the CAO chamber that were kept constant. For the numerical solution it was used a Computational Fluid Dynamics (CFD) code, based on the Finit Volume Method (FVM). The multiphase Volume of Fluid (VOF) model was applied in the treatment of water-air interaction. The obtained results indicated that when the Rectangle (RT) and the Inverted Trapeze (TI) shapes are adopted the hydropneumatic power is higher if compared with the other analyzed geometric formats.*