



REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

**MODELAGEM COMPUTACIONAL E MÉTODO CONSTRUCTAL DESIGN
APLICADOS A UM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR DO TIPO
COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE (CAO) ANALISANDO A INFLUÊNCIA EM SEU
DESEMPENHO DA VARIAÇÃO DA RAZÃO ENTRE O VOLUME DE ENTRADA E
O VOLUME TOTAL DA CÂMARA HIDROPNEUMÁTICA¹**

CÂNDILA BEATRIZ PLAMER², YURI THEODORO BARBOSA DE LIMA³, LIÉRCIO
ANDRÉ ISOLDI⁴, ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS⁴, LUIZ ALBERTO
OLIVEIRA ROCHA⁵, MATEUS DAS NEVES GOMES⁶

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

²Mestrado em Modelagem Computacional na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), candilabeatriz@hotmail.com .

³Mestrado em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), yuri_vo@hotmail.com .

⁴Professor na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), liercioisoldi@furg.br, elizaldosantos@furg.br .

⁵Professor na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), luizrocha@mecanica.ufrgs.br

⁶Professor no Instituto Federal do Paraná (IFPR), mateus.gomes@ifpr.edu.br .

Resumo – O presente trabalho trata de simular numericamente o princípio de funcionamento do conversor do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), considerando uma onda regular em escala real. O objetivo é avaliar a influência da razão entre o volume de entrada da câmara hidropneumática (V_E) e volume total da câmara (V_T) no desempenho de um conversor do tipo CAO. São analisados nove valores diferentes para a relação V_E/V_T . Através do *Constructal Design* é analisada a geometria que conduz ao melhor desempenho, buscando maximizar a conversão da energia das ondas regulares em energia elétrica, sendo a potência disponível, considerada a função objetivo do problema. Foi estudado o grau de liberdade razão entre a altura da câmara hidropneumática (H_1) e o comprimento da câmara (L). O domínio computacional é representado por um tanque de ondas, com o dispositivo CAO acoplado. O software FLUENT foi empregado na solução numérica das equações, baseada no Método dos Volumes Finitos (MVF). A construção da geometria e a geração da malha foram realizadas no software GAMBIT. Na interação entre as fases ar e água foi aplicado o método *Volume of Fluid* (VOF). Foi observado que ao alterar a relação entre os volumes de entrada e total do dispositivo CAO (V_E/V_T), a pressão aumenta e a vazão mássica não é influenciada pela variação dessa relação. Conclui-se que, o que contribui na maximização da vazão mássica é a relação (H_1/L). A pressão é influenciada pela razão V_E/V_T . A potência é uma composição do gradiente de pressão e vazão mássica.

Palavras-chave - Coluna de Água Oscilante, Energia das Ondas regulares, *Constructal Design*.

**COMPUTATIONAL MODELING AND CONSTRUCTAL DESIGN
METHOD APPLIED TO A SWING ENERGY CONVERTER OF THE OSCILLANT
WATER COLUMN (CAO) TYPE SEA WAVE ANALYZING THE INFLUENCE IN
ITS PERFORMANCE OF THE VARIATION OF THE REASON BETWEEN THE
INPUT VOLUME AND THE TOTAL VOLUME OF THE HYDROPNEMATIC
CHAMBER**

Abstract - The present work tries to numerically simulate the operating principle of the Oscillating Water Column (CAO) converter, considering a regular wave in real scale. The objective of this study was to evaluate the influence of the ratio between the entrance volume of the hydropneumatic chamber (V_E) and the total volume of the chamber (V_T) in the

performance of a CAO. Nine different values are analyzed for the V_E/V_T ratio. Through Constructal Design the geometry that leads to the best performance is analyzed, seeking to maximize the conversion of the energy of the regular waves into electrical energy, being the available power, considered the objective function of the problem. The degree of freedom in the ratio between the height of the hydropneumatic chamber (H_1) and the length of the chamber (L) was studied. The computational domain is represented by a wave tank, with the CAO device coupled. The FLUENT software was used in the numerical solution of the equations, based on the Finite Volume Method (MVF). The construction of the geometry and the generation of the mesh were performed in the GAMBIT software. In the interaction between the air and water phases the Volume of Fluid (VOF) method was applied. It was observed that when the relation between the input and total volumes of the device CAO (V_E/V_T) changes, the pressure increases and the mass flow rate is not influenced by the variation of this relation. It is concluded that, what contributes in the maximization of the mass flow rate is the ratio (H_1/L). The pressure is influenced by the V_E/V_T ratio. Power is a composition of the pressure gradient and mass flow.

Key words - Oscillating Water Column, Regular Wave Energy, Constructal Design.

INTRODUÇÃO

Possuindo um grande potencial energético ainda não explorado, os oceanos representam o maior de todos os recursos naturais, podendo contribuir de forma significativa para as necessidades crescentes de energia em nível mundial. O potencial energético dos oceanos está distribuído sob diferentes formas, das quais a energia das ondas se destaca por concentrar a maior parte deste recurso (Cruz e Sarmento, 2004).

Para realizar a transformação de energia das ondas regulares em energia elétrica, existem diversos tipos de conversores com diferentes classificações. Os dispositivos podem ser classificados quanto ao seu local de instalação: dispositivos costeiros (*onshore*), em regiões com profundidades de até 20 m, e que são geralmente presos ao fundo; dispositivos próximos à costa (*nearshore*), situados em regiões com profundidades entre 20 e 50 m, podem ser presos ao fundo ou flutuantes; dispositivos afastados da costa (*offshore*), situados em regiões com profundidades maiores que 50 m, são geralmente flutuantes. A classificação dos conversores de energia das ondas quanto ao seu princípio de funcionamento pode ser: Coluna de Água Oscilante (CAO), Galgamento e Corpos Oscilantes (Cruz e Sarmento, 2004).

Entre as diferentes tecnologias de conversão de energia das ondas regulares em energia elétrica, a que tem mais se destacado, em número de projetos, é a baseada no princípio CAO.

Neste trabalho, o objetivo é através da modelagem computacional atrelada ao método *Constructal Design*, simular numericamente o princípio de funcionamento do conversor tipo CAO. Através do método de busca exaustiva é avaliada a influência da relação entre o volume de entrada da câmara hidropneumática (V_E) e o volume total do dispositivo CAO (V_T), visando maximizar a conversão de energia das ondas regulares em energia elétrica. Para essa relação são analisados nove diferentes valores de V_E/V_T , e para cada valor da relação são testados dez valores diferentes para o grau de liberdade H_l/L , que é definido pela razão entre a altura (H_l) e o comprimento da câmara hidropneumática (L).

O método *Constructal Design* é baseado na Teoria *Constructal* desenvolvida por Adrian Bejan (Bejan e Lorente, 2013; Bejan e Zane, 2012). A teoria *Constructal* explica deterministicamente como são geradas as formas de fluxo na natureza (bacias hidrográficas, pulmões, circulação atmosférica, forma de animais, tecidos vasculares, etc.) com base em um princípio evolutivo de acesso, de forma fácil, ao fluxo no tempo (Bejan e Lorente, 2013). Existe uma gama de trabalhos os quais se utilizam do método *Constructal Design* para a otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, dentre eles destacam-se as pesquisas desenvolvidos por: (Gomes et al. 2009; Gomes et al. 2012; Gomes et al. 2013; Gomes, 2014; Oliveira, 2012; Espinel, 2014; Lima et al. 2015a e Lima et al. 2015b).

MATERIAIS E MÉTODOS

ENERGIA DAS ONDAS REGULARES E SUAS TECNOLOGIAS

Energia dos oceanos

Nos oceanos as ondas superficiais são geradas pela interação dos ventos com a superfície. Ao soprarem paralelos à superfície, os ventos transferem energia cinética para o mar e uma parte desta energia acaba por gerar as ondas. A quantidade de energia transferida do vento para a superfície do mar vai depender da intensidade do vento, do tempo de atuação deste vento e da pista, ou seja, da área sobre a qual está atuando a tempestade. Sendo assim, quanto maior a velocidade, o tempo e a pista, maior será a onda resultante. No entanto, para

cada situação existem dimensões máximas que a onda pode atingir, ou seja, as ondas não crescem indefinidamente (Trujillo e Thurman, 2011).

De fato, as ondas não passam de energia solar concentrada, já que são geradas pelo movimento dos ventos que, por sua vez, são gerados pelo aquecimento desigual da superfície terrestre. A maior parte das ondas é gerada em regiões de tempestade, onde os ventos em geral são mais fortes e a superfície do mar se torna caótica. Depois de geradas as ondas se propagam até encontrar um local de dissipação de energia, como uma praia (Fleming, 2012).

A energia total em uma onda, conforme (Dean e Dalrymple, 1991) é a combinação da energia potencial, devido ao deslocamento vertical da superfície da água, com a energia cinética, devido ao movimento oscilatório da onda, e é expressa por:

$$E_T = E_C + E_P = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (1)$$

sendo: ρ a massa específica da água do mar (kg/m^3), g aceleração gravitacional (m/s^2), H a altura da onda (m), E_C a energia cinética (J) e E_P a energia potencial (J).

O total estimado do recurso energético oriundo das ondas é em torno de aproximadamente 2 TW equivalendo ao consumo médio mundial de energia elétrica se essa fosse convertida em sua plenitude (Cruz e Sarmento, 2004).

Dispositivos coluna de água oscilante (CAO)

O princípio básico de funcionamento do dispositivo de CAO, conforme (Cruz e Sarmento, 2004) se dá através do ar, que é comprimido ou expandido no interior de uma câmara hidropneumática (de concreto ou aço), parcialmente submersa, na qual há uma abertura sob a superfície livre da água. O ar fica situado acima da superfície livre da água. As ondas incidentes fazem oscilar a superfície livre da água no interior da câmara, comprimindo e expandindo o ar. Quando a crista de uma onda incide no dispositivo, o movimento das ondas pressiona o ar que se encontra no interior do dispositivo, que é forçado a passar por uma chaminé acionando uma turbina (do tipo Wells ou de impulso), como consequência direta do aumento de pressão na câmara de ar. Quando a cava da onda incide no dispositivo as ondas retornam sugando o ar que passa novamente na turbina, mas no sentido inverso, dada a pressão inferior no interior da câmara de ar.

As turbinas do tipo Wells são preferencialmente utilizadas, pois apresentam capacidade de conservar o seu sentido de rotação, independente do sentido do fluxo do ar. O grupo turbina/gerador é o responsável pela produção de energia elétrica.

A câmara CAO é o dispositivo mais avançado em quantidade e duração de protótipos testados no mar, há inclusive algumas centrais de piloto instaladas. O mecanismo CAO, pode ser representado por quatro componentes principais: câmara hidropneumática, chaminé, turbina e gerador. Com relação as suas dimensões as mesmas estão apropriadamente para o tipo de onda local (Gomes, 2014).

Constructal design

O *Constructal Design* é um método que relacionando graus de liberdade, restrições e função objetivo, busca avaliar a influência da geometria no desempenho de um determinado sistema (Bejan e Zane, 2012). Se um método de busca exaustiva for associado ao método *Constructal Design*, diversas configurações geométricas serão testadas e então será possível determinar a geometria ótima que maximiza o desempenho do sistema.

A Lei *Constructal* mostra qual é a tendência da natureza e com isso permite obter uma melhor condição de fluxo. Usando essa lei é possível projetar processos de forma orgânica e dinâmica para obter melhores ou mais eficientes resultados (Bejan e Zane, 2012).

De acordo com Rocha et al. (2005), a teoria *Constructal* faz uma relação entre as geometrias da engenharia com as naturais, originando uma função objetivo. A proposta deste trabalho é, através de uma abordagem numérica, analisar o efeito da influência da relação V_E/V_T (Volume de entrada da câmara hidropneumática V_E e o Volume total do dispositivo V_T) no desempenho de um dispositivo CAO, considerando uma onda em escala real. É possível observar na Fig. 1 a geometria de um dispositivo do tipo CAO, que será submetida à incidência de ondas regulares em um tanque.

Onde, H a altura da onda (m), λ o comprimento da onda incidente (m), L o comprimento da câmara CAO (m), H_1 a altura da câmara (m), l o diâmetro da chaminé (m), H_2 altura da chaminé (m), H_3 a profundidade de submersão (m), h a profundidade (m), C_T o comprimento do tanque (m) e H_T a altura do tanque (m).

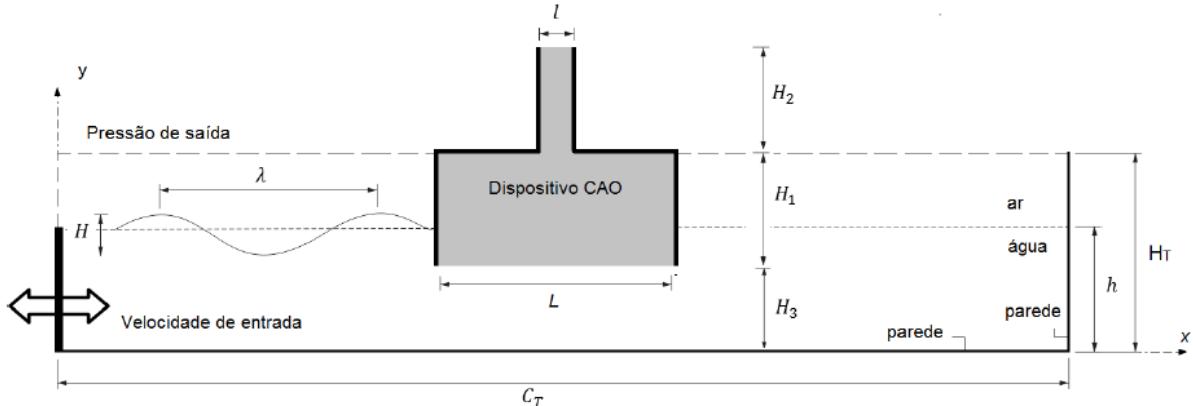


Figura 1: Representação esquemática do domínio computacional 2D (Gomes, 2014).

Nesse estudo é analisado o grau de liberdade de H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática). As relações: $H_2/l = 3,0$ (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) e $H_3 = 9,5$ m (profundidade de submersão do conversor CAO) são mantidas constantes. O volume de entrada da câmara hidropneumática do dispositivo CAO é mantido constante $V_E = 37,60 \text{ m}^3$, enquanto o volume total (V_T) é variado, sendo V_E/V_T a restrição geométrica do problema. Consequentemente, para que essa variação de V_T ocorra, é necessário que o volume da chaminé (V_C) varie. Os volumes V_E , V_C e V_T , são definidos por:

$$V_E = H_1 L L_1 \quad (2)$$

$$V_C = H_2 l L_1 \quad (3)$$

$$V_T = V_E + V_C = V_E + H_2 l L_1 \quad (4)$$

A bidimensionalidade é uma condição de escoamento, de modo que a dimensão L_1 (largura da câmara CAO) é mantida constante e igual a um.

A partir da equação que define V_E , variando o grau de liberdade H_1/L é possível obter equações que determinam as dimensões para o comprimento (L) e para a altura (H_1) da câmara hidropneumática, respectivamente:

$$L = \left[\frac{V_E}{\left(\frac{H_1}{L} \right) L_1} \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$H_1 = L \left(\frac{H_1}{L} \right) \quad (6)$$

E, a partir da Equação de V_T , considerando o grau de liberdade H_2/l , é possível obter as equações que determinam as dimensões para o diâmetro (l) e a altura (H_2) da chaminé da câmara hidropneumática, respectivamente:

$$l = \left[\frac{V_T - V_E}{\left(\frac{H_2}{l} \right) L_1} \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$H_2 = l \left(\frac{H_2}{l} \right) \quad (8)$$

Visando sempre levar em conta uma onda bem definida para a variação da geometria do dispositivo CAO, como critério para a definição da restrição do volume de entrada da câmara hidropneumática (V_E), considera-se a situação inicial em que o comprimento da câmara hidropneumática (L) é igual ao comprimento da onda incidente (λ) e que a altura da câmara hidropneumática (H_1) é igual à altura da onda incidente (H) e $L_1 = 1$, com isso a equação para V_E pode ser reescrita da forma, $V_E = H\lambda$.

Até então, como em Gomes (2014), por exemplo, para determinar a restrição do volume da chaminé (V_C) era definido que a razão $V_E/V_T = 0,7$.

Deste modo, neste trabalho são testados diferentes valores para a relação V_E/V_T , dando continuidade ao estudo apresentado em Gomes (2014), que estudou seis valores para a profundidade de submersão: $H_3 = 9,0$ m, $H_3 = 9,25$ m, $H_3 = 9,50$ m, $H_3 = 9,75$ m, $H_3 = 10,0$ m, e $H_3 = 10,25$ m para uma onda de $T = 5$ s, $\lambda = 37,60$ m, $H = 1,00$ m e $h = 10$ m. Em seu estudo Gomes (2014), obteve para profundidade de submersão ótima $H_3 = 9,50$ m, valor este, que será considerado fixo no presente trabalho.

Modelagem matemática e numérica

Modelo volume of fluid (VOF)

O modelo VOF tem sido empregado para simulações numéricas de conversores de energia das ondas do mar. A validação desta metodologia pode ser encontrada na literatura como em (Gomes, (2009); Rocha, (2005); Horko, (2007); Liu et al. (2008); e Gomes et al. 2012).

A metodologia VOF consiste em reproduzir a interação entre os fluidos envolvidos na simulação numérica do dispositivo do tipo CAO, que são o ar e a água neste caso. 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 (α). Define-se a fração volumétrica, como sendo uma variável, contínua no espaço e no tempo, que representa a presença de um fluido no interior do volume de controle.

Consequentemente, é necessário que a soma de todas as fases em cada célula seja sempre igual a um ($\alpha_{ar} + \alpha_{água} = 1$).

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. As equações de continuidade, fração volumétrica e equações de quantidade de momento são definidas respectivamente por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial (\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \left(\mu \vec{\tau} \right) + \rho \vec{g} \quad (11)$$

onde: ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3), t é o tempo (s), \vec{v} é o vetor velocidade do deslocamento (m/s), p é a pressão estática (N/m^2), μ é a viscosidade dinâmica (kg/m.s), é o $\vec{\tau}$ tensor de tensões (N/m^2) e \vec{g} é a aceleração da gravidade (m/s^2).

Uma vez que as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas para a mistura de ar e água, é necessário calcular valores médios para a massa específica e a viscosidade, respectivamente (Gomes, 2010):

$$\rho = \alpha_{água} \rho_{água} + \alpha_{ar} \rho_{ar} \quad (12)$$

$$\mu = \alpha_{água} \mu_{água} + \alpha_{ar} \mu_{ar} \quad (13)$$

Representação computacional

A partir das características da onda bem definida: período da onda (T), altura da onda (H), e profundidade da superfície livre (h) é possível determinar o comprimento do tanque (C_T) e a altura do tanque de ondas (H_T) apresentado na Fig. 1.

De acordo com Gomes et al. (2009), 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 refração por um tempo razoável de propagação e sem aumentar desnecessariamente o tamanho do domínio computacional e, por consequência, a malha, fator que influência diretamente no esforço computacional. E para a altura do tanque é necessário considerar a profundidade mais a altura da onda. Conforme Gomes et al. (2009), a altura do tanque deve ser a profundidade mais três vezes a altura da onda. Assim é possível determinar as dimensões do domínio computacional com as características da onda a ser gerada.

Na pesquisa realizada, a onda incidente é gerada no lado esquerdo do tanque de ondas, local onde o gerador de ondas numérico é posicionado, como pode ser observado na Fig. 1. A condição de contorno empregada neste trabalho é baseada na Metodologia Função utilizada em Gomes et al. (2009). Esta metodologia, desenvolvida por Rocha et al. (2005), consiste em aplicar as componentes horizontal (u) e vertical (z) da velocidade das ondas como condição de contorno (velocidade prescrita) no modelo computacional através de uma função definida pelo usuário, UDF (*User Define Function*), no FLUENT. A velocidade varia em função do espaço e do tempo com base na Teoria de Stokes de 2^a ordem. Assim, as equações impostas na região de entrada são dadas por Dean e Dalrymple (1991) e Srinivasan et al. (2011).

$$u = \frac{H}{2} gk \frac{\cosh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2} \right)^2 \omega k \frac{\cosh 2k(k + z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (14)$$

$$w = \frac{H}{2} gk \frac{\sinh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2} \right)^2 \omega k \frac{\sinh 2k(k + z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (15)$$

onde H é a altura da onda incidente (m); g é a aceleração da gravidade (m/s^2); k é o número de ondas dado por $k = 2\pi/\lambda$ (m^{-1}), h é a profundidade (m), T é o período de onda (s), ω é a frequência dada por $\omega = 2\pi/T$ (rad/s), x é a coordenada que representa a direção principal (m), t é o tempo (s) e z é a coordenada normal (m).

Com relação às outras condições de contorno, é possível observar na Fig.1, 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. Nas demais superfícies do tanque de ondas, superfície inferior e superfície lateral direita, são impostas condições de não deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula respectivamente. Com relação às condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso, com profundidade $h = 10,0$ m.

Para a geração da malha foi adotada uma estratégia que tem como objetivo construir uma malha mais refinada em determinadas regiões de interesse no domínio computacional, como a superfície livre, por exemplo, (Fig. 2). Essa metodologia é baseada na técnica de malhas stretched (Chakrabarti, 2005). Na geração da malha é possível estabelecer o número de volumes por determinada região. Nas regiões fora do dispositivo CAO o número de volumes é 14.000 para cada região, a região onde o dispositivo se encontra é composta por 15.130 volumes e a região da chaminé contém 4.284 volumes.

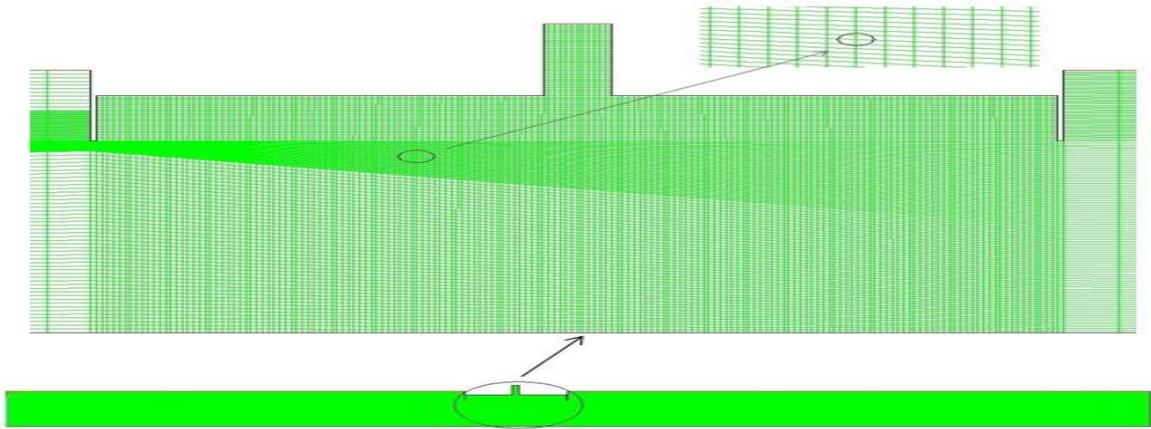


Figura 2: Discretização do domínio (malha utilizada no presente trabalho).

Modelagem numérica

Para a simulação numérica, é utilizado um modelo computacional bidimensional desenvolvido no software FLUENT, que é baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF), empregando o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), e que permite gerar ondas regulares em escala real que incidem sobre o dispositivo CAO. Para a discretização do domínio computacional (geração da malha), que é composto pelo conversor CAO inserido em um tanque de ondas, foi utilizado o software GAMBIT.

Para a solução das equações de conservação da massa e quantidade de movimento, foi empregado um código comercial baseado no MVF (Mavriplis, 1997). 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 SIMPLE. Maiores detalhes sobre a metodologia numérica podem ser obtidos em (Fluent, 2009 e Patankar, 1980).

O esquema iterativo do avanço no tempo exige um esforço computacional considerável devido a um grande número de iterações externas executadas em cada passo de tempo (Mavriplis, 1997). Assim, o tempo médio para cada simulação foi de aproximadamente duas horas e quarenta e cinco minutos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma forma de testar o modelo VOF aplicado à simulação numérica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica é verificar a geração da onda com as características definidas anteriormente. A verificação da presente solução com o modelo VOF consiste em gerar a onda em um tanque de ondas e observar a sua variação na superfície livre da água, ou seja, a sua amplitude, para posteriormente comparar com a equação analítica para a variação da superfície livre da água em um dado ponto do tanque de ondas.

A comparação da solução numérica com a solução analítica foi proposta por Dean e Dalrymple, (1991), a equação analítica da superfície livre é definida por:

$$\eta(x,t) = A \cos(kx - \omega t) + \frac{A^2 k \cosh(kh)}{4 \operatorname{senh}^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos 2(kx - \omega t) \quad (16)$$

onde A é a amplitude da onda (m), dado por $H/2$, x é a posição (m), t é a variação do tempo (s), k e ω são respectivamente o número de onda (m^{-1}) e a frequência da onda (rad/s).

Na Fig. 3, foram comparados os resultados obtidos numericamente com os obtidos pela Eq. (16) na posição $x = 37,6$ m. A verificação da solução numérica foi realizada no intervalo entre 15 e 30 s onde a onda numérica está estável.

A diferença relativa entre as soluções numérica e analítica foi medida instantaneamente, e a média das diferenças foi 0,09% e o valor máximo 1,54%. Estes resultados indicam a acurácia do modelo.

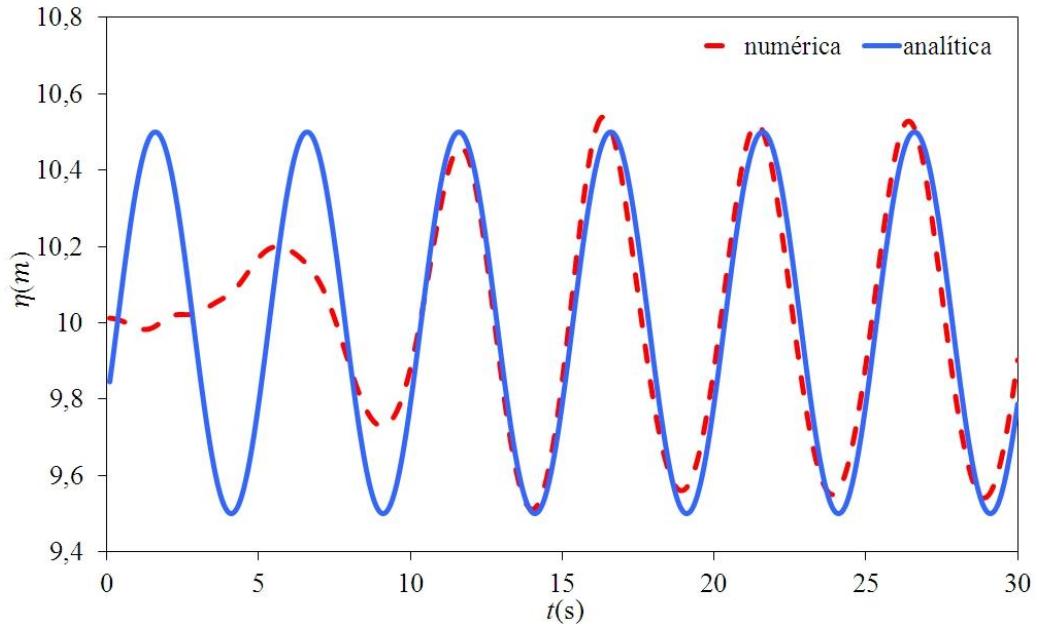


Figura 3: Elevação da superfície livre na posição $x = 37,6$ m com passo de tempo $T/500$.

Neste trabalho foram avaliadas a vazão mássica, a pressão e a potência hidropneumática. Os valores médios foram calculados empregando a média aritmética para problemas transientes *Root Mean Square* (RMS) (Versteeg e Malalasekera, 2007):

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (17)$$

onde X representa a grandeza que se deseja calcular a média RMS.

A potência hidropneumática é calculada por Marjani et al. (2006).

$$P_{hid} = \left(P_{ar} + \frac{\rho_{ar} V_{ar}^2}{2} \right) \dot{m} \quad (18)$$

onde: P_{ar} é a pressão estática na chaminé do dispositivo CAO (Pa), ρ_{ar} é a densidade do ar (kg/m^3), \dot{m} é a taxa de vazão mássica atravessando a chaminé (kg/s), V_{ar} é a velocidade do ar na chaminé (m/s) dada por:

$$V_{ar} = \frac{\dot{m}}{A \rho_{ar}} \quad (19)$$

onde: A representa uma área em corte transversal da chaminé (m^2). Como o estudo realizado é bidimensional a terceira dimensão é considerada unitária.

A pressão estática é calculada através de uma média ponderada em uma determinada área, no caso deste estudo no centro da chaminé, através da seguinte expressão:

$$\frac{1}{A} \int \phi dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \phi_i |A_i| \quad (20)$$

onde: ϕ é um campo variável que neste caso é a pressão estática p_e (Pa), n é o número de volumes e A é a área da superfície que está sendo medida (m^2).

Assim, tem-se a seguinte relação para pressão total, a qual possibilita calcular a pressão estática.

$$p = p_e + p_d \quad (21)$$

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

$$p_d = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (22)$$

A vazão mássica é calculada através da seguinte expressão:

$$\int \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \sum_{i=1}^n \rho_i \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \quad (23)$$

onde: ρ é a massa específica do ar (kg/m^3), V a velocidade na direção y (m/s) e A área da superfície que é atravessada pelo fluxo de ar (m^2).

Ao todo foram analisadas noventa configurações geométricas diferentes, foram testados os valores 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 e 0,9 para a relação V_E/V_T , a mesma pode ser calculada considerando as Eqs. (2) e (4). Para cada valor da relação foram consideradas dez diferentes configurações geométricas de H_I/L .

É possível observar na Fig. 4 o comportamento da potência hidropneumática para cada valor da relação H_I/L e para diferentes relações de V_E/V_T . Para cada uma das relações de V_E/V_T é considerado o mesmo grau de liberdade H_I/L em todas as simulações.

Comparando o caso com a maior potência hidropneumática ($H_I/L = 0,1346$ e $P_{hid} = 293,0870$ W), com o caso com a menor ($H_I/L = 0,0266$ e $P_{hid} = 15,8637$ W), observa-se que no caso de maior potência, o diâmetro da chaminé mede $l = 1,18$ m e a altura da chaminé é $H_2 = 3,54$ m. Entre todos os casos estudados, no caso $V_E/V_T = 0,9$ encontra-se a chaminé com o menor diâmetro, o que influência diretamente no aumento da pressão dentro do dispositivo do tipo CAO.

A incidência da onda dentro da câmara hidropneumática faz com que a pressão dentro da câmara aumente e, por consequência, ocorre também um aumento da potência hidropneumática, uma vez que ela depende da pressão e da vazão mássica. Ao comparar a maior potência hidropneumática ($P_{hid} = 293,0870$ W) com a menor potência hidropneumática ($P_{hid} = 15,8637$ W), o resultado é considerado muito significativo, pois a potência hidropneumática ótima é aproximadamente 18,48 vezes maior em relação a menor potência.

Comparando os resultados obtidos no presente trabalho com os de Gomes (2014), temos: neste estudo a relação $(H_1/L)_o = 0,1346$ e a $(P_{hid.})_{máx} = 293,0870$ W e a relação V_E/V_T considerada ótima foi $V_E/V_T = 0,9$. Através da comparação de ambos os trabalhos observa-se que a relação V_E/V_T , tem uma influência expressiva no resultado para a potência hidropneumática.

O valor mínimo para vazão mássica encontra-se em $V_E/V_T = 0,3$, $\dot{m}_{min} = 6,1317$ kg/s e a potência hidropneumática está em $V_E/V_T = 0,4$, $(P_{hid.})_{min} = 15,8637$ W, o valor mínimo para a vazão mássica e a potência hidropneumática é encontrado na relação $H_1/L = 0,0266$. E o valor máximo para a vazão mássica está em $V_E/V_T = 0,1$, $\dot{m}_{máx} = 15,2653$ kg/s e a potência hidropneumática encontra-se em $V_E/V_T = 0,9$, $(P_{hid})_{máx} = 293,0870$ W, o valor máximo para a vazão mássica e a potência hidropneumática estão em $H_1/L = 0,1346$ para todas as relações de V_E/V_T . Os valores obtidos para a vazão mássica, podem ser observados na Fig. 5a.

Como já mencionado anteriormente considera-se a situação inicial em que o comprimento da câmara hidropneumática do dispositivo CAO (L) é igual ao comprimento da onda incidente (λ) e que a altura da câmara hidropneumática (H_1) do dispositivo CAO é igual à altura da onda incidente (H). Assim se for dividido o valor do comprimento da onda incidente (λ) pelo comprimento da câmara (L) do dispositivo CAO, e ainda se for dividido a altura da câmara (H_1) do dispositivo CAO pela altura da onda incidente (H), encontra-se o valor de 2,25. Logo o comprimento ótimo da câmara hidropneumática (L_o) é aproximadamente o comprimento da onda incidente (λ) dividido por 2,25. E a altura ótima da câmara hidropneumática ($H_1)_o$ é cerca de 2,25 vezes a altura da onda.

Foi constatado que a vazão mássica do caso ótimo escoando pela chaminé apresenta um aproveitamento em torno de 2,49 vezes superior em relação ao pior caso.

Como pode ser observado na Fig. 5b a pressão é analisada em todos os casos das relações do V_E/V_T , sendo que para cada relação de V_E/V_T foi estudado dez valores (diferentes)

para H_I/L . Observa-se ainda que a maior pressão obtida em $V_E/V_T = 0,9$ é para todos os valores de H_I/L . Nota-se que em $H_I/L = 0,0399$ temos o maior valor para a pressão.

O caso ótimo para a pressão é obtido na relação $V_E/V_T = 0,9$ para $H_I/L = 0,0399$ e o valor da Pressão é igual a 40,0316 (Pa). Enquanto o pior caso, esta na relação $V_E/V_T = 0,7$ em $H_I/L = 0,0598$ sendo o valor da Pressão igual 11,6458 (Pa).

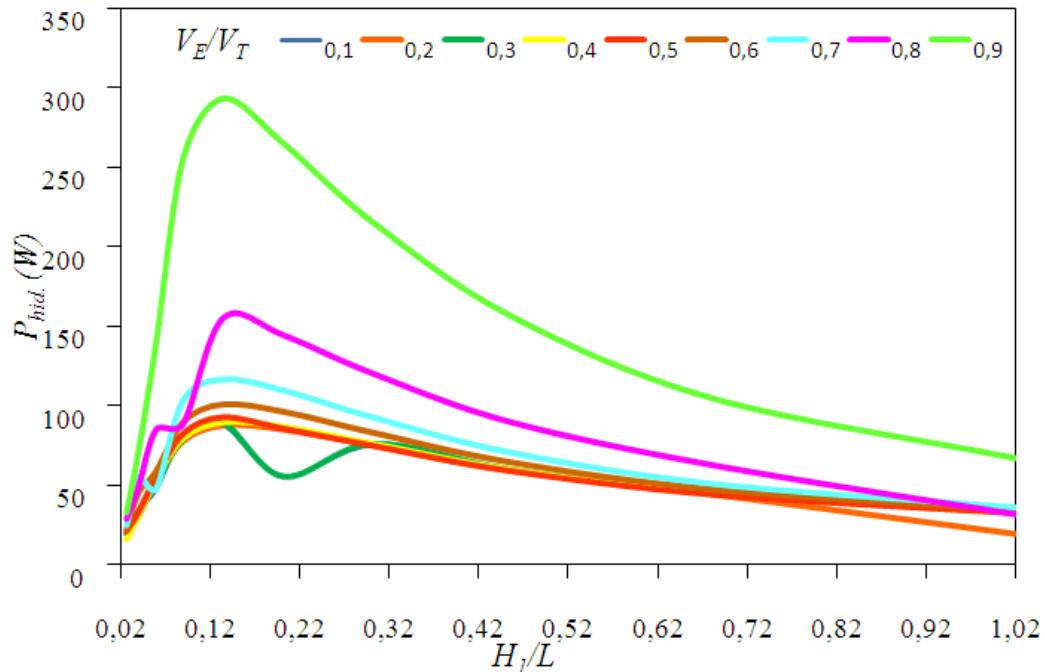


Figura 4: Potência Hidropneumática para todos os casos de V_E/V_T

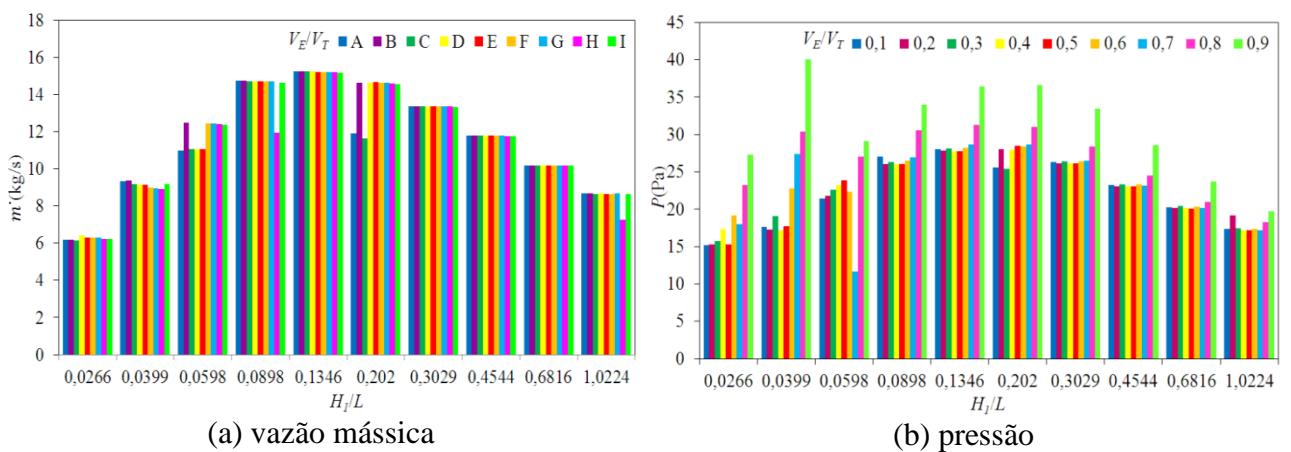


Figura 5: Estudo da vazão mássica e pressão em H_I/L para as diferentes relações de V_E/V_T .

CONCLUSÕES

Considerando uma onda bem definida em escala real, o resultado obtido sugere que o desempenho do dispositivo do tipo CAO é melhor quando o comprimento da câmara hidropneumática (L) é aproximadamente o comprimento da onda incidente (λ) dividido por 2,25, e a altura da câmara hidropneumática do dispositivo do tipo CAO é cerca de 2,25 vezes a altura da onda. Ao comparar a potência hidropneumática máxima (na geometria ótima) com a menor potência (na pior geometria) o resultado é considerado muito significativo, pois a potência hidropneumática ótima é 18,48 vezes maior em relação a menor potência. E a análise da vazão mássica foi 2,49 vezes maior, comparando o melhor caso com o pior caso simulado.

Ainda considerando a pressão máxima, o resultado foi de 3,44 vezes maiores em relação à pressão mínima do pior caso deste estudo.

Alterando a relação V_E/V_T a pressão aumenta, porém a vazão mássica não é afetada pela variação dessa relação. Disso conclui-se que o que influênciava a vazão mássica é a relação comprimento da câmara hidropneumática em relação à onda incidente no dispositivo do tipo CAO. Já a pressão é influenciada pela relação V_E/V_T , mas analisando as variáveis primitivas, é provável que esteja relacionado ao comprimento da chaminé em relação ao comprimento da câmara hidropneumática.

Portanto, o principal objetivo deste trabalho de maximizar a conversão da energia das ondas regulares em energia elétrica para um dispositivo do tipo CAO, foi alcançado. Conhecendo uma onda bem definida de uma região, através dos resultados apresentados é possível determinar as dimensões do conversor para se obter um desempenho otimizado.

Para estudos futuros é interessante variar mais graus de liberdade, além da variação da altura e comprimento da câmara hidropneumática bem como realizar uma investigação do problema tridimensional associado a este estudo e comparar com os resultados obtidos na abordagem bidimensional.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande pela oportunidade, pelo apoio e suporte prestado e a CAPES pelo financiamento dos estudos.

REFERÊNCIAS

- BEJAN, A.; ZANE, J. P. Design in Nature: How the Constructal Law Governs Evolution in Biology, Physics, Technology, and Social Organization. **Published in the United States by Doubleday.** 2012.
- BEJAN, A.; LORENTE, S. Constructal Law of Design and Evolution: Physics, Biology, technology, and Society. **Journal of Applied Physics**, 113: 151301-1 – 151301-20. 2013.
- CHAKRABARTI, S. K. **Handbook of offshore engineering.** Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 1. 2005. 661p.
- CRUZ, J. M. B. P.; SARMENTO, A. J. N. A. Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais. Alfragide, Portugal: **Instituto do Ambiente**, 2004. 65p.
- DEAN, R. G., DALRYMPLE, R. A. Water wave mechanics for engineers and scientists. **World Scientific** 2: 1991. 353p.
- ESPINEL, M. F., GOMES, M DAS N, ROCHA , L. A. O., DOS SANTOS, E., ISOLDI, L. A. Numerical Modeling and Constructal Design Applied to the Performance Improvement of na Oscillating Water Colum Wave Energy Converter. **15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering**. Belém, PA, Brazil. 2014.
- FLEMING, F.P. **Avaliação do Potencial de Energias Oceânicas no Brasil.** Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2012. 100p. (Dissertação Mestrado em Planejamento Energético).
- FLUENT INC., 2009, FLUENT 12.0 **Theory Guide**.
- GOMES, M.. DAS N., OLINTO, C.R., ROCHA, L. A. O, SOUZA, J.A. & ISOLDI, L. A., , Computational Modeling of the Air-Flow in an Oscillating Water Column System, **20th International Congress of Mechanical Engineering**. 2009.
- GOMES, M. DAS N. **Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna d'Água Oscilante de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica.** PPGMC-FURG, 2010. 209p. (Dissertação de Mestrado).
- GOMES, M. DAS N., BONAFINI, B. L., ISOLDI, L. A., NASCIMENTO, C., D., SANTOS E. D., ROCHA, L. A. O.Two-Dimensional Geometric Optimization of na Oscillating Water Column Converter in Laboratory Scale. **Engenharia Térmica**. 11: 1-2. 30-36. 2012.
- GOMES, M. DAS N.; ISOLDI, L. A.; SANTOS E. D. & ROCHA, L. A. O. Análise de Malhas para Geração Numérica de Ondas em Tanques, **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. São Luiz, MA. 2012a. 1-10.

GOMES, M. DAS N., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O. Two-Dimensional Geometric Optimization of an Oscillating Water Column Converter of Real Scale, **22nd International Congress of Mechanical Engineering**. 2013.

GOMES, M. DAS N. **Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante**. PROMEC-UFRGS. 2014. 168p. (Tese de doutorado).

HORKO, M. **CFD Optimization of an Oscillating Water Column Energy Converter**. Science and Engineering, School of Mechanical Engineering, University of Western, Australian. 2007 (Dissertação de mestrado).

LIMA, Y.T.B; ROCHA, L.A.O; PLAMER, C.B.; ISOLDI, L.A.; SANTOS, E.D.; GOMES, M.N. Analise numérica com constructal design da forma geométrica na região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé de um dispositivo do tipo coluna de agua oscilante. **Proceedings of the XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, ABMEC. Rio de Janeiro, RJ, Brazil. 2015a.

LIMA, Y.T.B; ROCHA, L.A.O; ISOLDI, L.A.; SANTOS, E.D.; GOMES, M.N. Análise Numérica com Constructal Design da Forma Geométrica na Região de Transição entre a Câmara Hidropneumática e a Chaminé de um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante. **Proceedings of the XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, ABMEC. Rio de Janeiro, RJ, Brazil. 2015b.

LIU, Z.; HYUN B.; & JIN, J. Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC. **Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering**. 11. 1. 35- 41.

MARJANI, A. E., CASTRO, F., BAHAJI, M., & FILALI, B. 3D Unsteady Flow Simulation in na OWC Wave Converter Plant, **Proceedings International Conference on Renewable**. 2006.

MAVRIPPLIS, D. J. Unstructured Grid Techniques. **Annual Reviews Fluid Mechanics**. 29. 473-514. 1997.

OLIVEIRA, L., TEIXEIRA, P. R. F., SANTOS, E. D. DOS, ISOLDI, L. A. Constructal design applied to the geometric optimization of the hydropneumatic chambre dimensiono f na oscillating water column wave energy device. **In proceedings of the 11th Young symposium on experimental solid mechanics**, Brasov, Romenia. 2012.

PATANKAR, S., V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. McGraw-Hill, Estados Unidos, 1980. 196p.

ROCHA, L. A. O., LORENZINI, E., BISERNI, C. Geometric Optimization of Shapes on the Basis of Bejan's Constructal Theory. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. 32: 1281-1288. 2005.

SRINIVASAN, V., SALAZAR, A.J. AND SAITO, K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. **Applied Mathematical Modeling**, 35. 8. 3710-3730. 2011.

TRUJILLO, A. P., THURMAN, H. V. **Essentials of Oceanography**. 10. USA: Prentice Hall. 2011. 551p.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**, Malaysia: Pearson. 2007.