



VII SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 23 à 25 de Novembro de 2016

ESTUDO NUMÉRICO COMPARATIVO ENTRE UM DISPOSITIVO DE GALGAMENTO *ONSHORE* EM ESCALA REAL COM RAMPA ÚNICA E RAMPA BIPARTIDA

Leonardo da Silva Vasconcelos¹, Marcelo Moraes Goulart², Jaifer Corrêa Martins³, Mateus das Neves Gomes⁴, Jeferson Avila Souza^{2,3}, Luiz Alberto Oliveira Rocha⁵, Liércio André Isoldi^{2,3}, Elizaldo Domingues dos Santos^{2,3}

¹ Universidade Federal do Rio Grande
Graduação em Engenharia Mecânica
Avenida Itália, km 8, Rio Grande, RS, Brasil
e-mail: lesiva@hotmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil
e-mail: moraesgoulart@yahoo.com.br

³ Universidade Federal do Rio Grande
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
Avenida Itália, km 8, Rio Grande, RS, Brasil
e-mail: jaifercm@gmail.com
e-mail: elizaldosantos@furg.br
e-mail: liercioisoldi@furg.br

⁴ Instituto Federal do Paraná, Campus Paranaguá
Rua Antônio Carlos Rodrigues, 453, Paranaguá, PR, Brasil
e-mail: mateus.gomes@ifpr.edu.br

⁵ Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Rua Sarmiento Leite, 425, Porto Alegre, RS, Brasil
e-mail: luizrocha@mecanica.ufrgs.br

RESUMO

O estudo a respeito das tecnologias e princípios de funcionamento de dispositivos de conversão de energia das ondas em energia elétrica (WEC) tem crescido sensivelmente. Entre os WECs estudados está o dispositivo de galgamento. O seu princípio físico de funcionamento consiste em uma rampa que guia a água das ondas incidentes para um reservatório localizado acima do nível médio do mar. A água acumulada no reservatório escoava através de uma turbina de baixa queda gerando energia elétrica. No presente trabalho pretende-se realizar um estudo numérico relacionado à influência da geometria da rampa (rampa única e rampa bipartida) de um dispositivo de galgamento onshore em escala real que conduz ao melhor desempenho fluidodinâmico. O principal propósito aqui é avaliar dois diferentes tipos de rampas e determinar a que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório do dispositivo. Para todos os casos a área da rampa será mantida constante ($A = 37,025 \text{ m}^2$). Nas presentes simulações, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica são resolvidas com o método dos volumes finitos (MVF). Para abordar a mistura água e ar, o

modelo multifásico *Volume of Fluid (VOF)* é empregado. Os resultados mostraram que a máxima quantidade de água que entrou no reservatório ao longo do tempo foi obtida para o dispositivo de galgamento rampa única, contudo se tivéssemos, no caso do dispositivo de galgamento rampa bipartida, diminuído o comprimento da segunda rampa e colocado um segundo reservatório sobre-elevado similar ao do SSG. Os resultados seriam semelhantes aos observados na literatura, que mostraram que este dispositivo possui maior aproveitamento que o dispositivo de rampa única, pois dependendo da variação do estado de mar (ondas de menor porte ou maior porte) o galgamento ocorre nos reservatórios mais adequados, proporcionando um maior rendimento do equipamento pois o mesmo utiliza turbina de múltiplos estágios.

Palavras-chave: Galgamento, *Sea Slot-cone Generator*, VOF, WEC.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a comunidade acadêmica e os grupos de pesquisa têm investigado ativamente a utilização de fontes renováveis para a produção de energia elétrica, como uma alternativa para substituir os meios de produção tradicionais baseados em combustíveis fósseis e para atender à crescente demanda de energia. Neste contexto, a energia das ondas do mar, que possui um potencial teórico mundial estimado em aproximadamente 2 TW, apresenta-se como uma alternativa para ilhas ou países com grandes faixas costeiras. Para ter uma ideia da ordem de grandeza da energia disponível nas ondas, este valor é equiparável à potência elétrica média anual consumida mundialmente (Cruz e Sarmento, 2004). A potência estimada na região sul do Brasil é de 30 kW/m, sendo uma possibilidade de recurso para ser explorado na região. Para realizar a exploração da energia das ondas, existem vários dispositivos. Entre os dispositivos de conversão de energia das ondas em energia elétrica (WEC) encontrados na literatura, um em especial chama atenção por seu princípio de funcionamento relativamente simples, o dispositivo de galgamento.

É possível verificar na literatura os trabalhos que têm investigado o princípio de funcionamento do dispositivo de galgamento (Kofoed et al., 2006; Falcão, 2010; Zabihian e Fung, 2011). Dentre os trabalhos realizados, é possível citar o desenvolvimento de estudos experimentais para avaliação de parâmetros construtivos do dispositivo (Kofoed et al., 2006; Margheritini et al., 2009; Buccino et al., 2015). Além destes, também podem ser citados trabalhos no âmbito numérico para obter uma melhor compreensão da fenomenologia do escoamento e também para avaliar parâmetros geométricos (Beels et al., 2010; Rocha et al., 2013). O princípio de funcionamento deste dispositivo baseia-se na acumulação de água em um reservatório sobrelevado em relação ao nível médio da superfície livre do mar. A água acumulada é devolvida ao mar através de turbinas hidráulicas de baixa queda que acionam geradores elétricos de fabricação comum. A acumulação da água no reservatório sobrelevado é produzida através do galgamento da onda sobre uma rampa inclinada (Fig. 1).

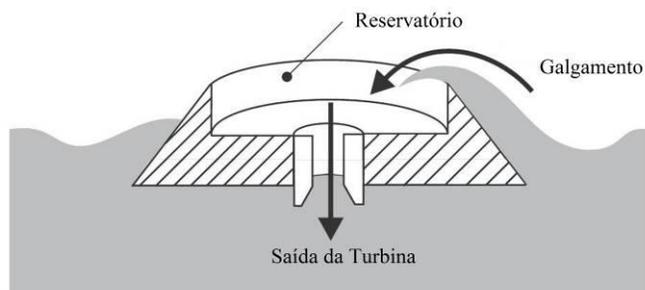


Figura 1. Ilustração do princípio de funcionamento do dispositivo de galgamento.

Alguns dos principais estudos encontrados na literatura são apresentados a seguir:

Kofoed et al. (2006) realizaram no período 1998-2001 extensos testes em um tanque de ondas em um protótipo em escala reduzida de 1:50. Posteriormente, um novo protótipo em escala reduzida de 1:(4.5) do dispositivo *Wave Dragon* foi testado durante aproximadamente 3 anos. Nesse estudo foi realizado um monitoramento da potência, clima de ondas, as forças nos sistemas de fixação, tensões na estrutura e movimentos do protótipo, resultando em um plano de estudos com a finalidade de determinar a concepção para a estrutura e o planejamento para implantação de uma unidade de produção de energia de 4 MW.

Margheritini et al. (2009) analisaram um dispositivo denominado *Sea Slot-cone Generator (SSG)*, que consiste em um dispositivo com múltiplas rampas. A planta piloto é um módulo onshore em escala real com três níveis de altura para o reservatório. Os resultados dos testes de laboratório foram usados para projetar uma planta piloto e definir suas características construtivas.

No âmbito numérico, Liu et al. (2008) apresenta um estudo numérico sobre um dispositivo de galgamento em um domínio bidimensional em escala de laboratório. Foi empregada a metodologia VOF (*Volume of Fluid*) para a modelagem do escoamento entre ar e água. As equações de conservação foram resolvidas com o método de volumes

finitos, mais precisamente com o software FLUENT. Várias condições das ondas incidentes e rampas com razões de altura por comprimento de 1:1, 1:2 e 2:3 foram investigadas. Contudo, a variação geométrica não foi definida impondo-se uma restrição de área constante para a rampa.

Nam et al. (2008) realizaram um estudo numérico de um dispositivo de galgamento circular, onde foram inseridas aletas igualmente espaçadas na área da rampa para guiar a água incidente, com o objetivo de determinar os parâmetros geométricos ótimos que maximizam a quantidade de água galgada. Neste estudo foi utilizado o *software* FLOW3D, sendo simulados casos 2D e 3D, empregando ondas regulares.

Outro importante estudo foi realizado em (Beels et al., 2010), onde os autores empregaram um modelo numérico denominado *mild-slope* para resolver o escoamento de forma transiente sobre um único dispositivo do tipo *Wave Dragon* e com arranjos de dispositivos. Para a avaliação do arranjo foram testadas distâncias entre os equipamentos de D, 2D e 3D, sendo D = 260 m a dimensão da distância entre as duas pontas do refletor do *Wave Dragon*. Como resultado, os autores concluíram que uma fazenda de cinco conversores *Wave Dragon* instalados com um arranjo desalinhado, torna-se mais eficiente para o aproveitamento do espaço, sem provocar interferências significativas no rendimento do conversor.

Jin et al., (2012) estudaram um dispositivo semelhante ao Nam et al. (2008), porém somente o efeito do número de aletas foi analisado. Neste estudo foi empregado o software comercial FLUENT para as simulações em 3D. As equações governantes empregam o RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) e o modelo $k-\varepsilon$ padrão foi aplicado para o fechamento da turbulência e a mistura água-ar, foi abordada com o emprego *Volume of Fluid* (VOF). Os resultados mostraram que com um número maior de aletas há um aumento no volume de água galgado, entretanto não foi definido um número ótimo de aletas.

Margheritini et al. (2012), realizam uma análise de viabilidade de implementação do SSG no porto de *Hanstholm* na Dinamarca. Desta forma, um estudo numérico de otimização geométrica do SSG foi realizado por meio do software WOPSim, o qual foi desenvolvido pela Universidade de Aalborg especificamente para a determinação de parâmetros do SSG. Além disso, foi utilizado o espectro de ondas JONSWAP.

Posteriormente, (Dos Santos et al., 2014) foi realizado um estudo numérico para determinar a influência da geometria sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento offshore em escala de laboratório para três diferentes profundidades relativas: $h/\lambda = 0.3, 0.5$ e 0.62 empregando o Design Construtal. No estudo apresentado, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e a equação para o transporte de fração volumétrica foram resolvidas com o método dos volumes finitos (MVF). Para a solução da interface água-ar é utilizado o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF). Os resultados mostraram que a forma ótima da razão entre altura e comprimento da rampa, $(H_1/L_1)_o$, apresentou uma forte dependência da profundidade relativa, indicando a não existência de uma geometria universal que conduzia ao melhor desempenho de um dispositivo de galgamento para diversas condições de onda.

Em Goulart et al. (2015) foi realizado um estudo numérico relacionado ao efeito da geometria da rampa sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento onshore em escala real, empregando o Design Construtal. O objetivo principal foi avaliar a razão entre altura e comprimento da rampa (H_1/L_1) que maximiza a quantidade de água (m) que entra no reservatório do dispositivo para distâncias entre o fundo do dispositivo e o fundo do tanque de $S = 5,0$ m e $S = 6,0$ m, empregando uma onda monocromática com período $T = 7,5$ s. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica (*Volume of Fluid* (VOF)) foram resolvidas com o software FLUENT. Os resultados mostraram que as melhores geometrias foram obtidas para as menores razões de H_1/L_1 e com a diminuição de S .

Recentemente, em Martins (2016) foi realizado um estudo empregando duas ondas monocromáticas diferentes e três diferentes áreas construtivas (ϕ) para a rampa do dispositivo, empregando o Design Construtal e a Busca Exaustiva. Desta forma, foi avaliada a influência da razão entre altura e comprimento da rampa (H_1/L_1) que maximiza a potência disponível (P_d) para diferentes frações de área (ϕ), várias distâncias entre o fundo do dispositivo e o fundo do tanque (S) e diferentes ondas monocromáticas (T), com a finalidade de se determinar a geometria ótima do dispositivo. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica (*Volume of Fluid* (VOF)) foram resolvidas com o software FLUENT. Os resultados mostraram que as melhores geometrias são obtidas para as menores razões de H_1/L_1 para todas as profundidades. Estes indicaram ainda que o efeito da razão H_1/L_1 sobre P_d foi semelhante para dois diferentes períodos de onda T . Além disso, conforme esperado, a diminuição do período (T) conduziu a uma diminuição da potência disponível (P_d).

No presente trabalho pretende-se realizar um estudo numérico relacionado à influência da geometria da rampa (rampa única e rampa bipartida) de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real que conduz ao melhor desempenho fluidodinâmico. Mais especificamente, pretende-se avaliar o comportamento do acúmulo de água no reservatório, ou seja, a quantidade de massa que entra no tanque para os casos com e sem rampa bipartida. Para todos os casos a área da rampa será mantida constante ($A = 37,025 \text{ m}^2$).

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MODELAGEM MATEMÁTICA

Para a solução numérica das equações de conservação de massa e quantidade de movimento foi empregado o

método dos volumes finitos (Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 2007), mais precisamente o código comercial FLUENT (2007). No estudo é realizada uma análise do problema físico em um dispositivo de galgamento bidimensional colocado em um tanque de ondas, conforme representado na Fig. 2. O movimento da onda é gerado pela imposição de um campo de velocidades na superfície esquerda do tanque.

O objetivo principal do estudo é analisar a influência do emprego de uma rampa bipartida sobre a quantidade de água acumulada no reservatório do dispositivo. Para isso, compara-se o caso de uma rampa contínua (de um estágio) com a rampa bipartida. As dimensões do tanque são: altura do tanque (H_T) é igual a 20,0m, comprimento do mesmo, $L_T = 327,0$ m. Além disso, o comprimento do reservatório é igual a $L_R = 20,0$ m, a submersão S do dispositivo é de 6,0 m e a profundidade da água h é de 10,0 m. Com relação as características da onda, foi utilizada uma altura $H = 2,0$ m, período $T = 12,0$ s e comprimento de onda $\lambda = 113,3$ m.

As áreas das rampas utilizadas no estudo foram: $A_{r,1} = A_{r,2} = 37,025$ m², sendo $H_1 = H_2 = 4,429$ m e $L_1 = L_2 = 8,359$ m e distância entre as rampas (bipartida) $L_I = 0,5$ m.

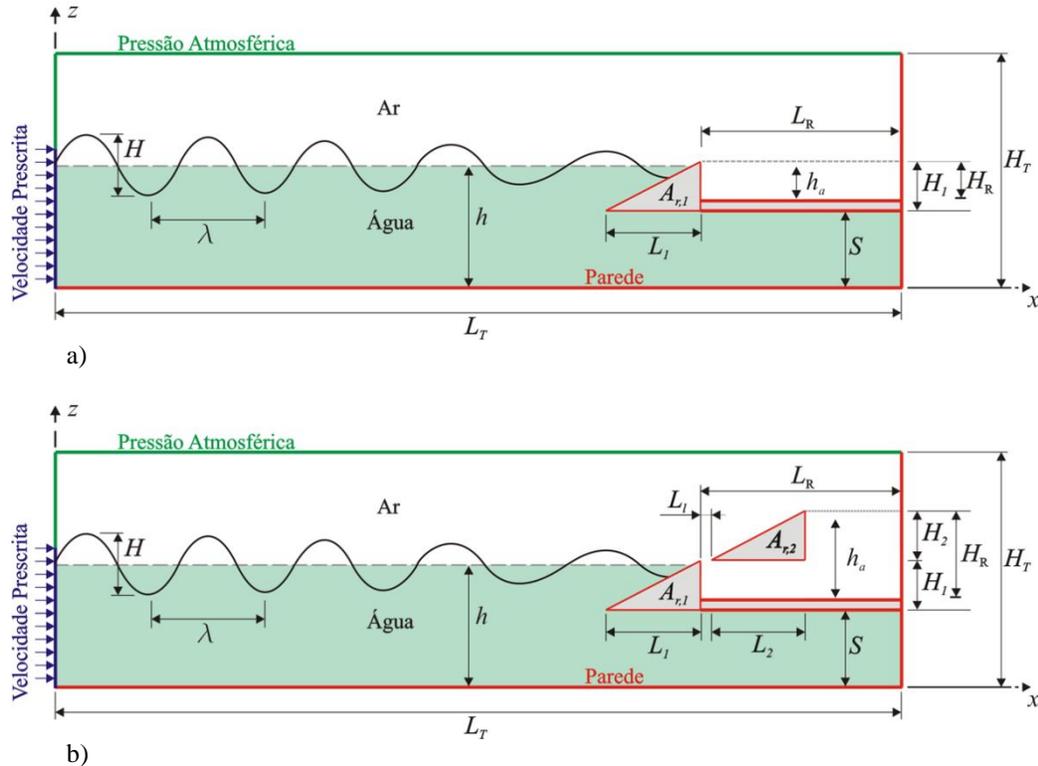


Figura 2. Domínio computacional do dispositivo de galgamento em escala real com dois graus de liberdades: a) rampa única; b) rampa bipartida.

2.1 O modelo Multifásico *Volume of Fluid* (VOF)

Para lidar com o escoamento da mistura de ar e água e avaliar a sua interação com o dispositivo, é empregado o método *Volume of fluid* (VOF) (Hirt e Nichols, 1981). O VOF é um modelo multifásico usado para escoamentos de fluido com duas ou mais fases. Neste modelo, as fases são imiscíveis, ou seja, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra fase.

A equação de conservação da massa para a mistura ar e água em um escoamento isotérmico, laminar e incompressível é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5)$$

onde ρ é a massa específica da mistura (kg/m³) e \vec{v} o vetor de velocidade do escoamento (m/s).

A equação de conservação da quantidade de movimento para a mistura é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (6)$$

onde p é a pressão (N/m²), $\rho\vec{v}$ e \vec{F} são as forças de campo e forças externas ao corpo (N/m³), respectivamente. Neste trabalho, a única força de campo que atua sobre o escoamento é a força de empuxo, conseqüentemente o vetor de forças externas será desconsiderado. O termo $\bar{\tau}$ é o tensor taxa de deformação (N/m²), que para um fluido Newtoniano, é dado por:

$$\bar{\tau} = \mu \left[\left(\nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot \vec{v}^T \right) \right] \quad (7)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica (kg/(ms)).

Nas simulações deste estudo, são consideradas duas diferentes fases: ar e água. Portanto, o conceito de fração de volume (α_q) é usado para representar as duas fases dentro de um volume de controle. Neste modelo, a soma das frações de volume, dentro de um volume de controle, devem ser unitária ($0 \leq \alpha_q \leq 1$). Conseqüentemente, se $\alpha_{\text{água}} = 0$, o volume de controle está vazio de água e cheio de ar ($\alpha_{\text{ar}} = 1$). Se o fluido tem uma mistura de ar e água, uma fase é o complemento da outra, ou seja, $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$. Assim, uma equação de transporte adicional para uma das frações de volume é necessária:

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

Vale ressaltar que as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas para a mistura. Portanto, é necessário obter os valores de massa específica e viscosidade para a mistura, que podem ser escritas por (Srinivasan *et al.*, 2011):

$$\rho = \alpha_{\text{água}}\rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}}\rho_{\text{ar}} \quad (9)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}}\mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}}\mu_{\text{ar}} \quad (10)$$

2.2 Condições de Contorno

Com relação à geração de onda, como se pode observar na Fig. 2, um perfil de velocidades é imposto na entrada do canal (superfície lateral esquerda da Fig. 2) e simula o comportamento de um gerador de onda (Horko, 2007). As componentes de velocidade nas direções de propagação de onda (x) e vertical (z) para o canal de entrada são baseados na teoria linear de Airy e dadas respectivamente por (Chakrabarti, 2005):

$$u(x, z) = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (11)$$

$$w(x, z) = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (12)$$

onde H é a altura de onda (m), k é o número de onda dado por $k = 2\pi/\lambda$ (m⁻¹), h é a profundidade da água (m), T é o período da onda (s), $\sigma = 2\pi/T$ é a frequência (rad/s) e t é o tempo (s).

Para as outras condições de contorno, a região superior da superfície lateral esquerda, bem como, a superfície superior impõe-se uma pressão atmosférica $P_{\text{abs}} = 101,3$ kPa. Nas superfícies inferior, lateral direita, bem como, na superfície do dispositivo de galgamento é imposta uma condição de impermeabilidade e não-deslizamento com velocidade nula ($u = w = 0$ m/s).

Com relação às condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso e que a lâmina de água possui uma superfície livre com altura $h = 10,0$ m.

3. PROCEDIMENTOS NUMÉRICOS

O solver empregado é baseado na pressão e as simulações foram realizadas com esquema de advecção *Upwind* de primeira ordem e PRESTO (*Pressure Staggering Option*) para as discretizações espaciais do termo advectivo da equação da conservação da quantidade de movimento e pressão, respectivamente. O acoplamento pressão-velocidade é realizado pelo método PISO (Versteeg e Malalasekera, 2007). Para a determinação da superfície ocupada pela água é empregado o método *Geo-reconstruction*. Além disso, fatores de sub-relaxação de 0,3 e 0,7 foram impostos para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, respectivamente. As soluções obtidas aqui foram

consideradas convergidas quando os resíduos para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento nas direções x e y foram inferiores a 10^{-6} .

Todas as simulações foram realizadas usando um computador com processador Intel Xeon com clock de 3.3 GHz de 8 núcleos e 8 GB de memória RAM. Emprega-se uma Biblioteca de Passagem de Mensagem (MPI – do inglês: *Message Passing Interface*) para paralelização. O tempo de processamento de cada simulação foi de aproximadamente $1,44 \times 10^5$ s (40 h).

A Figura 3 ilustra as malhas empregadas no presente trabalho.

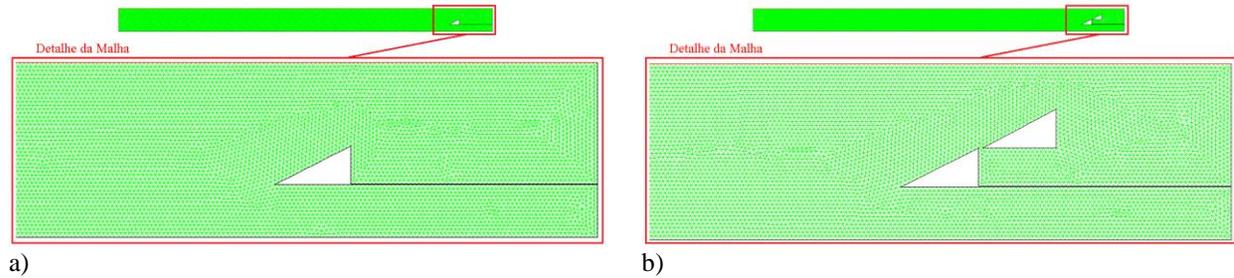


Figura 3. Discretização espacial aplicada ao dispositivo de galgamento onshore em escala real: a) rampa única; b) rampa bipartida.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, foi realizada uma discretização do domínio em volumes finitos triangulares, sendo gerados aproximadamente 58914 volumes finitos triangulares para a rampa única e bipartida.

Após, foi realizado um estudo de independência do passo de tempo para o problema transiente abordado e sua influência na altura da superfície livre da onda, Fig. 4(a), a solução independente foi verificada com resultados analíticos de Chakrabarti (2005). No primeiro estudo a altura da superfície livre da onda foi obtida para 4 diferentes passos de tempo: $\Delta t = 5,0 \times 10^{-3}$ s, $\Delta t = 1,0 \times 10^{-2}$ s, $\Delta t = 2,0 \times 10^{-2}$ s e $\Delta t = 4,0 \times 10^{-2}$ s. Em todas as simulações o tempo final foi de $t_f = 100,0$ s. A Figura 4(a) mostra uma boa concordância entre os resultados para os diversos passos de tempo estudados, com exceção do caso com $\Delta t = 4,0 \times 10^{-2}$ s onde é possível observar que houve uma defasagem com relação ao tempo e também um amortecimento na magnitude da onda. Consequentemente, foi adotado nas simulações posteriores de avaliação geométrica o passo de tempo de $\Delta t = 2,0 \times 10^{-2}$ s. Para a verificação do modelo numérico empregado foi realizada uma comparação entre a altura da superfície livre da onda obtida numericamente e medida em um ponto específico do tanque ($x = 50,0$ m) e a solução analítica. A Figura 5(b) mostra que a estabilização da solução numérica ocorre em torno de $t = 15,0$ s. Assim apenas o intervalo entre $15,0 \text{ s} \leq t \leq 80,0 \text{ s}$ foi considerado para a verificação da onda gerada. Analisando a diferença entre os resultados analíticos e numéricos no intervalo onde a onda estava estabilizada, o desvio médio obtido foi aproximadamente 0,1 % comparando-se as alturas da superfície livre e aproximadamente 8,0 % comparando-se somente a variação de altura da superfície livre.

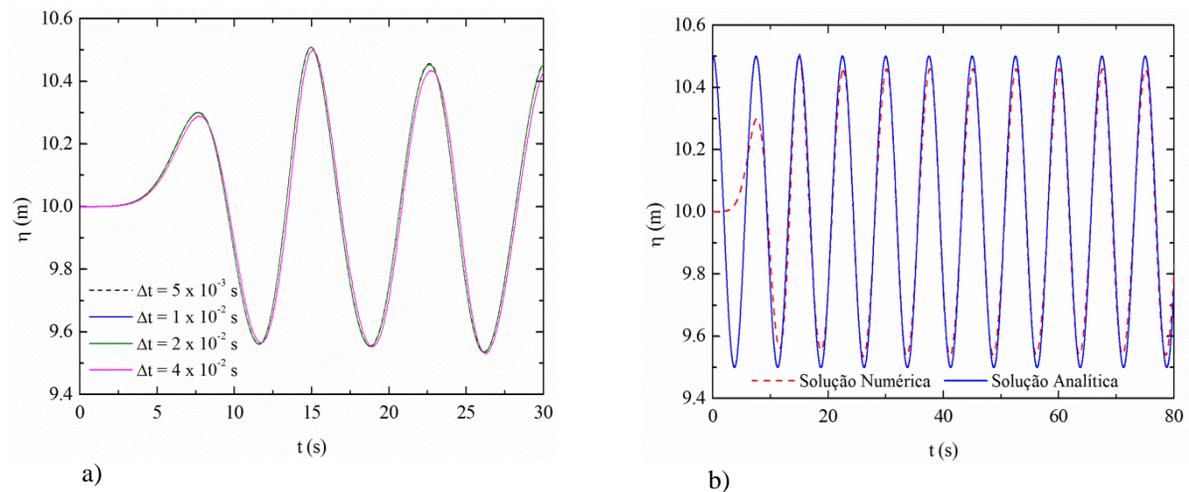


Figura 4. a) estudo de independência de passo de tempo, b) verificação da solução numérica com a solução analítica apresentada em (Chakrabarti, 2005).

A Figura 5 apresenta o comportamento instantâneo da água no dispositivo de galgamento para rampa única e rampa bipartida sobre a vazão mássica (\dot{m}) e a altura da água acumulada no interior do reservatório (h_a).

Na Figura 5a é possível observar que para todos os casos os picos de vazão mássica começaram a ocorrer em um instante de tempo de aproximadamente $t \sim 36,0$ s. Para a rampa única a maior magnitude foi observada em $t \sim 47,0$ s e seu valor foi $\dot{m} = 4260,00$ kg/s, enquanto que para a rampa bipartida o maior galgamento ocorreu no mesmo instante de tempo, $t \sim 95,0$ s, com magnitudes de $\dot{m} = 2621,35$ kg/s. Portanto, após a ocorrência do primeiro galgamento, todas as ondas que incidiram no dispositivo tiveram energia suficiente para realizar o galgamento. Isso pode ser comprovado pelos intervalos entre cada ocorrência do fenômeno. Os mesmos apresentam uma periodicidade próxima a do período da onda ($T = 12,0$ s). Vale destacar que, esse comportamento também foi observado anteriormente nos trabalhos prévios de Dos Santos et al. (2014), Goulart et al. (2015) e Martins (2016). Na Figura 5b se observa a altura da água acumulada no interior do reservatório (h_a), assim, para a rampa única o valor de h_a foi de 2,6603 m, e para a rampa bipartida h_a foi 2,5225 m.

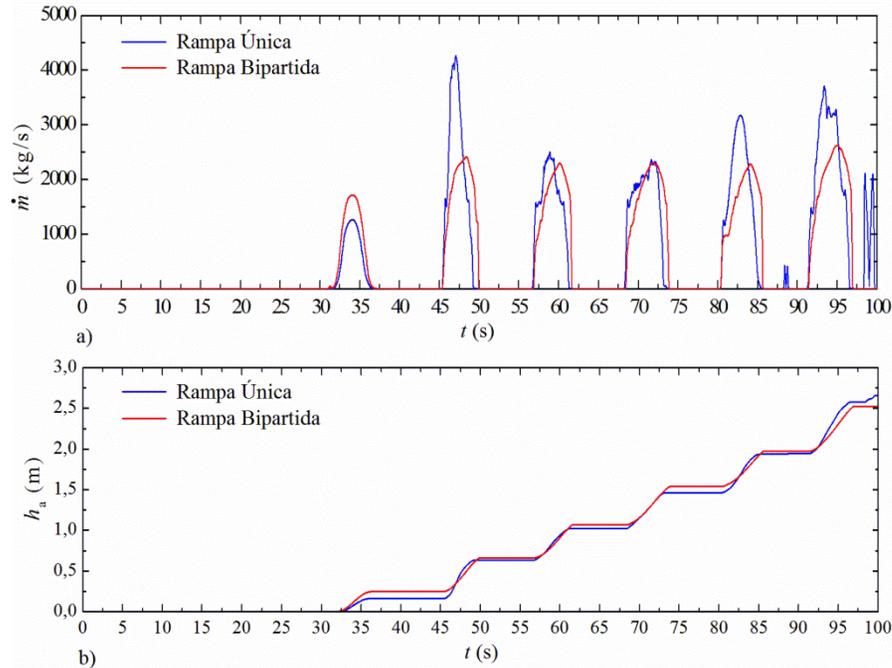


Figura 5. Comportamento instantâneo da água no dispositivo de galgamento: a) Vazão mássica, b) Altura da água acumulada no interior do reservatório.

Na Figura 6 é ilustrado o comportamento transiente hidrodinâmico do escoamento da água para a rampa única e rampa bipartida. Mais precisamente é apresentada a distribuição da fração volumétrica de água no domínio para dois instantes de tempo. Nos campos de fração volumétrica, a água é representada na cor vermelha, enquanto o ar é representado com a cor azul. Os campos de fração volumétrica são apresentados para os seguintes instantes de tempo: $t = 82,0$ s e $100,0$ s. Na Figura 6 (a - b) para $t = 82,0$ s pode ser percebida a ocorrência do ciclo de galgamento em ambas as rampas. Nota-se ainda que há água acumulada no reservatório devido outras ondas incidentes em instantes de tempo anteriores. A quantidade de massa que entra no reservatório é similar para a rampa única e a rampa bipartida. Observa-se também que a onda galgou um determinado trecho da segunda parte da rampa bipartida. Isso mostra que há potencial para a construção de uma segunda rampa, o que possibilita a inserção de um novo reservatório com uma maior altura disponível. Para $t = 100,0$ s é mostrado um instante de tempo onde a massa de água que não galgou está descendo a rampa. Nota-se também que a quantidade de massa total ($t = 100,0$ s tempo final de simulação) acumulada nos reservatórios é similar, mesmo para a rampa bipartida onde há uma restrição para entrada da água no reservatório ($L_l = 0,5$ m).

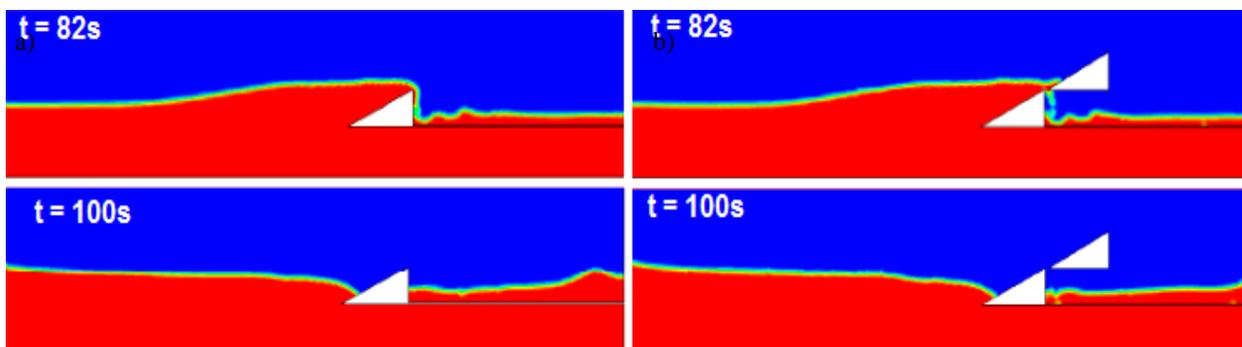


Figura 6. Comportamento transiente hidrodinâmico do escoamento da água para: a) rampa única; b) rampa bipartida.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico com o principal objetivo o de avaliar a influência da rampa única e a rampa bipartida no acúmulo de água no reservatório de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real, possibilitando futuros estudos sobre a avaliação de potência disponível usando este tipo de dispositivo. Para os dois casos uma onda monocromática com as mesmas características foi simulada sobre o dispositivo ($H = 2.0$ m, $\lambda = 113,3$ m e $T = 12.0$ s). Para tal estudo foram resolvidos escoamentos transientes de uma mistura ar-água no regime laminar. A solução numérica das equações de conservação da massa e quantidade de movimento foi obtida através do Método de Volumes Finitos, com o software FLUENT. O método *Volume of Fluid* foi empregado para o tratamento da interação entre as fases ar e água, permitindo a geração de ondas regulares em um tanque de ondas e sua interação com o dispositivo.

Os resultados mostraram que a máxima quantidade de água que entrou no reservatório ao longo do tempo foi obtida para o dispositivo de galgamento rampa única, conforme esperado. Contudo, a perda na quantidade de massa galgada para o caso da rampa bipartida foi muito pequena em comparação com o caso de rampa única. Isso indica que o emprego de rampa bipartida com o intuito de aumentar a coluna de água acumulada no reservatório, e conseqüentemente a potência disponível para conversão de energia das ondas em energia elétrica, pode ser uma estratégia interessante para melhorar a utilização deste dispositivo. Futuros estudos são necessários para investigar o aumento dessa energia acumulada e a eficiência no emprego de vários reservatórios.

6. AGRADECIMENTOS

O autor J. C. Martins agradece a CAPES pela bolsa de estudos. Os autores J. A. Souza, L. A. O. Rocha, L. A. Isoldi e E. D. dos Santos agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beels, C.; Troch, P.; De Visch, K.; Kofoed, J. P.; De Backer, G. Application of the time-dependent mild-slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of Wave Dragon wave energy converters. *Renewable Energy*, v. 35, p. 1644–1661, 2010.
- Buccino M., Vicinanza D., Salerno D., Banfi D., Calabrese M.. Nature and magnitude of wave loadings at Seawave Slot-cone Generators. *Ocean Engineering*, v. 95, p. 34–58, 2015.
- Chakrabarti, S. K. *Handbook of offshore engineering*. Vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 2005.
- 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.
- Falcão, A. F. De O., 2010 "Wave Energy Utilization: A Review of The Technologies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, Nº 3, p. 899–918.
- Fluent. *Documentation Manual – FLUENT 6.3.16*. Ansys, Inc., 2007.
- Goulart, M. M. ; Martins, J. C. ; Acunha Junior, I. C. ; Gomes, M. N. ; Souza, J. A. ; Rocha, L. A. O. ; Isoldi, L. A. ; Santos, E. D. Constructural design of an onshore overtopping device in real scale for two different depths. *Marine Systems & Ocean Technology*, v. 1, p. 1, 2015.
- Hirt, C. W.; Nichols, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, v. 39, p. 201-225, 1981.

- Horko, M., 2007. CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy Converter. Dissertação de Mestrado, School of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Computing and Mathematics, The University of Western.
- Jin, J., Liu, Z., Hyun, B. S., Hong, K. 3d Numerical Investigation On Reservoir System For An Overtopping Wave Energy Converter. *Journal of Korean Navigation and Port Research*, v. 36, p. 97–103, 2012.
- Kofoed, J. P., Frigaard, P., Friis-Madsen, E. and Sørensen, H. C., 2006. "Prototype Testing of The Wave Energy Converter Wave Dragon", *Renewable Energy*, Vol. 31, Nº 2, p. 181-189.
- Liu, Z.; Hyun B.; Jin, J. Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC, *Journal Of The Korean Society For Marine Environmental Engineering*, v. 11, nº 1, 2008.
- Margheritini, L.; Vicinanza, D.; Frigaard, P., 2009. "SSG Wave Energy Converter: Design, Reliability and Hydraulic Performance of an Innovative Overtopping Device". *Renewable Energy*, Vol. 34, Nº. 5, p. 1371–1380.
- Margheritini, L.; Stratigaki, V.; Troch, P., 2012. Geometry Optimization Of An Overtopping Wave Energy Device Implemented Into The New Breakwater Of The Hanstholm Port Expansion. In: *Twenty-Second International Offshore And Polar Engineering Conference*.
- Martins, J. C., 2016. Design construtal de um dispositivo de galgamento onshore em escala real para diferentes áreas de construção e ondas monocromáticas, Dissertação de mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- Nam, B. W., Shin, S. H., Hong, K. Y. and Hong, S. W. 2008. "Numerical Simulation of Wave Flow over the Spiral-Reef Overtopping Device". *Journal of Navigation and Port Research International Edition*. Vol.36, No.2 p. 97-103 2008. p. 6.
- Patankar, S. V., 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw Hill, New York, USA.
- Rocha, L. A. O.; Lorente, S.; Bejan, A., 2013. *Constructal Law and The Unifying Principle of Design*. Springer, New York.
- Santos, E. D. Dos, Machado, B. N., Zanella, M. M., Gomes, M. N., Souza, J. A., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2014. "Numerical Study of the Effect of the Relative Depth on the Overtopping Wave Energy Converters According to Constructal Design". *Defect and Diffusion Forum*, Vol. 348, p. 232–244.
- Srinivasan V., Salazar A.J., and Saito K., 2011. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. *Applied Mathematical Modeling*, vol. 35, n. 8, pp. 3710-3730.
- Versteeg, Henk Kaarle, Malalasekera, Weeratunge. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson; 2007. 503 p.
- Zabihian, F.; Fung, A. S., 2011. "Review of Marine Renewable Energies: Case Study of Iran". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, Nº 5, p. 2461–2474.

8. AVISO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material apresentado neste artigo.