



## VII SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 23 à 25 de Novembro de 2016

### ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DE UM ESPECTRO DE ONDAS COMPARADO A UMA ONDA MONOCROMÁTICA SOBRE UM DISPOSITIVO DE GALGAMENTO ONSHORE EMPREGANDO DESIGN CONSTRUTAL

Jaifer Corrêa Martins<sup>1</sup>, Marcelo Moraes Goulart<sup>2</sup>, Dante Vinícius Eloy Barbosa<sup>1</sup>, Mateus das Neves Gomes<sup>3</sup>, Jeferson Avila Souza<sup>1,2</sup>, Luiz Alberto Oliveira Rocha<sup>4</sup>, Liércio André Isoldi<sup>1,2</sup>, Elizaldo Domingues dos Santos<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 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  
e-mail: dante\_barbosa@yahoo.com.br

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> Instituto Federal do Paraná, Campus Paranaguá  
Rua Antônio Carlos Rodrigues, 453, Paranaguá, PR, Brasil  
e-mail: mateus.gomes@ifpr.edu.br

<sup>4</sup> 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 presente estudo apresenta um estudo numérico sobre um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo galgamento, aplicando o Design Construtal. O objetivo é avaliar a influência entre uma onda monocromática e um espectro de ondas (com período significativo e altura significativa do espectro de ondas dadas por  $T_s = 7,5$  s e  $H_s = 1,5$  m) sobre comportamento da geometria da rampa e a potência disponível ( $P_d$ ) em um caso específico de um dispositivo de galgamento encontrado na literatura. É empregado o Design Construtal para a análise geométrica. O caso estudado apresenta as características: diversas razões entre altura e comprimento da rampa ( $H_1/L_1$ ), relação entre as áreas da rampa e do tanque de ondas constante ( $\phi = A_r/A_T = 0,012$ ) e a distância entre o fundo do dispositivo e o fundo do tanque ( $S = 3,5$  m). 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 mostram que o comportamento de  $H_1/L_1$  é o mesmo, tanto com o emprego da onda monocromática, quanto para o espectro de ondas. Além disso, a potência disponível obtida com o emprego do espectro de ondas foi menor em comparação com uma onda monocromática, resultado esperado visto as características mais próximas do real (ou seja, altura e período de ondas variáveis) quando utilizamos um espectro de ondas Pierson-Moskowitz.*

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda energética mundial vem aumentando consideravelmente com o passar dos anos, assim a busca por alternativas para suprir tal demanda é essencial. Uma forma interessante de complementar a matriz energética de uma região é o aproveitamento da energia proveniente das ondas do mar para geração de energia elétrica. De acordo com Cruz e Sarmento (2004), a exploração da energia das ondas representa um domínio de inovação, onde há muito ainda por fazer. Por exemplo, o potencial de energia das ondas estimado no sul do Brasil é de aproximadamente 30 kW/m, o que justifica a pesquisa sobre o comportamento de dispositivos que explorem este tipo de energia na região. Entre os diversos tipos de equipamentos encontrados na literatura, um em especial chama atenção por seu princípio de funcionamento relativamente simples: o dispositivo de galgamento. Este dispositivo é constituído por uma rampa a qual é galgada pelas ondas do mar, a água então é acumulada no interior de um reservatório. O escoamento da água através de uma turbina de baixa queda gera energia elétrica (Fleming, 2012). Um esquema simples é ilustrado na Fig. 1.

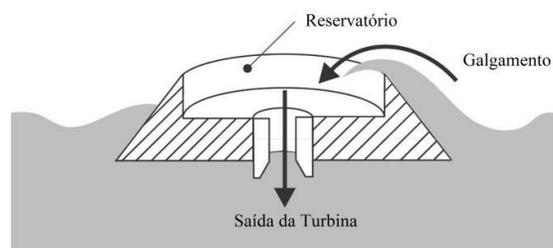


Figura 1. Ilustração do princípio de funcionamento do dispositivo de galgamento.

O número de estudos encontrados na literatura utilizando os métodos numéricos abordando o princípio de funcionamento de dispositivos conversores de energia das ondas do mar (WEC) em energia elétrica, vem aumentando significativamente nos últimos anos. Entre estes estudos, são apresentados a seguir alguns dos principais sobre o dispositivo de galgamento:

Em Liu *et al.* (2008) é apresentada a modelagem computacional de um dispositivo do tipo de galgamento utilizando a metodologia VOF (*Volume of Fluid*). As equações de conservação foram resolvidas com o *software* FLUENT baseado no Método de Volumes Finitos (MVF) e para geração da onda foi utilizada uma teoria linear. Para isso, geometrias diferentes para o conversor foram analisadas empregando modelos computacionais 2D (bidimensional). Várias condições das ondas incidentes e geometrias do dispositivo foram analisadas, resultando em recomendações sobre a inclinação da rampa do dispositivo.

Nam *et al.* (2008) realizam 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.

Margheritini *et al.* (2012), realizam uma análise de viabilidade de implementação do SSG (*Sea-wave Slot-cone Generator*) 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.

Beels *et al.* (2010) utilizaram o modelo *MILDwave*, o qual emprega as equações de declividade (*mild-slope equations*) e descreve a transformação de ondas irregulares (espectro JONSWAP). Desta forma, o modelo numérico desenvolvido foi implementado em um único *Wave Dragon* e em diferentes formações do conjunto de dispositivos. 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.

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 padrão *k-ε* aplicado como modelagem 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.

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  $S$ .

Em Martins (2016) foi realizado um estudo empregando duas ondas monocromáticas diferentes e três diferentes áreas construtivas ( $\phi$ ) 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 ( $\phi$ ), 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 é realizado um estudo numérico empregando o espectro *Pierson-Moskovitz* (PM) em um dos casos estudados por Martins (2016), no qual foram utilizadas ondas monocromáticas. Mais especificamente, pretende-se analisar se o comportamento da geometria da rampa (razão  $H_1/L_1$ ) se mantém o mesmo quando utilizado ondas irregulares (espectro PM), além de investigar a influência na potência disponível ( $P_d$ ) obtida. Para o estudo foi utilizado o caso de submersão  $S = 3,5$  m, período de onda  $T = 7,5$  s, altura da onda  $H = 1,0$  m, frações de área ( $\phi = A_r/A_T = 0,012$ ) e diversas razões entre altura e comprimento da rampa  $H_1/L_1$   $0,31 \leq H_1/L_1 \leq 0,44$ .

## 2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MODELAGEM MATEMÁTICA

O problema físico analisado consiste 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 do estudo é analisar a influência do espectro de *Pierson-Moskovitz* no comportamento da geometria da rampa (razão  $H_1/L_1$ ), além de investigar a influência na potência disponível ( $P_d$ ) obtida, no caso estudado por Martins (2016) descrito anteriormente. As dimensões do tanque são as mesmas utilizadas por Martins (2016), ou seja, a altura do tanque ( $H_T$ ) é igual a 20,0m, comprimento do mesmo,  $L_T = 327,0$  m e o comprimento do reservatório,  $L_R = 20,0$  m.

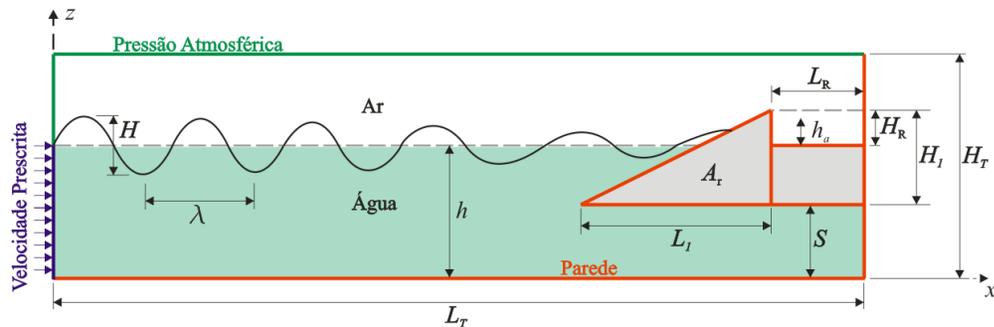


Figura 2. Domínio computacional de um dispositivo de galgamento em escala real com dois graus de liberdades.

### 2.1 Design Construtal Aplicado ao Dispositivo de Galgamento

No âmbito do Design Construtal (Bejan, 2000; Bejan, 2008), a avaliação geométrica do problema estudado está sujeita a duas restrições, ou seja, a área total de restrição de tanque a onda:

$$A_T = H_T L_T \quad (1)$$

e a área de restrição a rampa:

$$A_r = \frac{H_1 L_1}{2} \quad (2)$$

A Eq. (2) pode ser reescrita como a fração de área do dispositivo:

$$\phi = \frac{A_r}{A_T} \quad (3)$$

Também está sendo considerado como uma restrição do problema que  $(S + H_1) > (h + H/2)$  de forma que a crista da onda não seja superior à máxima altura do dispositivo.

A equação utilizada para determinação da potência disponível por metro de frente de onda foi:

$$P_d = \frac{gh_a(t_f)}{t_f} \int_{t_i}^{t_f} \dot{m} dt \quad (4)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ),  $t_i$  é o instante de tempo inicial (s),  $t_f$  é o instante de tempo final (s) ( $t_f = 100,0$  s para o presente estudo),  $h_a(t_f)$  é a altura de água acumulada no reservatório em  $t = t_f$ , e  $\dot{m}$  é a vazão mássica da água acumulada no reservatório ( $kg/s$ ).

## 2.2 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, Eq. (5):

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

onde  $\rho$  é a massa específica da mistura ( $kg/m^3$ ) e  $\vec{v}$  o vetor de velocidade do escoamento ( $m/s$ ).

A equação de conservação da quantidade de movimento para a mistura, Eq. (6):

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

onde  $p$  é a pressão ( $N/m^2$ ),  $\rho \vec{v}$  e  $\vec{F}$  são as forças de campo e forças externas ao corpo ( $N/m^3$ ), 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  $\vec{\tau}$  é o tensor taxa de deformação ( $N/m^2$ ), que para um fluido Newtoniano, Eq. (7):

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

onde  $\mu$  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 ( $\alpha_q$ ) 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):

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

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

### 2.3 Geração da onda – Espectro de Ondas

O espectro de *Pierson-Moskowitz*, adotado no presente estudo, é válido para um mar totalmente desenvolvido e assume que as ondas estão em equilíbrio com o vento (Chakrabarti, 2005). Um fluxograma do processo de geração e análise de ondas irregulares é apresentado na Fig. 3. A densidade espectral ( $S(\omega)$ ) é dada por:

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \frac{H_S \omega_p^4}{\omega^5} e^{-\left(\frac{5\omega_p^4}{4\omega^4}\right)} \quad (11)$$

onde:  $H_S$  é a altura significativa (m), neste trabalho  $H_S = 1,5$  m,  $\omega$  é a frequência da onda (rad/s), e  $\omega_p$  é a frequência de pico da onda (rad/s) e pode ser determinada por:

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_S} \quad (12)$$

onde:  $T_S$  é o período significativo do espectro (s), neste trabalho  $T_S = 7,5$  s.

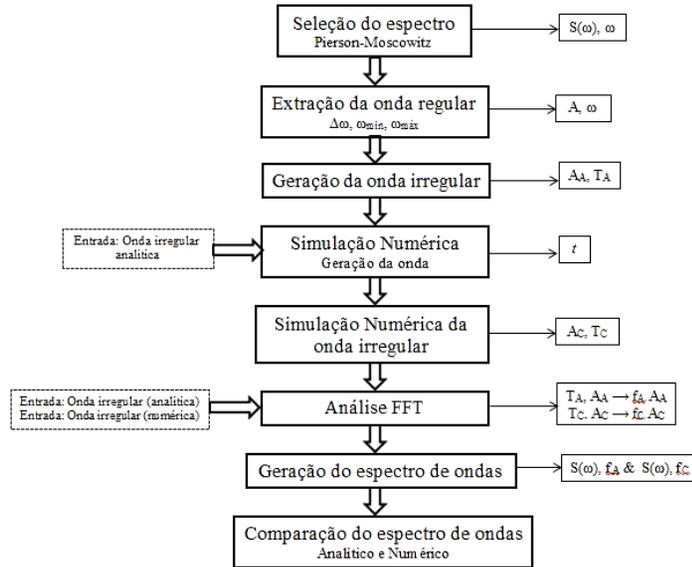


Figura 3. Metodologia de análise da geração de ondas irregulares (Adaptado de Elangovan, 2011).

De acordo com ANSYS (2016) é possível determinar o intervalo de frequências de modo que o mesmo compreenda a região de maior energia da onda, sendo o recomendável dado por:

$$\omega_{\min} = 0,5 \omega_p \quad (13)$$

$$\omega_{\max} = 2,5 \omega_p \quad (14)$$

No presente estudo o espectro é formado por 15 ondas com frequências dentro do intervalo determinado pelas Eqs. (13) e (14). É possível distribuir de forma igual às frequências a serem consideradas através da seguinte relação:

$$d\omega = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{n_o} \quad (15)$$

onde:  $n_o$  é o número de ondas consideradas no espectro e  $d\omega$  é o diferencial de frequência.

É possível extrair cada uma das 15 ondas regulares que compõem o espectro de ondas considerado. Para tanto deve ser considerada a seguinte relação entre densidade espectral e amplitude (Elangovan, 2011; Journée, 2001):

$$S(\omega_n)d\omega = \frac{1}{2}\zeta_{a_n}^2 \quad (16)$$

onde:  $\zeta_{a_n}$  é a amplitude da componente do espectro (m), ou seja, a amplitude de uma das 15 ondas que formam o espectro deste estudo.

Mantendo o ângulo de fase diferente para cada onda regular, a onda irregular pode ser gerada analiticamente pela adição de toda a onda regular. Conforme apresentado a seguir (Elangovan, 2011):

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{n_n} \zeta_{a_n} \cos(k_n x - \omega_n t + \varepsilon_n) \quad (17)$$

onde:  $k_n$  é o número de onda da componente (rad/m),  $x$  a posição espacial (m),  $\omega_n$  a frequência da componente (rad/s),  $t$  o tempo (s) e  $\varepsilon_n$  o ângulo de fase randômico da componente (rad). O número de onda ( $k_n$ ) pode ser determinado pela relação de dispersão, dada por (Dean e Dalrymple, 1991):

$$\omega^2 = g k \tanh(kh) \quad (18)$$

A geração numérica da onda irregular levará em conta as componentes do espectro extraídas a partir da Eq. (17). Posteriormente, a onda irregular gerada numericamente pode ser comparada com a onda analítica. Além da comparação da onda irregular, a análise através da Transformada Rápida de Fourier (FFT) será empregada para a comparação da densidade espectral analítica e numérica.

## 2.4 Condições de Contorno

Como é possível observar na Fig. 2, o gerador de ondas numérico é posicionado no lado esquerdo do tanque de ondas, com a condição de contorno de velocidade prescrita. Para a geração de ondas irregulares é considerada a Eq. (17) e suas respectivas componentes, horizontal ( $u$ ) e vertical ( $w$ ), da velocidade da onda como condição de contorno (velocidade de entrada prescrita). Essas componentes da velocidade variam em função do espaço e do tempo e são impostas na superfície de entrada e dadas por (Chakrabarti, 2005; Dean e Dalrymple, 1991; McCormick, 1976):

$$u = \zeta_{a_n} g k_n \frac{\cosh(k_n z + k_n h)}{\omega_n \cosh(k_n h)} \cos(k_n x - \omega t) \quad (19)$$

$$w = \zeta_{a_n} g k_n \frac{\sinh(k_n z + k_n h)}{\omega_n \sinh(k_n h)} \sin(k_n x - \omega t) \quad (20)$$

onde:  $g$  a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);  $\omega_n$  é a frequência da componente, e  $z$  é a variação da posição entre a superfície livre da água e o fundo do mar (m).

Para as outras condições de contorno, a região superior da superfície lateral esquerda, bem como, a superfície superior impõe-se uma pressão atmosférica  $P_{abs} = 101,3$  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 Core i7-5820K com clock de 3.3 GHz de 6 núcleos e 16 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  $1,08 \times 10^5$  s (30 h).

A Figura 4 ilustra a malha empregada no presente trabalho, a mesma utilizada em Martins (2016), e também as condições de contorno empregadas no domínio.

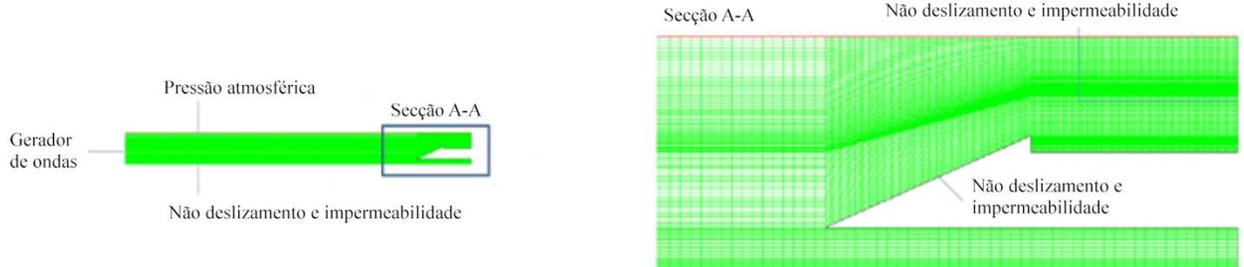


Figura 4. Discretização espacial aplicada ao dispositivo de galgamento onshore em escala real.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5 é apresentada uma comparação entre a elevação da superfície livre obtida analiticamente e numericamente para onda regular da Teoria de Stokes de 2ª Ordem na Fig. 5a, espectro *Pierson-Moskowitz* na Fig 5b e a densidade espectral na Fig 5c. É importante ressaltar que a equação analítica para a onda regular de Stokes de 2ª Ordem (Chakrabarti, 2005) é obtida a partir da Eq. (22) a seguir:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{H^2 k \cosh(kh)}{16 \sinh^3 kh} (2 + \cosh 2(kh)) \cos 2(kx - \sigma t) \quad (22)$$

De uma maneira qualitativa é possível notar uma boa concordância entre as duas soluções apresentadas na Fig. 5a.

Já a equação analítica para o espectro *Pierson-Moskowitz* é obtida a partir da Eq. (7) e da soma das amplitudes instantânea para as 15 ondas componentes do espectro em consideração. E também de uma maneira qualitativa é possível notar uma razoável concordância entre as duas soluções apresentadas na Fig. 5b.

Para comparar as alturas significativas, da solução analítica e numérica, pode-se utilizar a norma  $l_\infty$ , dada por (Kreyszig, 2011):

$$\|x\|_\infty = \max_j |x_j| \quad (23)$$

onde  $x_j$  representa a variável em consideração instantânea.

Em termos quantitativos é possível verificar, no intervalo onde a onda encontra-se estabilizada, que a diferença obtida analiticamente e numericamente para onda regular de Stokes de 2ª Ordem, apresentou uma diferença de aproximadamente 12,0 % com relação à variação de altura da superfície livre. Enquanto que para a solução analítica, utilizando a norma  $l_\infty$ , do espectro *Pierson-Moskowitz* obteve-se uma magnitude de 1,0621 e para a solução numérica a norma foi igual a 0,7041. Assim, nos picos de elevação as alturas significativas possuem uma diferença de aproximadamente 0,3580 m. Esta diferença ocorre devido a influência da profundidade de propagação da onda.

Considerando à densidade espectral, conforme apresentado na Fig. 5c, é evidente o efeito do fundo do tanque de ondas na propagação da onda. Calculando a norma  $l_\infty$ , Eq. (23), é encontrado para a densidade espectral obtida analiticamente um valor igual a 0,2237 e para a solução numérica: quando  $h = 10$  m um valor igual a 0,14022 e quando  $h = 40$  m um valor igual a 0,20587. Sendo assim é possível destacar que o modelo computacional adotado neste trabalho reproduz o fenômeno real de maneira adequada. Ainda é importante ressaltar que o avanço no tempo utilizado foi de 0,02 s, ou seja,  $T_S / 375$ . Na análise por Transformada Rápida de Fourier foram utilizados 2048 pontos.

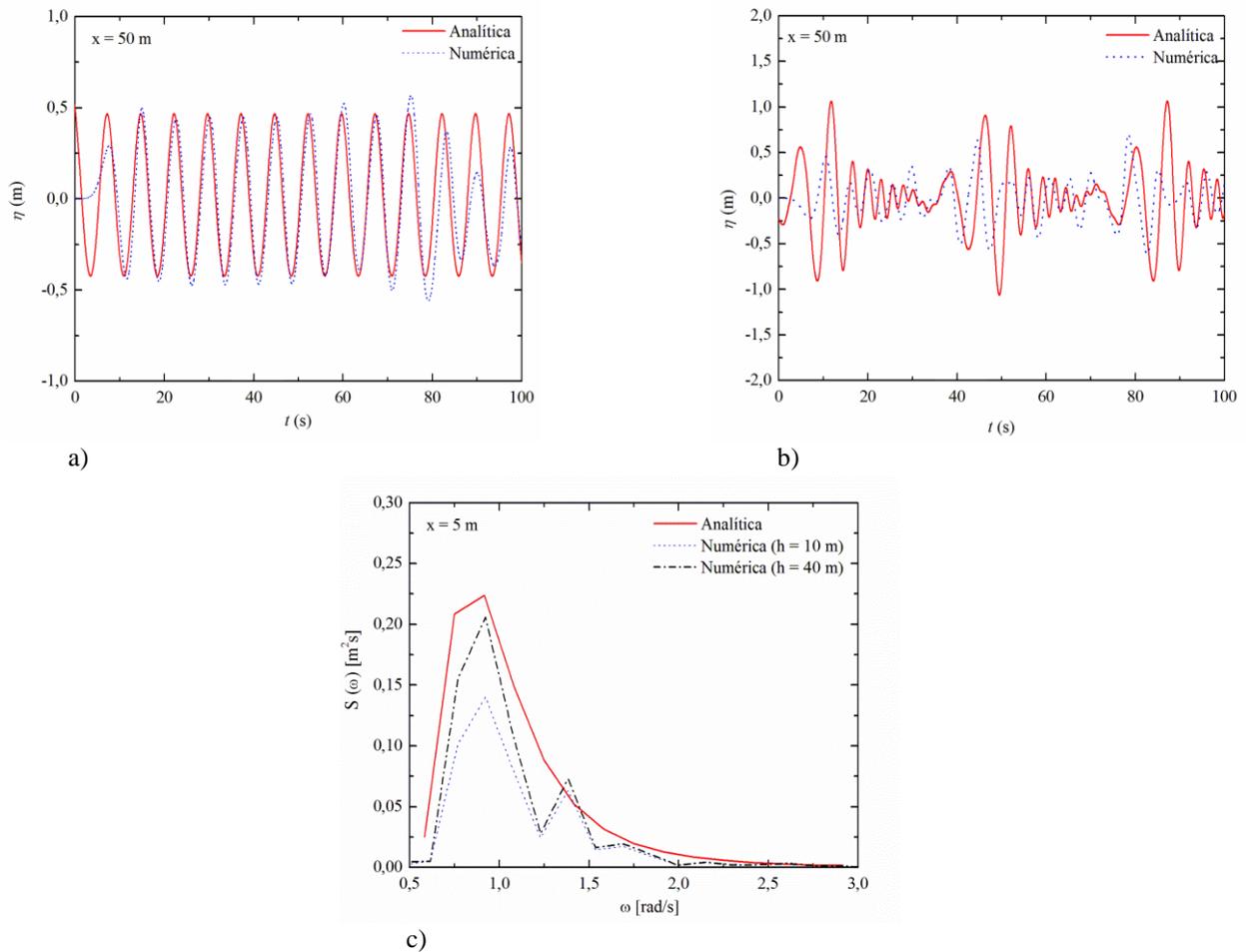


Figura 5. Comparação da solução analítica com a numérica da: (a) elevação da superfície livre em  $x = 50$  m para Stokes de 2ª Ordem; (b) elevação da superfície livre em  $x = 50$  m para Pierson-Moskowitz e (c) da densidade espectral.

A Figura 6 apresenta o comportamento instantâneo da água no dispositivo de galgamento para a razão  $H_1/L_1 = 0,33$  para o espectro de ondas e para a onda monocromática, sobre a vazão mássica ( $\dot{m}$ ) e a altura da água acumulada no interior do reservatório ( $h_a$ ), para  $\phi = 0,012$ ,  $S = 3,5$  m.

Na Figura 6a é possível observar que para a onda monocromática os picos de vazão mássica começaram a ocorrer no instante de tempo de aproximadamente  $t \sim 53,0$  s e a maior magnitude foi observada em  $t \sim 99,4$  s e seu valor foi  $\dot{m} = 1094,32$  kg/s. Para o espectro PM, o galgamento inicial ocorreu em um instante de tempo posterior ( $t \sim 82,0$  s) e a maior magnitude foi observada em  $t \sim 85,8$  s e seu valor foi  $\dot{m} = 451,26$  kg/s. Para a onda monocromática, os intervalos de galgamento ocorreram com periodicidade próxima a do período da onda ( $T = 7,5$  s) com uma defasagem muito pequena entre os picos de cada caso. Enquanto isso, para o espectro os intervalos de galgamento em geral, os picos de galgamento ocorrem na frequência de incidência da onda sobre o dispositivo. Contudo, como há variação das ondas em cada incidência sobre o dispositivo, em alguns intervalos o galgamento não ocorre. Quando há galgamento, as ocorrências são observadas para instantes muito próximos aos instantes em que o fenômeno é observado na onda monocromática.

Na Figura 6b se observa a altura da água acumulada no interior do reservatório ( $h_a$ ) depois de  $t = 100$  s, quando o modelo considera uma onda regular de Stokes de 2ª ordem os resultados indicam que  $h_a = 0,7662$  m e para o espectro PM  $h_a = 0,2025$  m.

A Figura 7 apresenta o comportamento de  $H_1/L_1$  sobre a potência disponível ( $P_d$ ) para uma onda monocromática e para o espectro de onda ao longo do intervalo de tempo analisado ( $0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$ ) para  $\phi = 0,012$ . A potência disponível máxima obtida para a razão  $H_1/L_1 = 0,33$  com a onda monocromática foi igual a  $1149,85$  W/m e para o espectro de onda  $P_d = 80,33$  W/m. Ou seja,  $P_d$  da onda regular foi aproximadamente 14,31 vezes maior do que a  $P_d$  alcançada com o espectro PM. Este é um resultado também esperado, pois a utilização do espectro de ondas simula uma condição mais próxima do real, ou seja, há uma variação do período ( $T$ ) e altura ( $H$ ) da onda, resultando em

uma menor energia global da onda em comparação com a onda regular, na qual são mantidos constantes período e altura da onda.

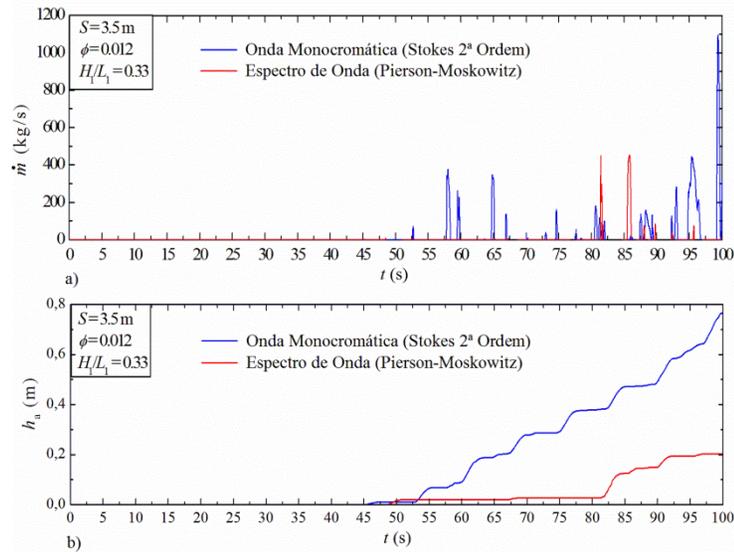


Figura 6. Comportamento instantâneo da água no dispositivo de galgamento: a) Vazão mássica, b) Altura da água acumulada no interior do reservatório.

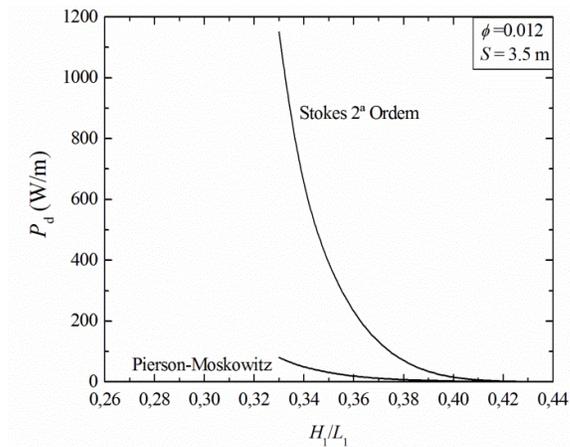


Figura 7. Comportamento de  $H_1/L_1$  sobre a potência disponível ( $P_d$ ) para uma onda monocromática e para o espectro de onda.

## 5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico com o objetivo de analisar a influência de um espectro de ondas em comparação com uma onda monocromática sobre o comportamento da geometria da rampa de um dispositivo de galgamento obtida em estudo anterior encontrado na literatura. Foi considerado um espectro de ondas real com altura significativa  $H_s = 1,5\text{ m}$ , período significativo  $T_s = 7,5\text{ s}$  e com 15 componentes de onda. Assim, o principal objetivo foi determinar qual a influência do espectro de ondas sobre a razão  $H_1/L_1$  da rampa e a potência disponível obtida a partir do acúmulo de água no reservatório do dispositivo de galgamento. Para a avaliação geométrica, o método Design Construtal foi usado para definir as variações das geometrias, permitindo definir qual arranjo geométrico que possibilita um melhor desempenho do dispositivo de galgamento.

Desta forma, foi possível observar que o comportamento de  $H_1/L_1$  sobre a potência disponível ( $P_d$ ) foi semelhante, tanto para a onda monocromática de Stokes de 2ª ordem como para o espectro de ondas de Pierson-Moskowitz. Porém, os valores obtidos para a potência disponível foram menores quando utilizado o espectro de ondas em comparação com a onda monocromática. Resultado este esperado visto o espectro de ondas representar condições mais próxima do real, resultando em uma menor energia global da onda quando comparada a onda regular.

Já os casos ótimos foram obtidos para a razão  $H_1/L_1 = 0,33$ , assim, a potência disponível máxima obtida com a onda monocromática foi igual a 1149,85 W/m e  $h_a = 0,7662$  m; e para o espectro de onda  $P_d = 80,33$  W/m e  $h_a = 0,2025$  m.

Em suma, os resultados obtidos para os arranjos geométricos estudados, comparando o espectro de ondas de *Pierson-Moskowitz* com a onda monocromática de Stokes de 2ª ordem, fornecem uma recomendação teórica sobre a geometria ideal do dispositivo de galgamento para condições de mar utilizadas.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores J. C. Martins e D. V. E. Barbosa agradecem a CAPES pelas bolsas 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

- Ansys, 2016. “Theory Guide FLUENT 2016”.
- 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.
- Bejan A. Shape and structure, from engineering to nature. New York: Cambridge University Press; 2000. 324 p.
- Bejan A. Design with constructal theory. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons; 2008. 529 p
- Chakrabarti, S. K. Handbook of offshore engineering. Vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 2005.
- Cruz, J. M. B. P., Sarmento, 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. Elangovan, M., 2011. “Simulation of irregular waves by CFD”. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, V. 5, pp- 427-431.
- Elangovan, M., 2011. “Simulation of irregular waves by CFD”. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, V. 5, pp- 427-431.
- Fleming, F. P. Avaliação Do Potencial De Energias Oceânicas No Brasil, 2012.
- 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. Constructal 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.
- 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.
- Journée, J.M.J., Massie, W. W., 2001. “Offshore Hydrodynamics” First edition.
- Kreyszig, E., Kreyszig, H., Norminton, E. J., 2011, “Advanced Engineering Mathematics”, 10ª ed., 1283 p.
- 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.; 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.
- McCormick, M. E., 1976. Ocean engineering wave mechanics. John Wiley & Sons, USA, New York.
- Nam, B. W., Shin, S. H., Hong, K. Y., Hong, S. W. Numerical Simulation Of Wave Flow Over The Spiral-Reef Overtopping Device. *The Eighth Isope Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*, 2008.
- Nam, B. W., Shin, S. H., Hong, K. Y., Hong, S. W., 2008. Numerical Simulation Of Wave Flow Over The Spiral-Reef Overtopping Device. *The Eighth Isope Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*.
- V. Srinivasan, A.J. Salazar, and K. Saito, 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.

## 8. AVISO DE RESPONSABILIDADE

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