



REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

ANÁLISE NUMÉRICA DE UM DISPOSITIVO DE GALGAMENTO *ONSHORE* COMPARANDO A INFLUÊNCIA DE UMA ONDA MONOCROMÁTICA E DE UM ESPECTRO DE ONDAS¹

JAIFER CORRÊA MARTINS², MARCELO MORAES GOULART³, MATEUS DAS NEVES
GOMES⁴, JEFERSON AVILA SOUZA⁵ LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA⁶, LIÉRCIO
ANDRÉ ISOLDI⁷, ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS⁷

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

²Doutorando em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), jaifercm@gmail.com.

³Doutorando em Modelagem Computacional na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), moraesgoulart@yahoo.com.br.

⁴Professor do Instituto Federal do Paraná (IFPR), Campus Paranaguá, mateus.gomes@ifpr.edu.br.

⁵Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), jasouza@furg.br.

⁶Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), luiyrocha@mecanica.ufrgs.br.

⁷Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), liercioisoldi@furg.br, elizaldosantos@furg.br.

RESUMO – No presente estudo é realizada uma análise numérica sobre um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo galgamento. O objetivo é realizar uma comparação entre uma onda monocromática e um espectro de ondas (com período significativo da onda (T_s) de 7,5 s e altura significativa da onda (H_s) de 1,5 m) sobre 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: da razão entre altura e comprimento da rampa (H_1/L_1) igual a 0,33, relação entre as áreas da rampa e do tanque de ondas ($\phi = A_r/A_T$) igual 0,012 e submersão (S) do dispositivo igual a 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 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 é utilizado um espectro de ondas.

Palavras-chave - Espectro de onda, Energia das Ondas, Dispositivo de Galgamento.

NUMERICAL ANALYSIS OF AN ONSHORE OVERTOPPING DEVICE COMPARING THE INFLUENCE OF A MONOCHROME WAVE AND A WAVES SPECTRUM

ABSTRACT - In the present study a numerical analysis is performed over a sea wave energy converter device, overtopping type, in electric energy. The present work aims to perform a comparison between a monochromatic wave and a wave spectrum (significant wave period (T_s) of 7.5 s and significant wave height (H_s) of 1.5 m) over the available power (P_d) in a specific case of overtopping device found in the literature. The Constructal Design is used for the geometric analysis. The studied case presents the characteristics: ratio between height and length ramp (H_1/L_1) equal to 0.33, ratio between the ramp and wave tank areas ($\phi = A_r / A_T$) equal to 0.012 and submersion (S) of the device equal to 3.5 m. For the numerical solution, a computational fluid dynamics code is used, based on the Finite Volume Method (MVF). The multiphase Volume of Fluid (VOF) model is applied in the treatment of water-air interaction. The results show that the available power obtained using the wave spectrum was smaller compared to a monochromatic wave, an expected result considering the characteristics closer to the real (ie, height and variable wave period) when a spectrum of waves is used.

Keywords - Wave Spectrum, Wave Energy, Overtopping Device.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de fontes renováveis para complementar a matriz energética de uma região e suprir a demanda energética crescente, vem aumentando consideravelmente nos últimos anos. Uma alternativa interessante é o aproveitamento da energia proveniente das ondas do mar para geração de energia elétrica. Conforme Cruz e Sarmento (2004), a exploração da energia das ondas representa um domínio de inovação, onde há muito ainda por fazer. De acordo com Falcão (2010), um bom potencial energético pode ser encontrado em regiões afastadas da linha do Equador. Por exemplo, o potencial de energia das ondas estimado no sul do Brasil é de aproximadamente 30 kW/m, o que justifica estudos de implementação de dispositivos que explorem esta energia alternativa na região. Dentre os dispositivos para o aproveitamento da energia das ondas 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 que é galgada pelas ondas do mar. Após a ocorrência do galgamento, a água acumulada no reservatório escoar através de uma turbina de baixa queda gerando energia elétrica (Fleming, 2012) (Fig. 1).

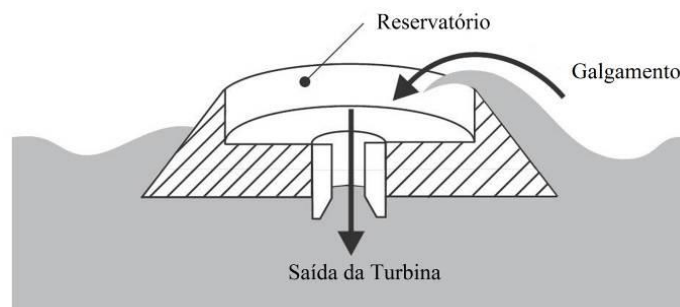


Figura 1: Ilustração do princípio de funcionamento do dispositivo de galgamento.

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

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 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) estudou 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 .

Já em Martins (2016) foi realizado um estudo empregando duas ondas monocromáticas diferentes e três diferentes áreas construtivas (ϕ) do da 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 empregando o espectro *Pierson-Moskovitz* (PM) no caso ótimo obtido em Martins (2016), para uma onda com período $T = 7,5$ s. Mais especificamente, pretende-se avaliar a influência do espectro PM sobre a potência disponível obtida, em comparação com a onda monocromática utilizada em Martins (2016).

MATERIAIS E MÉTODOS

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-Moskowitz* (PM) sobre o caso ótimo obtido em Martins (2016), o qual conduziu a maior potência disponível considerando uma onda monocromática com comprimento de onda de $\lambda = 65,4$ m, período $T = 7,5$ s e altura da onda $H = 1,0$ m. O caso ótimo se deu para uma razão $H_1/L_1 = 0,33$, $S = 3,5$ m e relação entre as áreas da rampa e do tanque de ondas ($\phi = A_r/A_T$) igual 0,012, resultando em uma potência

disponível máxima (P_{dm}) igual a 1149,85 W/m. Além disso, 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.

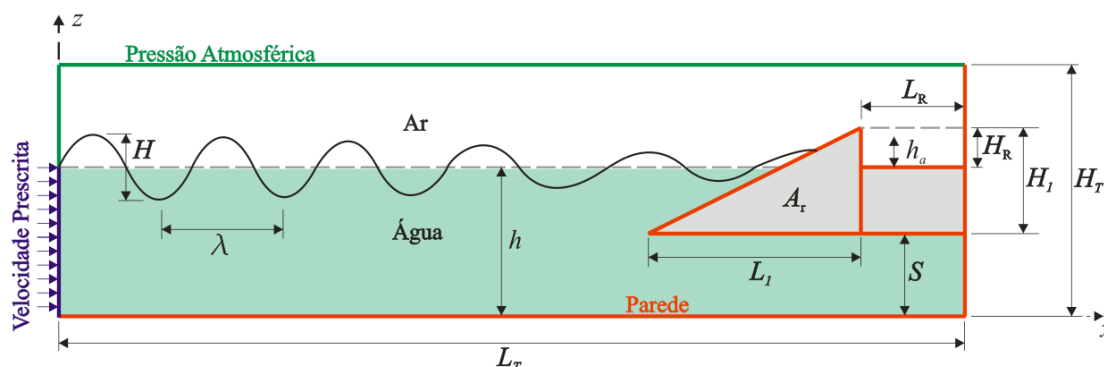


Figura 2. Domínio computacional de um dispositivo de galgamento em escala real com dois graus de liberdade.

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, 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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

onde ρ 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 é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

onde p é a pressão (N/m^2), $\rho\vec{v}$ e \vec{F} são as forças de campo e 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 foi desconsiderado. O termo $\bar{\tau}$ é o tensor taxa de deformação (N/m^2), que para um fluido Newtoniano, é dado por:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot \vec{v}^T) \right] \quad (3)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica ($\text{kg}/(\text{ms})$).

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, deve 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 (Lv et al., 2011, Dos Santos et al., 2014):

$$\frac{\partial(\rho\alpha_{\text{água}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\alpha_{\text{água}}\vec{v}) = 0 \quad (4)$$

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):

$$\rho = \alpha_{\text{água}}\rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}}\rho_{\text{ar}} \quad (5)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}}\mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}}\mu_{\text{ar}} \quad (6)$$

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:

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \frac{H_S \omega_P^4}{\omega^5} e^{-\left(\frac{5\omega_P^4}{4\omega^4}\right)} \quad (7)$$

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

$$\omega_P = \frac{2\pi}{T_S} \quad (8)$$

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

De acordo com o 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:

$$\omega_{\min} = 0,5 \omega_P \quad (9)$$

$$\omega_{\max} = 2,5 \omega_P \quad (10)$$

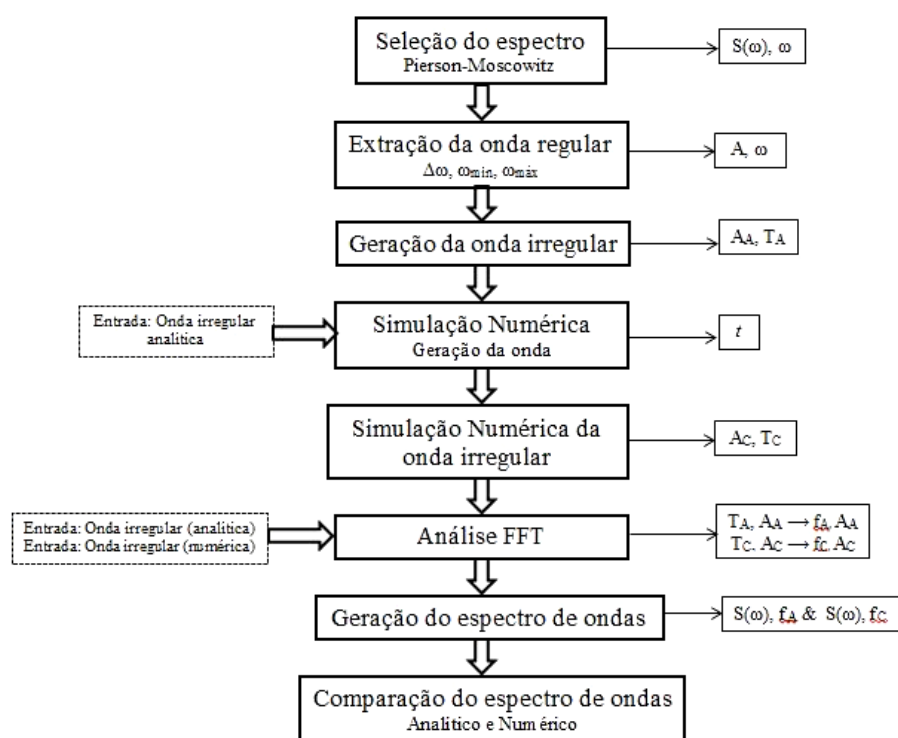


Figura 3. Metodologia de análise da geração de ondas irregulares (adaptado de Elangovan, 2011).

No presente estudo o espectro é formado por 15 ondas com frequências dentro do intervalo determinado pelas Eqs. (9) e (10). É possível distribuir de forma igual às frequências a serem consideradas através da seguinte relação:

$$d\omega = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{n_o} \quad (11)$$

onde: n_o é o número de ondas consideradas no espectro.

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 (Ansys, 2016; Journee, 2001):

$$S(\omega_n)d\omega = \frac{1}{2} \zeta_{a_n}^2 \quad (12)$$

onde: ζ_{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 (Ansys, 2016):

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{n_o} \zeta_{a_n} \cos(k_n x - \omega_n t + \varepsilon_n) \quad (13)$$

onde: k_n é o número de onda da componente (rad/m), x a posição espacial (m), ω_n a frequência da componente (rad/s), t o tempo (s) e ε_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):

$$\omega^2 = g k \tanh(k h) \quad (14)$$

A geração numérica da onda irregular levará em conta as componentes do espectro extraídas a partir da Eq. (13). 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.

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. (13) 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; MacCormick, 1976):

$$u = \zeta_{a_n} g k_n \frac{\cosh(k_n z + k_n h)}{\omega_n \cosh(k_n h)} \cos(k_n x - \omega_n t) \quad (15)$$

$$w = \zeta_{a_n} g k_n \frac{\sinh(k_n z + k_n h)}{\omega_n \sinh(k_n h)} \sin(k_n x - \omega_n t) \quad (16)$$

onde: g a aceleração da gravidade (m/s^2); ω_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 $P_{\text{abs}} = 101,3 \text{ kPa}$. 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 ($u = w = 0 \text{ m/s}$).

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 $h = 10,0 \text{ m}$.

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.

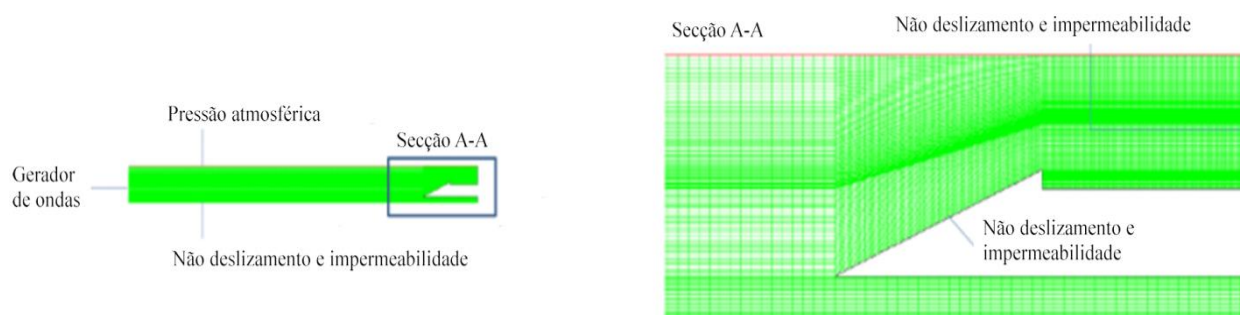


Figura 4. Discretização espacial aplicada ao dispositivo de galgamento *onshore* em escala real.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5 é apresentada uma comparação gráfica 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 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. (17) a seguir:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{H^2 k \cosh(kh)}{16 \sinh^3 kh} (2 + \cosh 2(kh)) \cos 2(kx - \sigma t) \quad (17)$$

De uma maneira qualitativa é possível notar uma boa concordância entre as duas soluções apresentadas na Fig. 5^a, onde, para este caso, a geração numérica da onda se deu com a utilização de uma UDF (*User-Defined Function*).

Já na Fig. 5b, a equação analítica para o espectro *Pierson-Moskowitz* é obtida a partir da Eq. (13) 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, neste caso, a geração numérica da onda é definida diretamente pelo *software* FLUENT.

Para comparar as alturas significativas, da solução analítica e numérica, pode-se utilizar a norma l_∞ , dada por (Kreyszig et al., 2011):

$$\|x\|_\infty = \max_j |x_j| \quad (18)$$

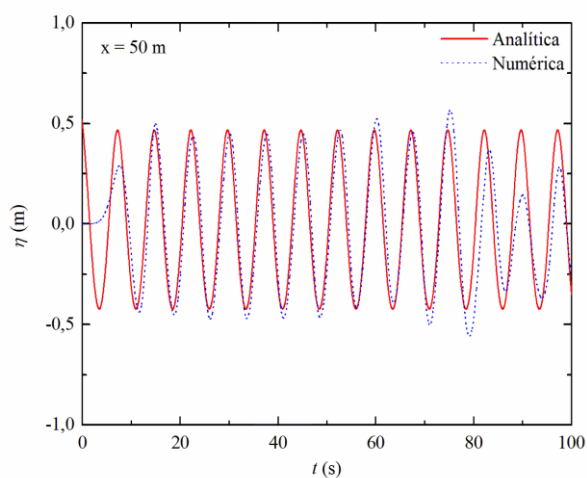
onde x_j representa a variável em consideração instantânea.

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 2^a 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_∞ , 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.

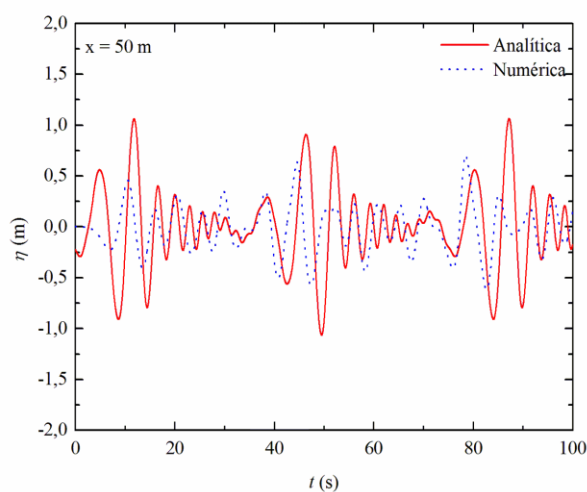
Considerando à densidade espectral, conforme apresentado na Fig. 5c, é evidente o efeito do fundo do tanque de ondas na propagação da onda. Calculando a norma l_∞ , Eq. (18), é encontrado para a densidade espectral obtida analiticamente um valor igual a 0,2237 e para a solução numérica: quando $h = 10$ 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.

A Figura 6 apresenta o comportamento instantâneo da água no dispositivo de galgamento para a razão $H_1/L_1 = 0,33$ 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. Já 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.



a)



b)

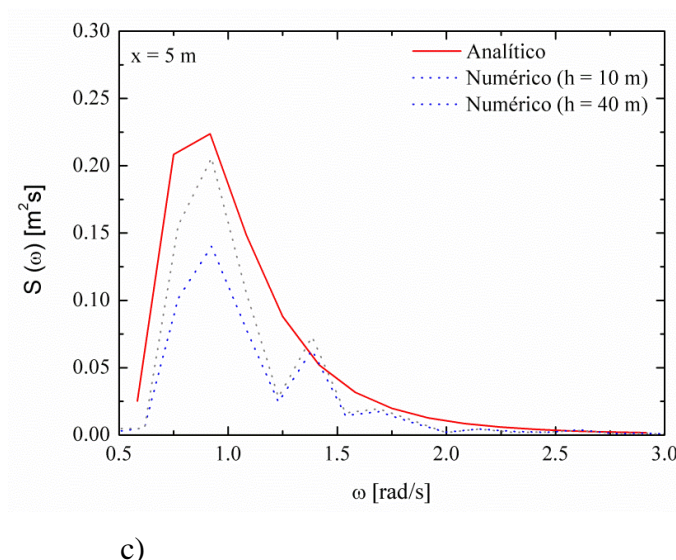


Figura 5. Comparação da solução analítica com a numérica da: (a) elevação da superfície livre em $x = 50$ m para Stokes de 2ª Ordem; (b) elevação da superfície livre em $x = 50$ m para *Pierson-Moskowitz* e (c) da densidade espectral.

Já na Figura 6b se observa a altura da água acumulada no interior do reservatório (h_a), assim, os valores de h_a foram: $h_a = 0,7662$ m para onda regular de Stokes de 2ª ordem e $h_a = 0,2025$ m para o espectro PM, vale destacar que há um amortecimento sensível da quantidade de água acumulada no reservatório quando o espectro de ondas é levado em consideração.

Além disso, pode-se destacar que a potência disponível obtida 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, a qual são mantidos constantes período e altura da onda.

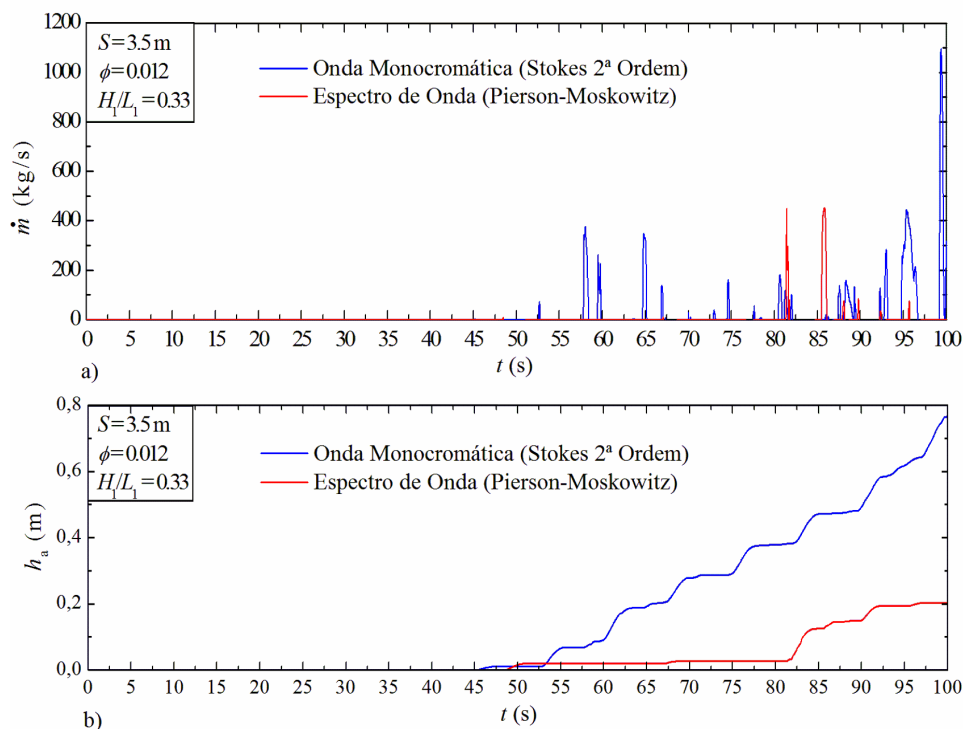


Figura 6. Comportamento instantâneo da água no dispositivo de galgamento: a) Vazão mássica, b) Altura da água acumulada no interior do reservatório.

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 uma geometria ótima obtida em estudo anterior encontrado na literatura para um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo galgamento *onshore*. Foi considerado um espectro de ondas real com altura significativa $H_S = 1,5$ m, período significativo $T_S = 7,5$ s e com 15 componentes de onda. Assim, o principal objetivo foi determinar qual a influência do espectro de ondas sobre a potência disponível obtida a partir do acúmulo de água no reservatório do dispositivo de galgamento.

Os resultados obtidos para razão $H_1/L_1 = 0,33$ foram: a potência disponível máxima obtida com a onda monocromática foi igual a 1149,85 W/m, e $h_a = 0,7662$ m; para o espectro de onda $P_d = 80,33$ W/m e $h_a = 0,2025$ m. A diferença significativa entre os valores da potência disponível eram esperados, visto o espectro de ondas representar condições mais próxima do real, resultando em uma menor energia global da onda quando comparada a onda regular.

Portanto, uma análise utilizando outras razões H_1/L_1 é necessária para determinar se o comportamento da curva será a mesma, tanto para o espectro de ondas de *Pierson-Moskowitz*, como

para a onda monocromática de Stokes de 2ª ordem, com a finalidade de fornecer uma recomendação teórica para a geometria ideal do dispositivo.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

ANSYS. **Theory Guide FLUENT 2016**. 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**, 35: 1644–1661. 2010.

CHAKRABARTI, S. K. **Handbook of offshore engineering**. Vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 2005.

CRUZ, J. M. B. P., SARMENTO, A. J. N. A. **Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais**. Ed. Instituto do Ambiente, Amadora, 61 p. 2004.

DEAN, R.G., DALRYMPLE, R.A. **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists**. vol. 2, World Scientific. 1991.

ELANGOVAN, M. Simulation of irregular waves by CFD. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, 5: 427-431. 2011.

FALCÃO, A. F. DE O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 14: 899-918. 2010.

FLEMING, F. P. **Avaliação Do Potencial De Energias Oceânicas no Brasil**, Dissertação de Mestrado em Ciências em Planejamento Estratégico, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 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**, 10: 120-129. 2015.

HIRT, C. W., NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, 39: 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**, 36: 97–103. 2012.

JOURNEE, J.M.J., MASSIE, W. W. **Offshore Hydrodynamics**. First edition. 2001.

KREYSZIG, E., KREYSZIG, H., NORMINTON, E. J. **Advanced Engineering Mathematics**, 10^a ed., 1283 p. 2011.

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. 2008.

MARGHERITINI, L.; STRATIGAKI, V.; TROCH, P. Geometry Optimization Of An Overtopping Wave Energy Device Implemented Into The New Breakwater Of The Hanstholm Port Expansion. **Twenty-Second International Offshore And Polar Engineering Conference**. 2012.

MARTINS, J. C. 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, 2016.

MCCORMICK, M. E. **Ocean engineering wave mechanics**. John Wiley & Sons, USA, New York. 1976.

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.

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

VERSTEEG, H.K., MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. Pearson. 503 p. 2007.