



VII SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 23 à 25 de Novembro de 2016

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM ESPECTRO DE ONDAS DO TIPO *PIERSON-MOSKOWITZ*

Carlos Augusto de Oliveira Costa¹, Elizaldo Domingues dos Santos², Liércio André Isoldi³, Luiz Alberto Oliveira Rocha⁴, Mateus das Neves Gomes⁵

^{1,5} Instituto Federal do Paraná - IFPR
Campus Paranaguá

Rua Antônio Carlos Rodrigues 453, Porto Seguro, Paranaguá, PR, 83215-750, Brasil.

e-mail: ¹carlosaocosta1994@gmail.com, ⁵mateus.gomes@ifpr.edu.br

^{2,3} Universidade Federal do Rio Grande - FURG

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil

e-mail: ²elizaldosantos@furg.br, ³liercioisoldi@furg.br

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Departamento de Engenharia Mecânica

Rua Sarmiento Leite, 425, Porto Alegre, RS, 90.050-170, Brasil.

e-mail: ⁴luizrocha@mecanica.ufrgs.br

RESUMO

Os modelos computacionais utilizados para a simulação numérica de estruturas oceânicas, como por exemplo, os conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, consideram de uma forma geral ondas regulares. A principal característica das ondas regulares é manter bem definida suas características como período e comprimento, sendo esta uma simplificação do fenômeno real. Este trabalho apresenta uma metodologia, disponível no software ANSYS FLUENT[®] versão 16.0, para a geração numérica de um espectro de ondas do tipo Pierson-Moskowitz. O domínio computacional é bidimensional e representa um tanque de ondas numérico. O espectro de ondas de Pierson-Moskowitz utilizado no presente estudo possui período significativo da onda (T_s) de 7,5 s e altura significativa da onda (H_s) de 1,5 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 apresentados indicam uma adequada reprodução computacional deste espectro de ondas, sendo este um avanço em representar os fenômenos oceânicos de forma mais realística. Esses resultados poderão ser utilizados em trabalhos futuros, principalmente no estudo numérico de dispositivos para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica, como por exemplo, os dispositivos de coluna de água oscilante (OWC) e de galgamento.

1. INTRODUÇÃO

Desde longa data trabalhos experimentais de Engenharia Oceânica e Arquitetura Naval tem usado tanques de ondas. Pode-se citar o Dr. William Froude (1810-1879) que realizou ensaios de resistência ao avanço com modelos de embarcações em escala reduzida em tanques de ondas. Com o aumento da demanda do conhecimento da performance de embarcações sob a ação de ondas, gradualmente os tanques foram equipados com geradores de ondas (Carneiro, 2007). A maioria dos testes em laboratório, de estruturas fixas ou flutuantes, estudo dos perfis das praias e outros fenômenos relacionados tem utilizado um tanque de ondas, que são compartimentos longos e estreitos com um gerador de ondas em uma das extremidades do tanque (Dean e Dalrymple, 1991).

Em engenharia existem, fundamentalmente, três ferramentas para desenvolvimento de projetos e análises de problemas: métodos analíticos; métodos numéricos (experimentação numérica); e experimentação em laboratório (Maliska, 2004). Diversos estudos empregando métodos numéricos têm abordado estruturas oceânicas, como, por exemplo, o princípio de funcionamento de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica. Uma possibilidade de modelagem computacional da propagação de ondas oceânicas é através do método *Volume of Fluid* (VOF), proposto por Hirt e Nichols (1981). Este modelo é indicado para escoamentos multifásicos, ou seja, escoamentos nos quais existe uma interface bem definida entre dois ou mais fluidos imiscíveis, que neste caso são a água e o ar. As equações do modelo matemático são resolvidas através do Método dos Volumes Finitos (MVF) (Versteeg e Malalasekera, 1999).

A tendência é que cada vez mais as pesquisas utilizem a modelagem computacional para analisar os processos oceânicos, uma vez que, atualmente, a simulação numérica é uma ferramenta fundamental na execução de um projeto de engenharia com estas características. Neste contexto, é possível verificar que os pesquisadores têm buscado empregar o modelo VOF nas simulações numéricas de estruturas oceânicas, assim como nos trabalhos de: Horko (2007), Conde e Gato (2008), Marjani et al. (2006), Liu et al. (2008a), Liu et al. (2008b), Gomes et al. (2009), Gomes (2010), Iahnke (2010), Conde et al. (2010), Conde et al. (2011), Liu et al. (2011), Ramalhais (2011), Teixeira et al. (2013) e Gomes (2014). É importante ressaltar que nestes trabalhos o modelo computacional adota ondas com período e altura bem definidos e regulares.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia de simulação numérica de um espectro de ondas de *Pierson-Moskowitz* disponível no software ANSYS FLUENT® (Ansys, 2016). Sendo este aspecto um avanço na representação computacional realística em tanques de ondas de fenômenos ligados ao oceano. No presente estudo são apresentadas verificações de um espectro de onda com: período significativo da onda (T_S) de 7,5 s e altura significativa da onda (H_S) de 1,5 m. Cabe destacar que um estudo semelhante é apresentado em Elangovan (2011), entretanto para um espectro de ondas de *Bretschneider*. 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.

2. TANQUE NUMÉRICO DE ONDAS

Uma possibilidade de representação computacional da interação fluido estrutura, ou seja, da propagação de ondas oceânicas é considerar um tanque de ondas conforme empregado nos trabalhos de (Horko, 2007; Liu et al., 2008a; Gomes, 2009). A técnica consiste em gerar numericamente ondas regulares (com características constantes) e/ou ondas irregulares (através de um espectro de ondas oceânicas).

Para representar o problema numa escala adequada no domínio computacional é necessário o conhecimento de algumas características do espectro de ondas, como: período significativo (T_S), altura significativa (H_S) e profundidade de propagação (h). Com estas características definidas é possível determinar o comprimento (C_T) e a altura do tanque de ondas (H_T). Conforme a representação esquemática apresentada na Fig. 1. É importante destacar que a medida H_S está relacionada ao quanto o dispositivo CAO está submerso em relação à superfície livre. Como neste trabalho é considerada a geração de ondas irregulares para o dimensionamento do domínio computacional são levados em conta o período significativo (T_S) e a altura significativa (H_S) do espectro de ondas. Para o presente estudo, são adotadas as seguintes dimensões: $T_S = 7,5$ s; $H_S = 1,5$ m; $h = 40,0$ m; $C_T = 327,0$ m; $H_T = 45,0$ m. No tanque de ondas, representado na Fig. 1, são dispostas cinco sondas verticais de medição da elevação a superfície livre: S1 ($x = 10$ m), S2 ($x = 40$ m), S3 ($x = 100$ m), S4 ($x = 150$ m) e S5 ($x = 200$ m).

Ainda é possível verificar na Fig. 1 uma região de absorção, que possui o formato de uma rampa e tem a finalidade de reproduzir o efeito de uma praia, e assim diminuir o efeito de reflexão da onda. O comprimento da região de absorção (C_{RA}) tem 100,0 m.

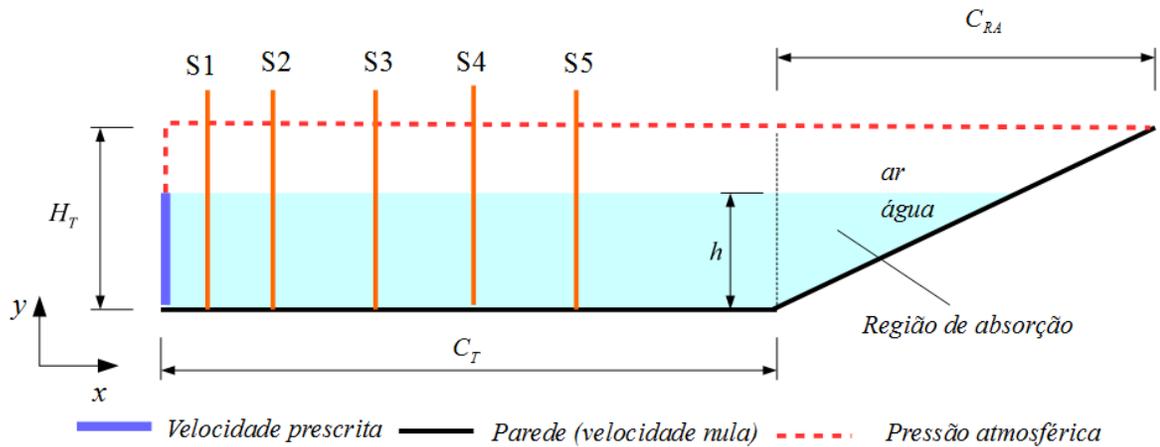


Figura 1. Representação esquemática do domínio computacional.

3. GERAÇÃO DA ONDA – ESPECTRO DE PIERSON-MOSKOWITZ

O aspecto inédito deste trabalho é o fato de considerar a geração de ondas irregulares, assim como em Elangovan (2011). Cabe destacar, que até então, os trabalhos sobre simulação numérica de propagação de ondas em tanques, disponíveis na literatura, levavam em conta a geração de ondas regulares com período, comprimento e altura bem definidos. Um fluxograma do processo de geração e análise de ondas irregulares é apresentado na Fig. 2. No presente estudo foi adotado o espectro de *Pierson-Moskowitz* (PM).

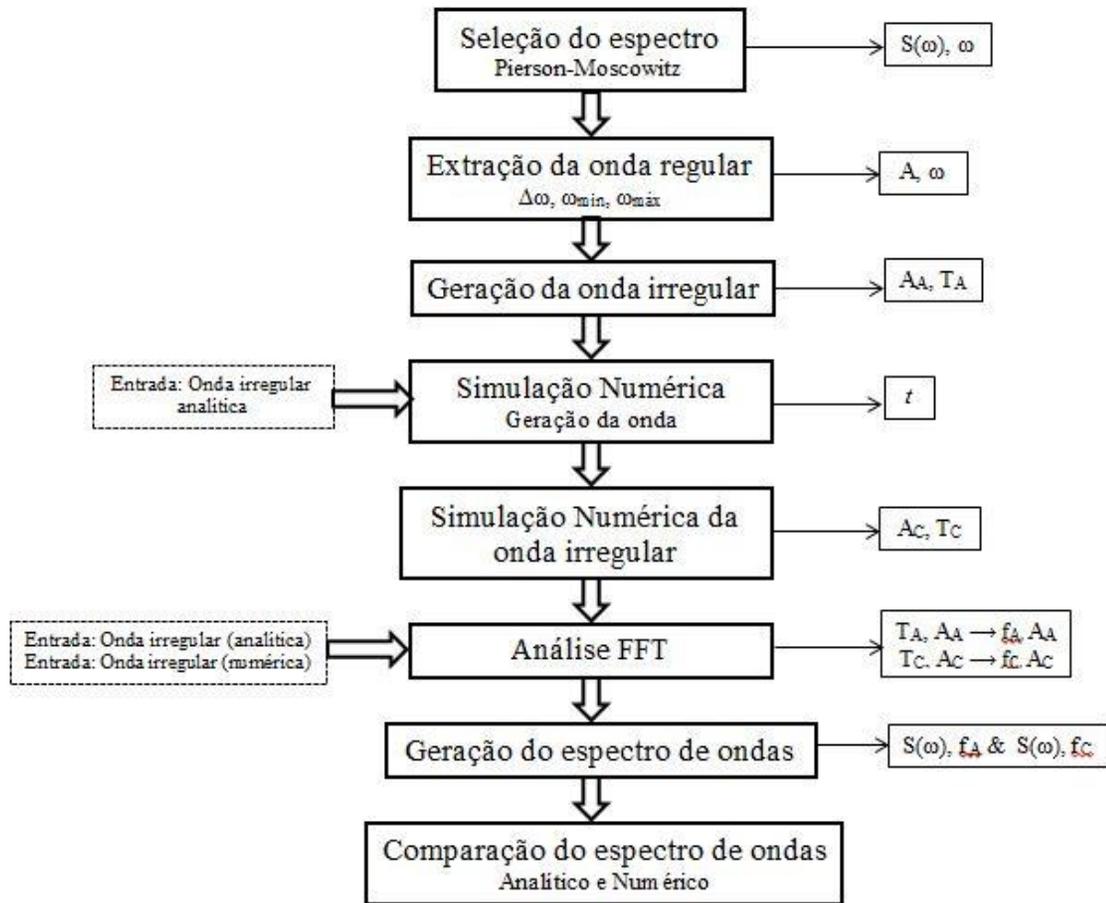


Figura 2. Metodologia de análise da geração de ondas irregulares, adaptado de Elangovan (2011).

O espectro de *Pierson-Moskowitz* é válido para um mar totalmente desenvolvido, ou seja, é o estado do mar em que se desenvolveram as ondas máximas correspondentes à força do vento atuante, e assume que as ondas estão em equilíbrio com o vento (Chakrabarti, 2005). A densidade espectral ($S(\omega)$) é dada por:

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \frac{H_s \omega_p^4}{\omega^5} e^{-\left(\frac{5\omega_p^4}{4\omega^4}\right)} \quad (1)$$

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:

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

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

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:

$$\omega_{\min} = 0,5 \omega_p \quad (3)$$

$$\omega_{\max} = 2,5 \omega_p \quad (4)$$

No presente estudo o espectro é formado por 15 ondas com frequências dentro do intervalo determinado pelas Eqs. (3) e (4). É possível distribuir de forma igual às frequências a serem consideradas através da seguinte relação:

$$d\omega = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{n_o} \quad (5)$$

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 (Elangovan, 2011):

$$S(\omega_n) d\omega = \frac{1}{2} \zeta_{a_n}^2 \quad (6)$$

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 conforme apresentado a seguir (Elangovan, 2011):

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{n_o} \zeta_{a_n} \cos(k_n x - \omega_n t + \varepsilon_n) \quad (7)$$

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):

$$\omega^2 = g k \tanh(kh) \quad (8)$$

Na Fig. 3a é possível observar a decomposição do espectro em ondas regulares. São apresentadas, na Fig. 3a, três ondas com diferentes frequências: Onda 1 com $\omega = 0,58$ rad/s, Onda 5 com $\omega = 1,25$ rad/s e Onda 15 com $\omega = 2,91$ rad/s. A frequência de pico do espectro em consideração é $\omega = 0,83$ rad/s. Ainda considerando a Fig. 3a é possível observar que quanto mais próximo da frequência de pico maior é a predominância da onda no espectro. Na Fig. 3b é apresentado o espectro de ondas formado pelo somatório das quinze ondas, de acordo com a Eq. (7).

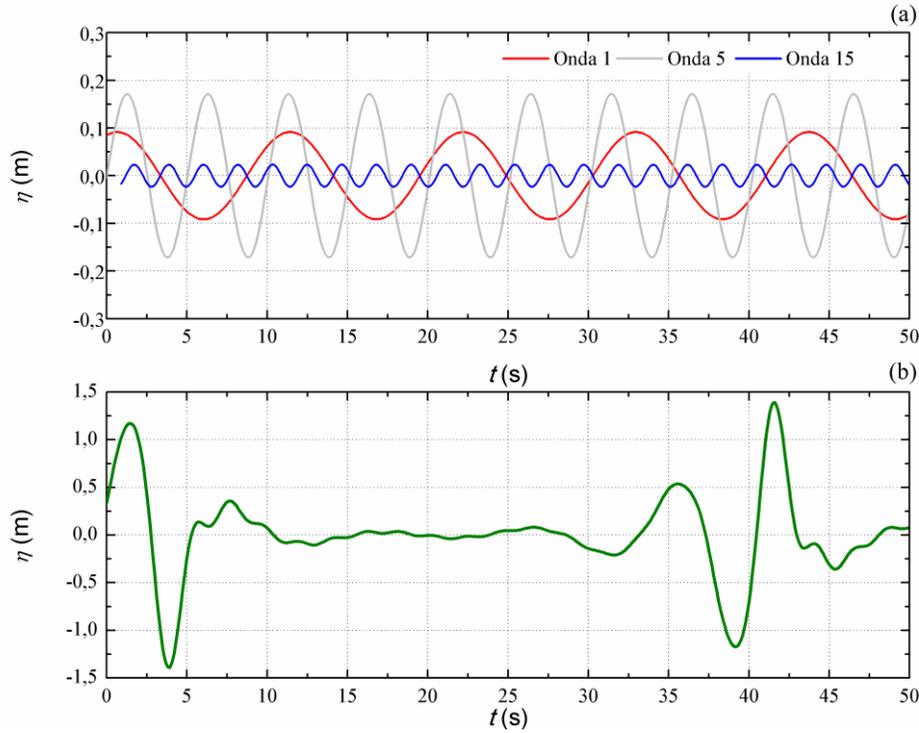


Figura 3. (a) Decomposição do espectro em ondas regulares, (b) espectro de ondas.

A geração numérica da onda irregular levará em conta as componentes do espectro extraídas a partir da Eq. (7). 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 – *Fast Fourier Transform*) será empregada para a comparação da densidade espectral analítica e numérica.

Como é possível observar na Fig. 1, 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. (7) 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 (Dean e Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005):

$$u = \zeta_{a_n} g k_n \frac{\cosh(k_n z + k_n h)}{\omega_n \cosh(k_n h)} \cos(k_n x - \omega_n t) \quad (9)$$

$$w = \zeta_{a_n} g k_n \frac{\sinh(k_n z + k_n h)}{\omega_n \sinh(k_n h)} \sin(k_n x - \omega_n t) \quad (10)$$

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).

Com relação às demais condições de contorno, na parte superior da superfície lateral esquerda, bem como na superfície superior do tanque e da saída da chaminé da CAO é aplicada uma condição de contorno de pressão atmosférica (vide superfície tracejada em vermelho na Fig. 1). Nas demais superfícies do tanque de ondas: superfície inferior e superfície lateral direita é imposta uma condição de não-deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula. Com relação às condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso, com profundidade $h = 40,0$ m. A discretização foi realizada de acordo com as recomendações de Gomes (2014).

4. MODELO COMPUTACIONAL

4.1 Modelo multifásico *Volume of fluid* (VOF)

O método *Volume of Fluid* VOF (Hirt e Nichols, 1981) é utilizado nesse trabalho. O método VOF é um modelo multifásico usado para a solução de escoamentos compostos de dois ou mais fluidos imiscíveis. Nesta formulação

todas as fases são definidas e o volume ocupado por uma fase não pode ser ocupado por outra fase. Assim, para representar as fases contidas em cada volume de controle é necessário o conceito da fração de volume (α). Conseqüentemente, é necessário que a soma de todas as fases em cada célula seja sempre igual a um. No modelo numérico apresentado neste trabalho somente duas fases são consideradas: a água e o ar. Portanto, as células com valores de $\alpha_{água}$ entre 0 e 1 contêm a interface entre água e ar (neste caso $\alpha_{ar} = 1 - \alpha_{água}$). As que possuem $\alpha_{água} = 0$ estão sem água e completas de ar ($\alpha_{ar} = 1$); e, por sua vez, as que apresentam $\alpha_{ar} = 0$ estão cheias de água ($\alpha_{água} = 1$).

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (11)$$

a equação da fração volumétrica:

$$\frac{\partial (\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \quad (12)$$

e as equações de quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\mu \tau}) + \rho \vec{g} \quad (13)$$

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

Uma vez que as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas para a mistura de ar e água, é necessário calcular valores médios para a massa específica e a viscosidade, respectivamente (Srinivasan et al., 2011):

$$\rho = \alpha_{água} \rho_{água} + \alpha_{ar} \rho_{ar} \quad (14)$$

$$\mu = \alpha_{água} \mu_{água} + \alpha_{ar} \mu_{ar} \quad (15)$$

4.2 Modelo numérico

Para a solução das equações de conservação da massa e quantidade de movimento, foi empregado um código comercial baseado no Método de Volumes Finitos - MVF (FLUENT, 2006). Para todas as simulações foi considerado o esquema de advecção *upwind* para tratamento dos termos advectivos, enquanto a discretização espacial para a pressão foi realizada através do método PRESTO e o método GEO-RECONSTRUCTION para a fração volumétrica. Quanto ao acoplamento pressão-velocidade foi empregado o método PISO. Além disso, empregaram-se os fatores de sub-relaxação para as equações da conservação da massa e quantidade de movimento de 0,3 e 0,7, respectivamente. Para a solução do sistema de equações gerado após a discretização é utilizado o método Gauss Seidel com multigrid algébrico. Maiores detalhes sobre a metodologia numérica podem ser obtidos em Patankar (1980) e Versteeg e Malalasekera (1999).

Todas as soluções foram realizadas usando computadores com 4 processadores Intel® Xeon® com 8.0 GB de memória RAM. Para reduzir o tempo de processamento das simulações foi empregada a técnica do processamento paralelo disponibilizada pelo software FLUENT® que emprega biblioteca de passagem de mensagens MPI. O tempo de processamento de cada simulação é de aproximadamente 48 h.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig. 4a é apresentada uma comparação gráfica entre a elevação da superfície livre obtida analiticamente e numericamente, na posição $x = 10$ m ao longo de 100 s. É importante ressaltar que a equação analítica é obtida a partir da Eq. (7) e da soma das amplitudes instantânea para as 15 ondas componentes do espectro em consideração. De uma maneira qualitativa é possível notar uma razoável concordância entre as duas soluções apresentadas na Fig. 4a. Para comparar a elevação das superfícies livre, da solução analítica e numérica, foi utilizada a média do erro absoluto (*MAE - Mean Absolute Error*), dada por:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{num,i} - x_{ana,i}| \quad (16)$$

onde n é o número de amostras analisadas, i é o número da amostra analisada, $x_{num,i}$ representa a elevação da superfície livre instantânea obtida numericamente e $x_{ana,i}$ representa a elevação da superfície livre instantânea obtida analiticamente. Ainda foi utilizada a média RMSE (*Root Mean Square Error*) para analisar o desvio, dada por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{num,i} - X_{ana,i})^2}{n}} \quad (17)$$

Considerando a elevação da superfície livre obtida na sonda S1, foram obtidas as seguintes médias: i) MAE = 0,2488 e ii) RMSE = 0,3157. Os resultados indicam um desvio médio de cerca de 30 %. Na Fig. 4b é apresentada a comparação da densidade de energia analítica, imposta no gerador de ondas, com a obtida numericamente através de uma análise por FFT. Ainda é importante ressaltar que o avanço no tempo utilizado foi de 0,01 s, ou seja, $T_S/750$.

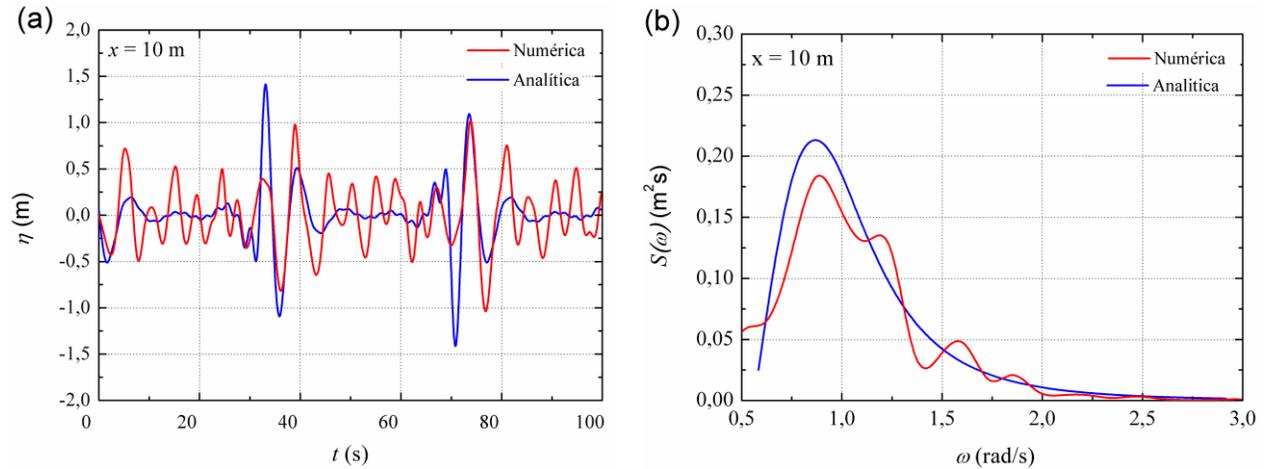


Figura 4. Comparação da solução analítica com a numérica em $x = 10$ m da: (a) elevação da superfície livre e (b) da densidade espectral.

Outro aspecto importante a ressaltar é que para a montagem do espectro de ondas numérico é empregada a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*). No presente estudo é considerado um tempo simulado de 100 s, e na análise numérica da elevação da superfície livre a frequência de salvamento de dados é a cada dez avanços no tempo, ou seja, são gerados 1000 pontos. Para a análise com FFT devem ser considerados um número de pontos múltiplos de potências de 2. Portanto, no presente estudo, é possível realizar uma análise por FFT considerando 512 pontos. No espectro numérico da Fig. 4b são considerados os primeiros 50 s da elevação da superfície livre para a montagem do mesmo.

Na Fig. 5 é apresentada a elevação da superfície livre nas sondas de medição S2, S3, S4 e S5, vide Fig. 1. De uma forma qualitativa é possível observar que o padrão do espectro de ondas imposto na geração da onda é mantido ao longo de todo o tanque de ondas. Isso pode ser corroborado através da Fig. 6, onde é apresentada a comparação da

densidade analítica (imposta na geração da onda) e da densidade numérica (obtida da simulação) para os mesmos casos apresentados na Fig. 5.

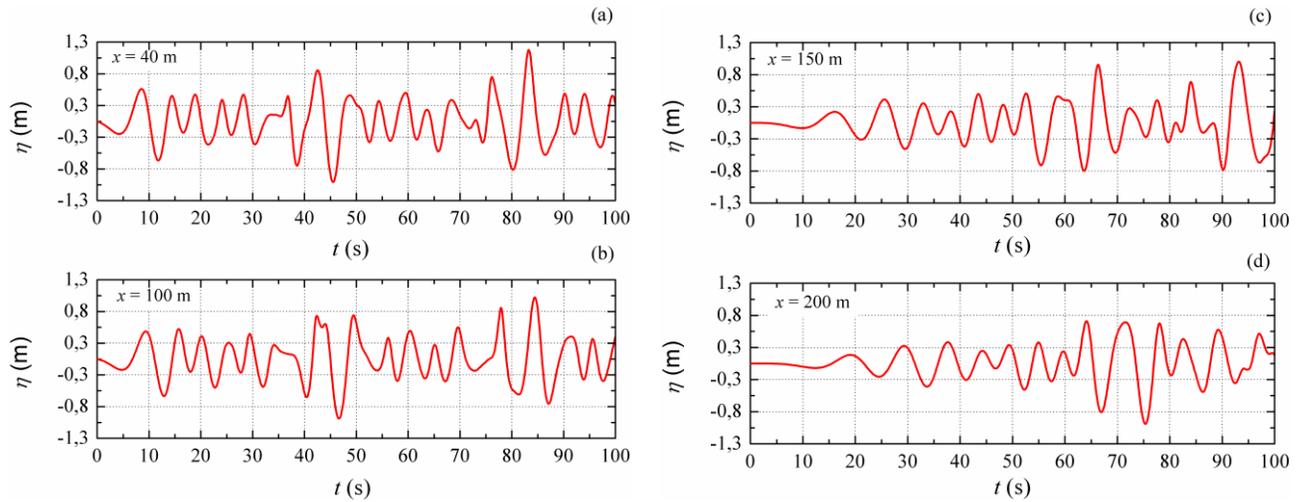


Figura 5. Solução numérica da elevação da superfície livre em: (a) $x = 40$ m, (a) $x = 100$ m, (a) $x = 1500$ m , (a) $x = 200$ m.

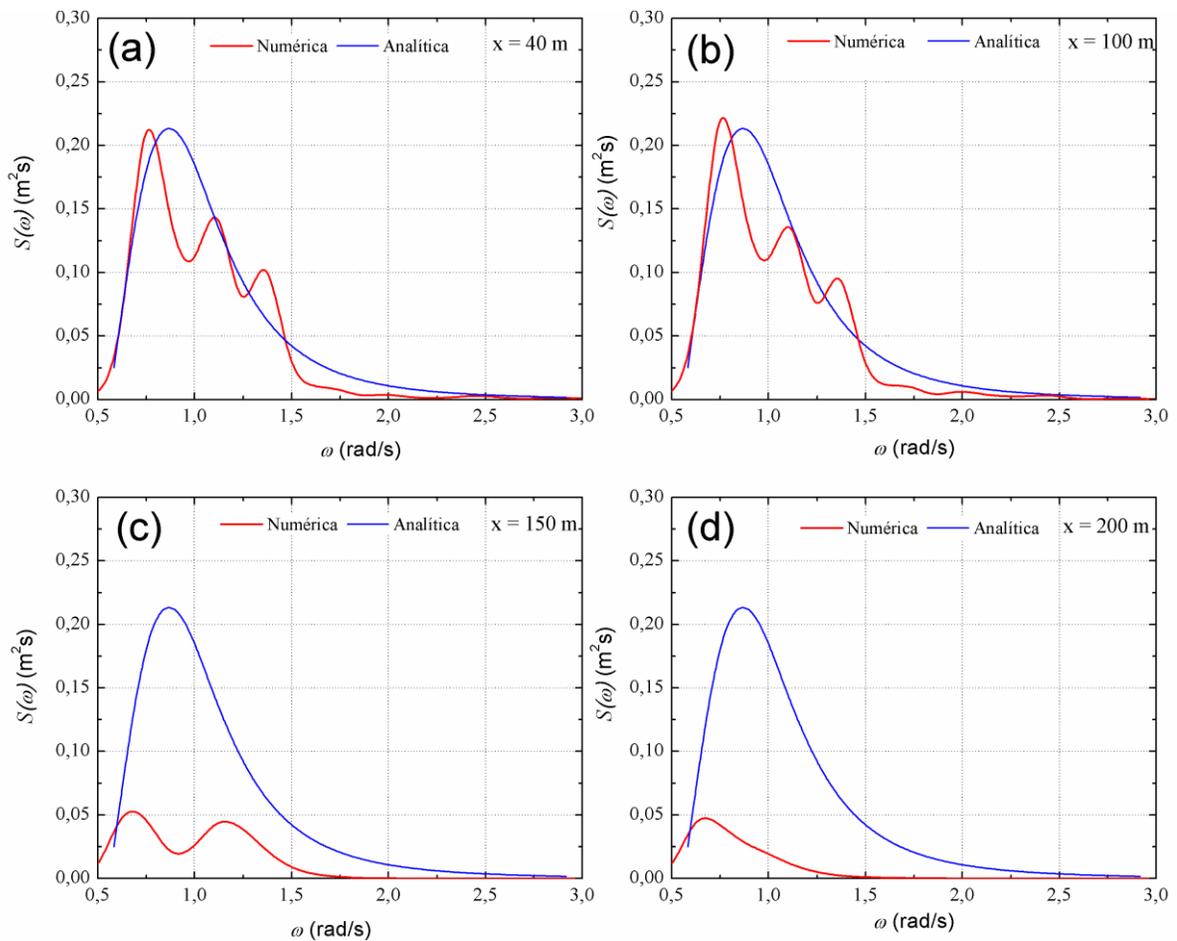


Figura 6. Comparação da solução numérica e analítica da densidade de energia em: (a) $x = 40$ m, (a) $x = 100$ m, (a) $x = 150$ m, (a) $x = 200$ m.

Ainda considerando a Fig. 6, sobretudo a Fig. 6c e Fig. 6d, é notável a grande diferença da densidade na comparação analítica e numérica. Este fato deve-se principalmente pelos pontos escolhidos para análise FFT. Pois

em todos os casos da Fig. 6 foram utilizados os primeiros 50 s de simulação para realizar análise FFT, e quanto mais longe do gerador de ondas estiver a sonda de medição mais tempo levará para estabilizar a geração da onda nesta região, isto pode ser verificado nas Figs. 5c e 5d. É preciso destacar que inicialmente, no instante $t = 0$ s, a superfície livre de água no tanque de ondas está toda na posição $h = 40$ m (profundidade de propagação a onda). Para evidenciar tudo isso é apresentado na Fig. 7 o mesmo resultado da Fig. 6d, entretanto considerando o intervalo de tempo $50 \text{ s} < t < 100 \text{ s}$, ou seja, o intervalo de tempo onde a geração da onda nesta sonda já esta estabilizada, vide Fig. 5d.

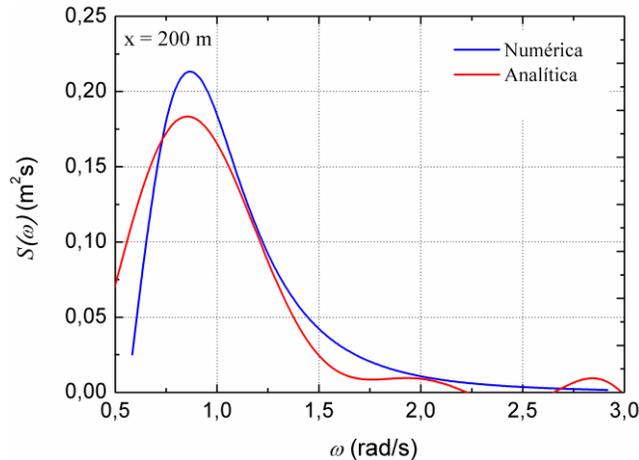


Figura 7. Comparação da densidade espectral em $x = 200$ m considerando diferentes pontos na análise por FFT.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada e discutida uma metodologia, disponível no software ANSYS FLUENT versão 16.0, para a geração numérica de um espectro de ondas do tipo Pierson-Moskowitz. O domínio computacional considerado foi bidimensional e representado um tanque de ondas numérico. O espectro de ondas de Pierson-Moskowitz utilizado no presente estudo com um período significante da onda (T_S) de 7,5 s e altura significante da onda (H_S) de 1,5 m.

Foram apresentados diversos detalhes para a simulação numérica de um espectro de ondas. Ainda foram realizadas comparações entre soluções numéricas e analíticas. Os resultados obtidos indicam que esta técnica pode ser de fato empregada com sucesso, representando assim um avanço na simulação numérica de estruturas oceânicas.

Por tudo que foi analisado entende-se que este trabalho tem uma relevância grande para trabalhos futuros nessa área, principalmente no estudo numérico de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, pois com os resultados obtidos é possível simular computacionalmente em tanques de ondas o fenômeno considerando para isso um modelo muito próximo do fenômeno real.

Ainda, é necessário que o modelo seja aperfeiçoado em questões como: i) considerar o regime turbulento, ii) considerar profundidades maiores, iii) estudo mais apurado de avanço no tempo, iv) estudo mais apurado da discretização espacial, v) influência das escolhas dos pontos para a análise por FFT.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal do Paraná (IFPR), à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), à Universidade Federal de Rio Grande (FURG), e ao CNPq pelo suporte financeiro.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ansys, 2016. "Theory Guide FLUENT 2016".
- Carneiro, M. L., 2007, "Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaio de estruturas oceânicas", Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 116 p.
- Chakrabarti, S. K., 2005. Handbook of offshore engineering. vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 661 p.
- Conde, J. M. P., Gato, L. M. C., 2008. "Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter", Renewable Energy, vol. 33, pp. 2637-2644.

- Conde, J. M. P.; Teixeira, P. R. F.; Didier, E., 2010. "Simulação numérica de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante: comparação de dois códigos numéricos", IV SEMENGO - Seminário e workshop de engenharia oceânica, Rio Grande.
- Conde, J. M. P.; Didier, E.; Teixeira, P. R. F., 2011, "Numerical Simulation of an Oscillating Water Column Wave Energy", The 21st International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference – ISOPE, Maui.
- Dean, R. G., Dalrymple, R.A., 1991, "Water wave mechanics for engineers and scientists", vol. 2, World Scientific, Singapura, 353 p.
- Elangovan, M., 2011. "Simulation of irregular waves by CFD". World Academy of Science, Engineering and Technology, V. 5, pp- 427-431.
- FLUENT (version 6.3.16), ANSYS, Inc., 2006.
- Gomes, M. das N. ; Olinto, C. R. ; Rocha, L. A. O. ; Souza, J. A. ; Isoldi, L. A., 2009. Computational modeling of a regular wave tank. Engenharia Térmica, v. 8, p. 44-50.
- Gomes, M. das N., 2010. Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna d'Água Oscilante de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil.
- Gomes, M. N., 2014. Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil.
- Hirt, C.W. , Nichols, B.D., 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Journal of Computational Physics, vol. 39, n. 1, pp. 201-225.
- Horko, M., 2007. CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy converter. Tese de Mestrado em Engenharia e Ciência, Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Western, Austrália, 145 p.]
- Iahnke, S. L. P.; 2010. Energia das Ondas: Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para um Conversor de Galgamento. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal do Rio Grande.
- Liu, Z.; Hyun B.; Hong, K., 2008a. Application of Numerical Wave Tank to OWC Air Chamber for Wave Energy Conversion. International Offshore and Polar Engineering Conference.
- Liu, Z.; Hyun B.; Jin, J., 2008b . Numerical prediction for overtopping performance of OWEC. Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, v. 11, n.1, p. 35-41.
- Liu, Z.; Hyun B.; Hong, K., 2011. Numerical study of air chamber for oscillating water column wave energy convertor. China Ocean Eng., v.25 ,p.169-178.
- Maliska, C. R., 2004, "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional", Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos.
- Marjani A., E., Castro, F., Bahaji, M., Filali, B., 2006, 3D unsteady flow simulation in an OWC wave converter plant. in: Proceedings International Conference on Renewable Energy and Power Quality, Mallorca, Espanha.
- Patankar, S. V., 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGraw Hill, New York.
- Ramalhão, R. dos S., 2011. Estudo numérico de um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO). Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- 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.
- Teixeira, P. R. F., Davyt, D. P., Didier, E., Ramalhão, R., 2013. Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier-Stokes equations, Energy, v.61, pp. 513-530.
- Versteeg, H. K., Malalasekera, W., 2007, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics", Malaysia : Pearson.

9. AVISO DE RESPONSABILIDADE

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