

Simulação Numérica de um Dispositivo Coluna de Água Oscilante em Grandes Intervalos de Tempo

Numerical Simulation of an Oscillating Water Column Device in Large Time Intervals

Mateus das Neves Gomes¹, Liércio André Isoldi², Elizaldo Domingues dos Santos³, Luiz Alberto Oliveira Rocha⁴

RESUMO

Este trabalho aborda a simulação numérica de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica, que tem como princípio de funcionamento a Coluna de Água Oscilante (CAO). O objetivo é analisar o comportamento do conversor em um grande intervalo de tempo sem interferência do efeito de reflexão das ondas incidentes, em diferentes escalas temporais (segundos, minutos e hora). Para eliminar os efeitos da reflexão sem que ocorra o aumento do domínio computacional é empregada a estratégia da praia numérica que consiste no acréscimo de termos de sorvedouro nas equações de quantidade de movimento em uma determinada região do domínio. 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 indicam a possibilidade de analisar o comportamento fluidodinâmico no interior do dispositivo CAO num grande intervalo de tempo sem que ocorram interferências da reflexão das ondas incidente e com discretizações e tempos de CPU razoáveis.

Palavras-chave: CAO, Simulação Numérica, Praia Numérica, VOF, Energia das Ondas.

ABSTRACT

This paper aims a numerical investigation about the fluid dynamic behavior of an Oscillating Water Column (OWC) Wave Energy Converter (WEC) into electrical energy. The goal is to analyze the behavior of WEC in an large time interval without wave reflection effect, in different time scales (seconds, minutes and hour). For to eliminated the wave reflection effect without increase computational domain is employed the strategy of numerical beach. The numerical beach method consists of adding sink terms in the momentum equations in a given region of the domain. For the numerical solution it is used the Computational Fluid Dynamic (CFD) commercial code FLUENT®, based on the Finite Volume Method (FVM). The multiphasic Volume of Fluid (VOF) model is applied to tackle with the water-air interaction. The results showed the possibility of analysis the fluid dynamics behaviour into OWC device in na large time interval without wave reflection effect and with discretizations and CPU time reasonable.

Keywords: OWC. Numerical Simulation. Numerical Beach. VOF. Wave Energy.

¹ Doutor em Engenharia Mecânica. Professor do programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Sociedade (PPGCTS) do Instituto Federal do Paraná (IFPR) – Paranaguá/PR.

E-mail:

mateus.gomes@ifpr.edu.br

² Doutor em Engenharia Mecânica. Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO da Escola de Engenharia (EE) da FURG - Rio Grande/RS.

³ Doutor em Engenharia Mecânica. Professor do PPGEODa EE da FURG - Rio Grande/RS.

⁴ Doutor em Engenharia Mecânica. Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) - São

1. INTRODUÇÃO

Uma das formas de desenvolver tecnologias e/ou dispositivos capazes de converter a energia das ondas do mar em energia elétrica é através de experimentos numéricos que abordem o princípio de funcionamento de um dispositivo conversor de energia elétrica conhecido como Coluna de Água Oscilante (CAO), onde a modelagem computacional pode ser realizada através do método Volume of Fluid (VOF) proposto por Hirt e Nichols (1981). Esse método é recomendado para escoamentos multifásicos onde há dois ou mais fluidos com uma interface muito bem definida, que no presente estudo são o ar e a água. Versteeg e Malalasekera (2007) propõe a solução das equações deste modelo matemático através do Método dos Volumes Finitos (MVF).

Na literatura, encontram-se trabalhos que utilizam o método VOF nas simulações numéricas de dispositivos conversores de energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante, como: Horko (2007), Gomes (2010), Ramalhais (2011), Liu et al. (2011), Teixeira (2013), Gomes (2014). Em todos estes trabalhos o intervalo de tempo de análise do comportamento fluidodinâmico do dispositivo é limitado para que não ocorram efeitos de reflexão das ondas incidentes bem como não seja inviabilizada a simulação numérica com o aumento do domínio computacional. Em geral as simulações numéricas nestes trabalhos não ultrapassam a escala de tempo dos minutos.

Desta forma o objetivo deste trabalho é analisar o comportamento de um conversor do tipo CAO em um grande intervalo de tempo sem interferência do efeito de reflexão das ondas incidentes, em diferentes escalas temporais (segundos, minutos e hora). Com possibilidades de análise em escalas maiores.

2. REPRESENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Os dispositivos CAO são estruturas como a mostrada na Fig. 1. Observa-se que uma parte é submersa na água, aberta para o mar abaixo da superfície livre, enquanto outra contém apenas ar. A transformação de energia, segundo Cruz e Sarmiento (2004) acontece de duas maneiras: quando uma onda entra na estrutura o ar que se encontrava dentro dela é forçado a passar por uma turbina devido ao aumento de pressão no interior da câmara. Quando a onda regressa ao mar o ar passa novamente na turbina no sentido inverso devido à diminuição de pressão no interior da câmara. Por conta de serem movimentos opostos, é recomendado que a utilização das turbinas seja do tipo Wells, graças a sua propriedade de sempre manter o sentido de rotação independente do sentido do escoamento. Quando a

turbina é ligada num gerador, então ocorre a produção de energia elétrica (Cruz e Sarmiento, 2004; Nielsen et al., 2006; Twidell e Weir, 2006; Gomes, 2010).

Para que seja possível a representação do problema em uma escala adequada no domínio computacional, é necessário conhecer alguns parâmetros da onda, como período (T), altura (H), comprimento de onda (λ) e profundidade de propagação (h). Sabendo essas características, é possível determinar as dimensões do domínio computacional, conforme mostra a Fig. 1.

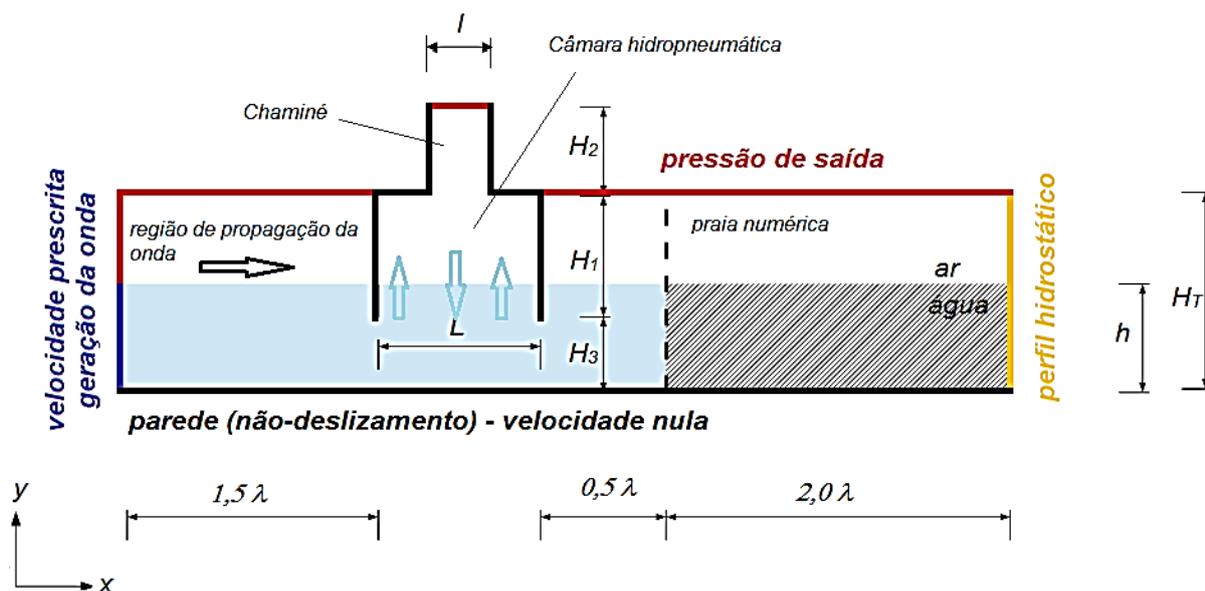


Figura 1. Representação esquemática do domínio computacional

Para este estudo, as seguintes características foram adotadas: $T = 5$ s; $H = 1$ m; $\lambda = 37,5$ m e $h = 10$ m. Dessa forma, é possível determinar as outras características do tanque de ondas como sendo: $H_T = 13$ m e $H_3 = 9,5$ m.

No que diz respeito às condições de contorno, o gerador de ondas numérico foi posicionado na lateral esquerda do tanque (linha azul na Fig. 1), como condição de contorno de velocidade prescrita. Para a geração de ondas regulares, com características constantes, é empregada a Metodologia Função, definida em Gomes et. al (2009). Esta metodologia consiste em aplicar as componentes horizontal (u) e vertical (w) da velocidade da onda como condição de contorno (velocidade de entrada prescrita) no modelo computacional. Essas componentes da velocidade variam em função do espaço e do tempo e são baseadas na Teoria de Stokes de 2ª ordem. Assim, as equações impostas na superfície de entrada são dadas por (Dean e Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005):

$$u = Agk \frac{\cosh(kz+kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx-\omega t) + A^2 \omega k \frac{\cosh 2k(k+z)}{\operatorname{sen}^4(kh)} \cos 2(kx-\omega t) \quad (1)$$

$$w = Agk \frac{\operatorname{senh}(kz+kh)}{\omega \operatorname{senh}(kh)} \operatorname{sen}(kx-\omega t) + A^2 \omega k \frac{\operatorname{senh} 2k(k+z)}{\cos^4(kh)} \operatorname{sen} 2(kx-\omega t) \quad (2)$$

onde: H é a altura da onda (m); g a aceleração da gravidade (m/s^2); λ é o comprimento da onda (m), k é o número de onda dado por $k = 2\pi/\lambda$ (m^{-1}); h é a profundidade (m); T é o período da onda (s); ω é a frequência dada por $\omega = 2\pi/T$ (Hz); x é a posição espacial (m); t é o tempo (s) e z é a variação da posição entre a superfície livre da água e o fundo do mar (m).

Para a elevação da superfície livre é considerada a seguinte equação (Dean e Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005):

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

Com relação às partes superior esquerda, superior do tanque e da chaminé (linhas em vermelho na Fig. 1), foi aplicada uma condição de contorno de pressão atmosférica. Nas demais regiões destacadas na cor preta (paredes) 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 $h = 10,0$ m. Na região da extremidade direita do tanque, após o dispositivo CAO, vide Fig. 1, é considerada uma praia numérica bem como um perfil hidrostático na extremidade direita do tanque de ondas (linha laranja na Fig. 1). Dessa forma os efeitos de reflexão da onda são eliminados. A técnica da praia numérica é uma abordagem totalmente numérica. O método de praia numérica consiste no acréscimo de termos de sorvedouro nas equações de quantidade de movimento em uma determinada região do domínio. A equação relacionada a essa grandeza é dada por (Lisboa et al., 2016; ANSYS, 2016):

$$S = - \left[C_1 \rho V + \frac{1}{2} C_2 \rho |V| V \right] \left(1 - \frac{z - z_{fs}}{z_b - z_{fs}} \right) \left(\frac{x - x_s}{x_e - x_s} \right)^2 \quad (4)$$

onde: C_1 é o coeficiente de resistência linear, C_2 é o de resistência quadrática, V é o módulo da velocidade do fluido no ponto (x, z) , onde x é uma coordenada horizontal e z vertical, ρ é a massa específica, z_{fs} e z_e são os valores de coordenadas da média da superfície livre e do fundo, x_s e x_e são as posições de início e de fim da praia numérica e S é um termo de sorvedouro de quantidade de movimento.

Para a geração da malha, uma metodologia baseada na técnica de malhas *stretched* (Mavripilis, 1997) foi adotada. Isso significa dizer que em certas regiões de interesse do domínio computacional a malha é mais refinada, como é o caso da região da superfície livre, de acordo com as recomendações de Gomes (2014). Na região onde está localizado o dispositivo CAO, é considerada uma malha regular com quadriláteros de 0,2 m.

3. MODELO MATEMÁTICO E NUMÉRICO

O método *Volume of Fluid* (VOF), desenvolvido por 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 $\alpha_{\text{água}}$ entre 0 e 1 contém a interface entre água e ar (neste caso $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$). As que possuem $\alpha_{\text{água}} = 0$ estão sem água e completas de ar ($\alpha_{\text{ar}} = 1$); e, por sua vez, as que apresentam $\alpha_{\text{ar}} = 0$ estão cheias de água ($\alpha_{\text{água}} = 1$).

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:

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

a equação da fração volumétrica:

$$\frac{\partial(\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \quad (6)$$

E as equações de quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (7)$$

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 (N/m^2), μ é a viscosidade (kg/(ms)), $\bar{\tau}$ é o tensor de tensões (N/m^2) e \vec{g} é a aceleração da gravidade (m/s^2).

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

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (8)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (9)$$

Para solucionar as equações da conservação da massa e da quantidade de movimento foi empregado um código baseado no Método de Volumes Finitos – MVF (ANSYS, 2016). Para todas as simulações, o método PRESTO foi utilizado para a discretização espacial da pressão, enquanto que o método GEO-RECONSTRUCTION foi utilizado para a fração volumétrica. O método PISO foi utilizado para o acoplamento pressão-velocidade. Para solucionar o sistema de equações gerado após a discretização foi utilizado o método Gauss Seidel com *multigrid* algébrico.

4. ESTUDO DE CASO

Para as análises foi considerado um tempo de simulação de 1 h (o equivalente a 3600 s). Cabe destacar que nos estudos apresentados na literatura este tempo em geral não ultrapassava 100 s de análise.

Inicialmente foi realizada uma verificação da solução numérica para a elevação da superfície livre através de uma comparação entre a solução obtida na posição $x = 37,5$ m e a solução analítica calculada com a Eq. (3). Na Tab. 1 são apresentados, para diferentes intervalos, a média do erro absoluto (MAE), o desvio do erro (RMSE), a norma l_{∞} e a diferença de fase entre as soluções numérica e analítica.

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:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{num,i} - x_{ana,i}| \quad (10)$$

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:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{num,i} - X_{ana,i})^2}{n}} \quad (11)$$

Para comparar as alturas significativas, da solução analítica e numérica, pode-se utilizar a norma l_{∞} , dada por:

$$\|x\|_{\infty} = \max_j |x_j| \quad (12)$$

onde x_j representa a variável em consideração instantânea.

Como pode ser observado na Tab. 1 e na Fig. 2 é possível verificar a geração da onda com um erro médio não superior a 4% e com desvios inferiores a 6%, além disso as diferenças entre os picos é inferior a 0,03 m. Cabe destacar, conforme pode ser observado na Fig. 2a, que existe uma diferença de fase entre a solução numérica e a analítica e que conforme é apresentado na Tab. 1 esta diferença é variável. Portanto a análise do erro se deu em diferentes intervalos de tempo, de modo a ajustar a fase das soluções. Na Fig. 2b é apresentado um intervalo em que as duas soluções estão em fase e assim corroborando esta estratégia de verificação.

Tabela 1. Análise do erro em diferentes intervalos na posição $x = 37,5$ m.

t/T	MAE	RMSE	I_{∞} (Num)	I_{∞} (An)	Dif. de Fase
5 ao 6	0,0387	0,0455	10,5302	10,4996	-0,0105
5 ao 10	0,0489	0,0600	10,5316	10,4996	-0,0161
10 ao 15	0,0453	0,0594	10,5020	10,4996	-0,0248
350 ao 351	0,0335	0,0434	10,5192	10,4997	-0,0270
600 ao 605	0,0476	0,0591	10,5300	10,4994	0,0055
695 ao 700	0,0490	0,0592	10,5199	10,4996	-0,0467
715 ao 720	0,0482	0,0572	10,5343	10,4996	-0,0694
719 ao 720	0,0284	0,0334	10,5320	10,4996	-0,0709
3 ao 720	0,4025	0,4941	10,5950	10,5000	-

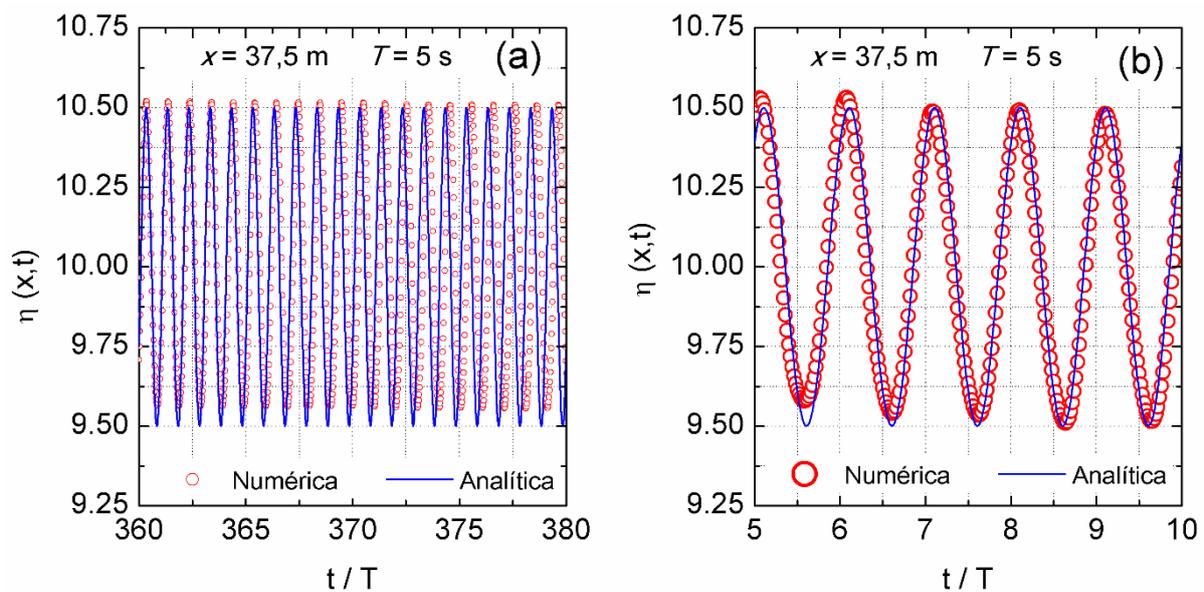


Figura 2. Elevação da superfície livre na posição $x = 37,5$ m para os intervalos:

(a) $360 < t/T < 380$ e (b) $5 < t/T < 10$.

Outro aspecto a destacar é a eficácia da praia numérica. Conforme mostrado na Fig. 3 a elevação da superfície livre é praticamente inexistente na região de amortecimento, eliminando assim os efeitos da reflexão da onda incidente, e possibilitando desta forma a simulação numérica num intervalo de tempo qualquer sem aumentar o domínio computacional.

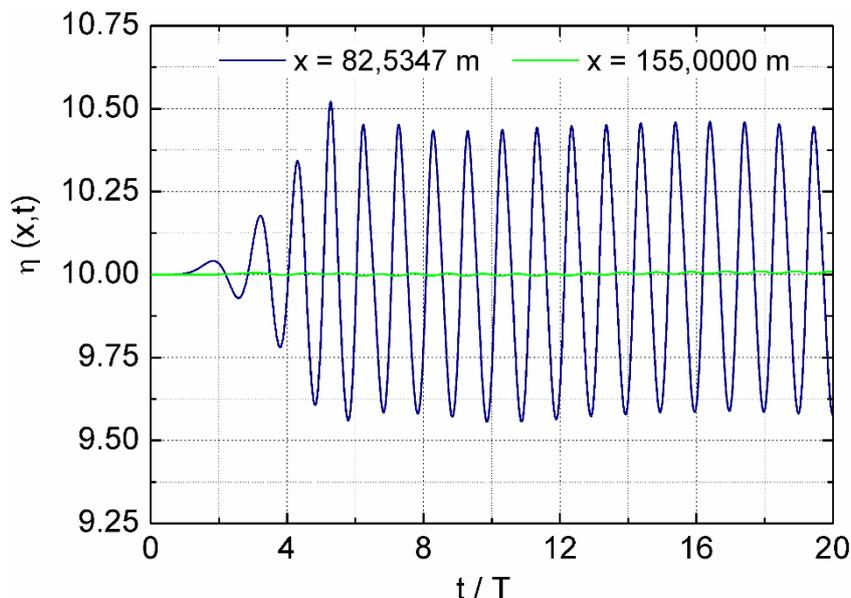


Figura 3. Elevação da superfície livre medida antes e na região da praia numérica.

Na Tab. 2 são apresentadas as médias (RMS – *Root Mean Square*) para a vazão mássica, pressão e potência, bem como o fator de amplificação e o *sloshing*, conforme Gomes (2014). Uma constatação importante é, apesar de ser um problema não-linear, que as médias em intervalos de tempo pequeno ou grande se mantêm. Além disso, o fator de amplificação também é mantido em diferentes escalas de análise temporal.

Tabela 2. Resultados médios (RMS) em diferentes intervalos de tempo.

t/T	\dot{m} (Kg/s)	p (Pa)	P_{hid} (W)	Fator de amplificação	Sloshing
5 ao 6	18,5815	36,2244	148,4201	0,4783	0,1104
350 ao 351	18,4566	35,3620	152,4078	0,4861	0,1149
719 ao 720	18,4588	41,8621	158,2268	0,4846	0,1123
20 ao 120	18,2982	37,8510	148,6301	0,4796	0,1118
120 ao 220	18,3326	37,7386	148,7724	0,4807	0,1116
220 ao 320	18,3364	38,2798	149,9415	0,4810	0,1129
320 ao 420	18,3690	38,3303	149,8690	0,4811	0,1132
420 ao 520	18,5072	38,6205	153,0261	0,4842	0,1122
520 ao 620	18,2730	37,7179	147,8957	0,4796	0,1123
620 ao 720	18,3268	38,2290	149,4046	0,4810	0,1118
3 ao 720	18,3446	38,0945	149,6333	0,4801	0,1127

Os resultados apresentados na Figs. 4, 5 e 6, respectivamente para a variação ao longo do tempo, na chaminé do CAO, da vazão mássica, pressão e potência hidropneumática, indicam claramente que a magnitude destas variáveis se mantém similares do início ($0 < t/T < 40$) ao fim ($715 < t/T < 720$) da simulação numérica, comprovando que a metodologia apresentada permite que as ondas sejam amortecidas na região final do tanque de ondas, impedindo assim que as mesmas sejam refletidas e influenciem na avaliação do comportamento fluidodinâmico do dispositivo.

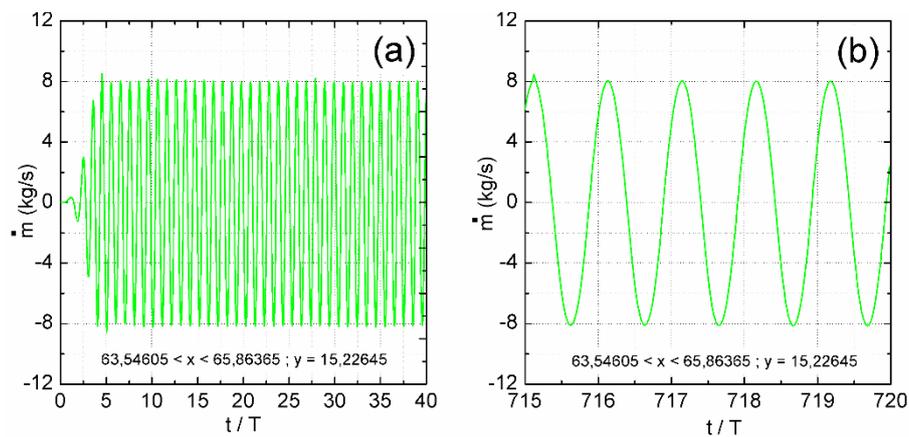


Figura 4. Comportamento transiente da vazão mássica na chaminé para os intervalos: (a) $0 < t/T < 40$ e (b) $715 < t/T < 720$.

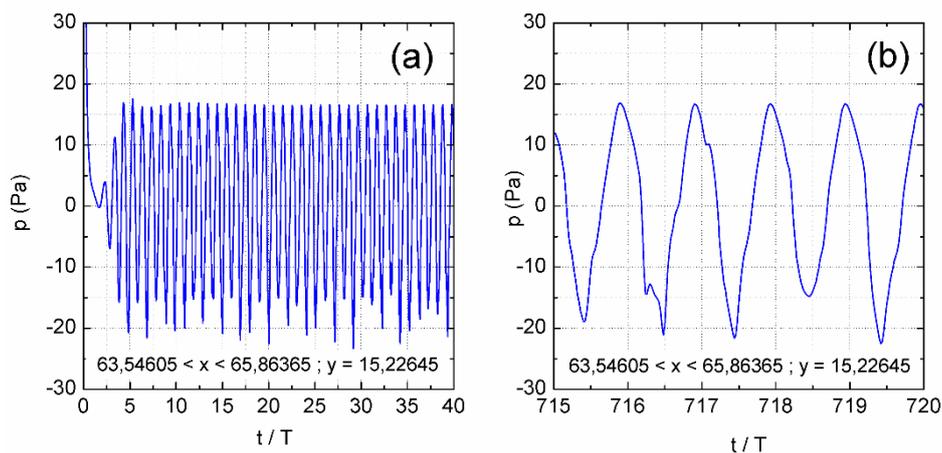


Figura 5. Comportamento transiente da pressão na chaminé para os intervalos: (a) $0 < t/T < 40$ e (b) $715 < t/T < 720$.

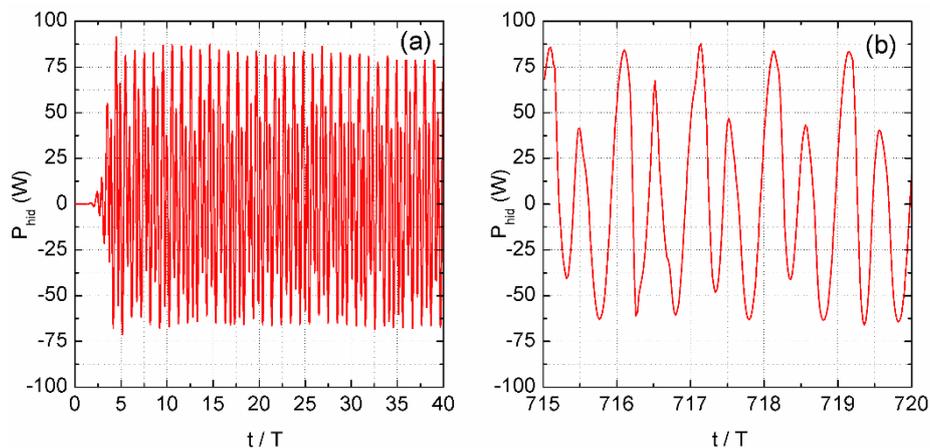


Figura 6. Comportamento transiente da potência hidropneumática para os intervalos: (a) $0 < t/T < 40$ e (b) $715 < t/T < 720$.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico com o objetivo de analisar o comportamento de um dispositivo CAO em um grande intervalo de tempo sem interferência do efeito de reflexão das ondas incidentes, em diferentes escalas temporais (segundos, minutos e hora).

Para eliminar os efeitos da reflexão foi empregada a estratégia da praia numérica que consiste no acréscimo de termos de sorvedouro nas equações de quantidade de movimento em uma determinada região do domínio.

Os resultados indicam a possibilidade de analisar o comportamento fluidodinâmico no interior do dispositivo CAO num grande intervalo de tempo sem que ocorram interferências da reflexão das ondas incidentes e com discretizações e tempos de CPU razoáveis.

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 Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

Ansys, **Theory Guide FLUENT 2016**, 2016.

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, 2004.

DEAN, R. G., DALRYMPLE, R.A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**, vol. 2, World Scientific, Singapura, 1991.

GOMES, M. DAS N.; OLINTO, C. R.; ROCHA, L. A. O.; SOUZA, J. A.; ISOLDI, L. A. Computational modeling of a regular wave tank. **Engenharia Térmica**, v. 8, 2009, p. 44-50.

GOMES, M. DAS N. **Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna da 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, 2010).

Gomes, M. N. **Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil, 2014.

HIRT, C.W., NICHOLS, B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, vol. 39, n. 1, 1981, pp. 201-225.

HORKO, M. **CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy converter**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência) - Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Western, Austrália, 2007.

LISBOA, R.C., TEIXEIRA, P.R.F., DIDIER, E. **Simulação de propagação de ondas regulares e irregulares em um canal bidimensional com praia numérica**. Anais do VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. Rio Grande do Sul: FURG, 2016.

LIU, Z.; HYUN B.; HONG, K. Numerical study of air chamber for oscillating water column wave energy convertor. **China Ocean Eng.**, v.25, 2011, p.169-178.

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

NIELSEN, F. G., ANDERSEN, M., ARGYRIADIS, K., BUTTERFIELD, S., FONSECA, N., KUROIWA, T., BOULLUEC, M. L. E., LIAO, S. J., TURNOCK, S. R, WAEGTER, J. **Ocean wind and wave energy utilization**, ISSC, Southampton, 2006.

RAMALHAIS, R. DOS S. **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, 2011.

TEIXEIRA, P. R. F., DAVYT, D. P., DIDIER, E., RAMALHAIS, R. Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier-Stokes equations. **Energy**, v.61, 2013, p. 513-530.

TWIDELL, J., and WEIR, T. **Renewable Energy Resources** Taylor & Francis, London. Wavegen, in: http://www.wavegen.co.uk/what_we_offer_limpet_islay.htm, 2006.

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