

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA POTÊNCIA HIDROPNEUMÁTICA DE UM DISPOSITIVO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE SUBMETIDO A ONDAS REGULARES E IRREGULARES GERADAS A PARTIR DE DADOS REALÍSTICOS DE ESTADO DE MAR

Augusto Hack da Silva Koch, augusto.koch@ufrgs.br¹

Maycon da Silveira Paiva, mayconpaiva@furg.br²

Caroline Barbosa Monteiro, cbmonteiro@furg.br²

Phelype Haron Oleinik, pholeinik@furg.br²

Liércio André Isoldi, liercioisoldi@furg.br²

Bianca Neves Machado, bianca.machado@ufrgs.br¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS-030, km 92, 95590-000, Cx.P. 15051, Tramandaí, RS, Brasil.

²Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, km 8, 96201-900, Cx.P. 474, Rio Grande, RS, Brasil.

Resumo. O propósito deste estudo é analisar computacionalmente a potência hidropneumática disponível no duto da turbina de um dispositivo conversor de energia das ondas do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), quando submetido a dados realísticos de estado de mar e à ondas regulares representativas deste estado de mar. O dispositivo CAO é composto, fundamentalmente, por uma câmara hidropneumática e um duto onde a turbina e o gerador são acoplados. A câmara é aberta abaixo da superfície livre do mar, enquanto o duto é aberto para a atmosfera. O movimento oscilante da superfície livre dentro da câmara faz com que o ar escoe, movendo a turbina e gerando eletricidade. Neste estudo, foram realizadas simulações numéricas de geração de ondas numéricas através do ANSYS Fluent, que é um software de Dinâmica dos Fluidos Computacional baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF). O modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) foi empregado para o tratamento da interação ar-água. Visando calcular a potência hidropneumática média disponível no duto do dispositivo, a pressão estática e a vazão mássica foram monitoradas. Os resultados foram analisados, mostrando que a potência disponível é 250% maior quando o dispositivo é submetido às ondas irregulares geradas a partir dos dados realísticos de estado de mar.

Palavras chave: Modelagem Computacional; Onda Realística; Onda Irregular; Coluna de Água Oscilante.

Abstract. The purpose of this study is to computationally analyze the hydropneumatic power available in the air duct of an Oscillating Water Column (OWC) wave energy converter device when subject to realistic sea state data and when submitted to the regular wave representative of this sea state. The OWC device is mainly composed of a hydropneumatic chamber and an air duct where a turbine and generator are coupled. The chamber is open below the free surface while the duct is open to the atmosphere. The oscillating movement of the free surface inside the chamber causes the air to flow, moving the turbine and generating electricity. To execute this study, numerical simulations of wave generation were carried out using ANSYS Fluent, which is a Computational Dynamic Fluids software based on the Finite Volume Method (FVM). The Volume of Fluid (VOF) multiphase model was applied in the treatment of the water-air interaction. In order to evaluate the average hydropneumatic power available in the duct, the static pressure, velocity and air mass flow rate were monitored. The results were analyzed, showing that the available power is 250% greater when the device is subject to realistic sea state data.

Keywords: Computational Modeling; Oscillating Water Column; Realistic Sea State; Regular Wave.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), a busca pelo aproveitamento da energia das ondas começou no Japão, em 1960, com o desenvolvimento de boias de sinalização marítima alimentadas por energia das ondas, desde então, procura-se aproveitar o potencial energético das ondas. Um dos meios de realizar esse aproveitamento dá-se através do dispositivo de conversão de energia das ondas do mar do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO).

Segundo Falcão e Henriques (2015), o dispositivo CAO é essencialmente composto por uma câmara hidropneumática e um duto, onde a turbina e o gerador elétrico são acoplados. O dispositivo possui a câmara aberta para abaixo da superfície livre da água do mar e o duto aberto para a atmosfera. Assim, a oscilação de água no interior da

câmara, causada pelo movimento da onda, faz com que exista uma pressão no local, expulsando ou succionando o ar no interior do duto, conseqüentemente, o escoamento de ar incide na turbina acionando o gerador elétrico.

Parte das pesquisas numéricas realizadas nesta área abordam a propagação de ondas regulares em canais de ondas e a incidência de ondas regulares em dispositivos conversores, o que não descreve adequadamente o estado real do mar. Visando obter uma melhor representação do que ocorre na natureza, o presente estudo aborda ondas irregulares geradas a partir de dados realísticos de estado de mar. Além disso, se estudou a onda regular representativa deste estado de mar, a fim de comparar a potência hidropneumática disponível no duto do dispositivo CAO quando submetido às ondas regulares representativas e às ondas irregulares realísticas.

Destaca-se, que os dados realísticos considerados neste estudo são provenientes do software Spec2Wave (Oleinik, 2019) e referentes ao dia 03 de março de 2018 às 6 h e 45 min em um ponto distante 171,06 m dos Molhes da Barra, localizado no município de Rio Grande, sul do estado do Rio Grande do Sul. Essa região foi escolhida pois a cidade de Rio Grande possui a 4ª maior população fora da região metropolitana de Porto Alegre, o que amplia proporcionalmente a demanda energética no município, junto ao fato de se tratar de um município litorâneo.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

Para a execução do presente estudo, foram realizadas simulações numéricas de geração de ondas através do software ANSYS Fluent, que é um software de Fluidodinâmica Computacional baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF). O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), proposto por Hirt e Nichols (1981) e indicado para escoamentos multifásicos, foi utilizado para tratamento da interface das fases ar-água, assim como em Machado *et al.* (2017), Gomes *et al.* (2018) e Lima *et al.* (2019).

Para a representação das fases, se faz necessário o conceito de fração volumétrica (α), cuja soma das fases em cada volume deve ser sempre igual a 1. As fases consideradas neste estudo são água e ar, assim, os volumes que apresentam valores de $\alpha_{\text{água}}$ entre 0 e 1 contém a interface entre água e ar, neste caso $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$.

No modelo VOF, um único conjunto de equações é resolvido. Assim, a fração volumétrica é considerada ao longo do domínio computacional através da equação de transporte. Logo, de acordo com Versteeg e Malalasekera (1995), o modelo é composto pela equação da continuidade,

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

equação de transporte da fração volumétrica,

$$\frac{\partial(\rho\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\alpha\vec{v}) = 0 \quad (2)$$

e equação da quantidade de movimento,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (3)$$

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

2.1. Geração de ondas

As ondas regulares representativas, assim como as ondas irregulares realísticas adotadas neste estudo, foram geradas a partir de dados realísticos de estado de mar no ponto próximo aos Molhes da Barra de Rio Grande. A Fig. 1 representa o domínio computacional utilizado para a simulação do estado de mar nesse ponto.

Os dados de estado de mar abordados nesse estudo são oriundos do modelo espectral TOMAWAC a partir da solução da Eq. (4), utilizado para conservação da densidade de ação da onda. A qual, segundo Tavares (2019), representa a situação geral de propagação de ondas em um meio instável e não homogêneo, onde a densidade de ação de onda (N) se conserva dentro do termo fonte (Q).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{x}N)}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{y}N)}{\partial y} + \frac{\partial(k_x N)}{\partial k_x} + \frac{\partial(k_y N)}{\partial k_y} = Q(k_x, k_y, x, y, t) \quad (4)$$

onde, N representa o espectro direcional de densidade de ação das ondas ($m^2/Hz/rad$), x e y representam o sistema de coordenadas (m), k_x a componente em x do vetor número de onda e k_y a componente y do vetor número de onda ($1/m$), Q é o termo fonte (m^2/rad) e t é o tempo (s).

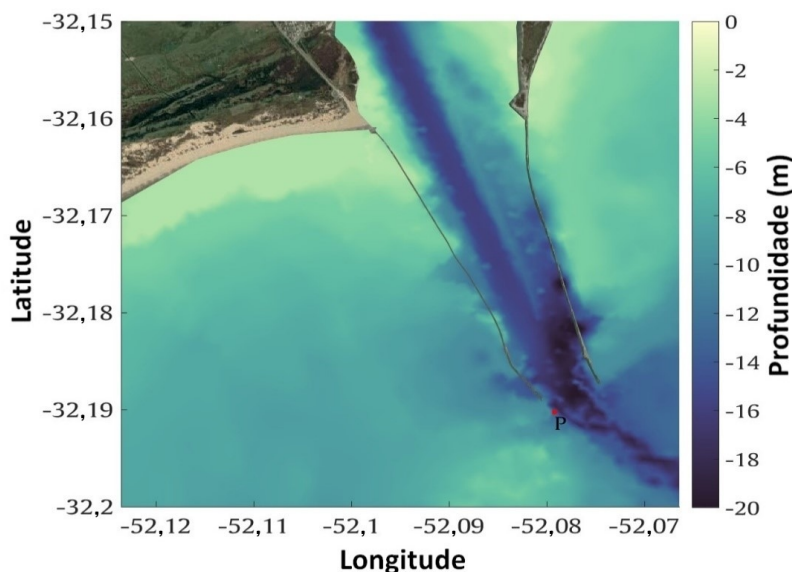


Figura 1 - Domínio computacional utilizado no TOMAWAC para a simulação do estado de mar.

Após os dados de estado de mar da região serem obtidos, os mesmos foram tratados pelo software *Spec2Wave*, que transforma os dados espectrais gerados pelo TOMAWAC em séries temporais de elevação da superfície livre e perfis de velocidade orbital vertical (u) e horizontal (w) de propagação das ondas – maiores detalhes podem ser encontrados em Oleinik (2019). A partir dos dados espectrais, realizou-se uma análise estatística para estimar o estado de mar mais frequente na região analisada. Para isso elaborou-se um histograma bivariado a fim de determinar a combinação mais frequente de altura significativa (H_s) e de período médio (T_m) das ondas. O histograma pode ser observado na Fig. 2:

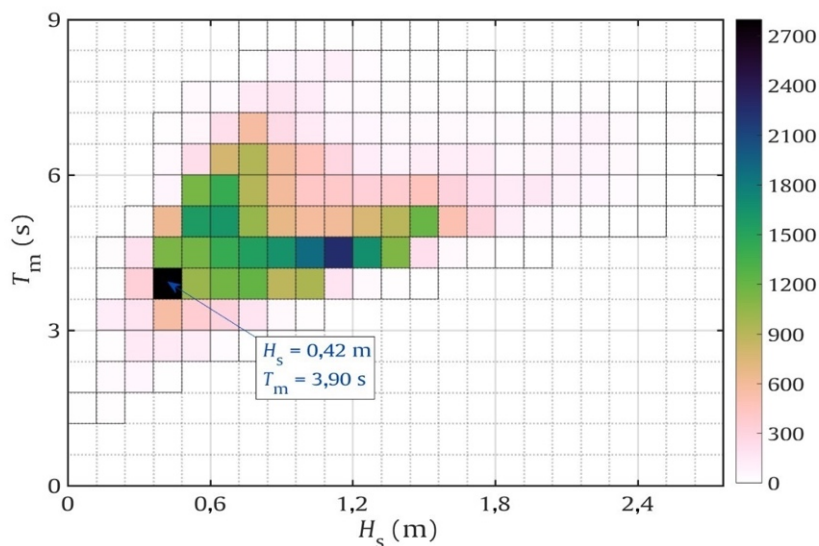


Figura 2. Histograma de recorrência de ondas relacionando T_m e H_s .

Observando a Fig. 2, conclui-se que o estado de mar mais frequente da região no período avaliado é representado pela combinação de $H_s = 0,42$ m e $T_m = 3,9$ s. Assim, esses dados foram adotados como características para as ondas regulares representativas, sendo o comprimento da onda (λ) calculado utilizando a relação de dispersão (Dean & Dalrymple, 1991):

$$\omega^2 = g k \tanh(kh) \quad (5)$$

onde, k é o número de onda, dado por $k = 2\pi/\lambda$ (m^{-1}) e h a profundidade (m). As características da onda regular representativa utilizada no estudo podem ser observadas na Tab. 1:

Tabela 1. Características das ondas regulares representativas do estado de mar.

Característica	Nomenclatura	Medida
Período da onda	T (s)	3,90
Altura da onda	H (m)	0,42
Comprimento da onda	λ (m)	23,69
Profundidade	h (m)	13,293

Para a geração das ondas regulares representativas, as condições de contorno de velocidade prescrita horizontal (u) e vertical (w) são impostas, como condição de contorno de entrada, na lateral de entrada (esquerda) do canal de ondas e, de acordo com McCormick (1976) e Dean & Dalrymple (1991), as velocidades são descritas, respectivamente, por:

$$u = \frac{H}{2} gk \frac{\cosh(kz+kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (6)$$

$$w = \frac{H}{2} gk \frac{\sinh(kz+kh)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (7)$$

sendo $H/2$ a amplitude da onda (m); ω a frequência angular, dada por $\omega = 2\pi/T$ (Hz); T o período da onda (s); x a posição horizontal (m) e z a posição vertical (m).

Além disso, a elevação da superfície livre da água pode ser descrita analiticamente para as ondas regulares representativas, como (Dean e Dalrymple, 1991):

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (8)$$

Por fim, a geração das ondas irregulares realísticas no Fluent ocorre através da imposição dos perfis orbitais discretizados de velocidade horizontal (u) e vertical (w) como condições de contorno. Para tanto, a metodologia necessita que a lateral de entrada (linha vermelha da Fig. (3a)) do canal, onde são impostas estas velocidades prescritas, seja discretizada. Assim, a lateral do canal de ondas foi dividida em 21 sub-regiões (linhas amarelas e pretas da Fig. (3b)), viabilizando a imposição dos dados como condição de contorno, conforme indicado por Machado *et al.* (2017). A região de imposição do contorno de velocidades prescritas, para os dois casos abordados neste estudo, pode ser observada na Fig. 3:

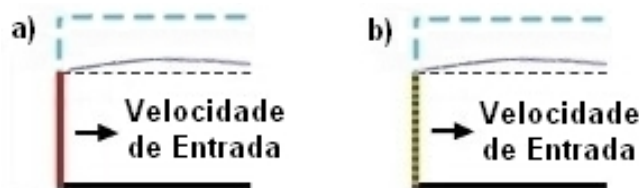


Figura 3. Ilustração da região de imposição da condição de contorno de velocidade de entrada; (a) caso das ondas regulares representativas; (b) caso das ondas irregulares realísticas.

2.2. Domínio Computacional

Como já mencionado, o presente estudo visa avaliar a potência hidropneumática disponível no duto da chaminé de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar do tipo CAO, submetido a diferentes climas de ondas. O modelo computacional é baseado no estudo realizado por Gomes *et al.* (2009).

Os dispositivos conversores de energia das ondas podem ser classificados de acordo com a profundidade de instalação em:

- *onshore*: dispositivos costeiros que tem acesso por terra;
- *nearshore*: dispositivos próximos à costa; e
- *offshore*: dispositivos afastados da costa.

De acordo com esta classificação, o dispositivo utilizado neste estudo é do tipo *onshore*, assim, considerou-se um domínio computacional bidimensional composto por um canal de ondas com o dispositivo CAO acoplado ao final.

O canal de ondas utilizado no estudo possui comprimento $L = 171,06$ m e reproduz, no fundo, a batimetria encontrada na região dos Molhes da Barra de RG, local onde foram simulados os dados de estado de mar. Sendo assim,

a profundidade do canal varia de $h_1 = 13,293$ m, na zona de geração das ondas, até $h_2 = 10,542$ m, na região do CAO, representando a região mais próxima à costa. A ilustração do domínio computacional pode ser visualizada na Fig. 4:



Figura 4. Representação do domínio computacional empregado.

Quanto às condições de contorno, tem-se: velocidade prescrita (velocidade de entrada), na região de geração da onda (linha contínua vermelha na Fig. 4), como antes indicado; pressão atmosférica, no segmento superior da lateral esquerda e no topo do canal de ondas, além da saída do duto (linha tracejada azul na Fig. 4); não deslizamento e impermeabilidade, no fundo do canal e no dispositivo CAO. Vale destacar, que as condições de contorno, as características do canal de ondas e do dispositivo CAO foram mantidas idênticas para ambos os casos simulados.

As características adotadas por Gomes *et al.* (2009) para o conversor de ondas do tipo CAO foram utilizadas e podem ser observadas na Fig. 5:

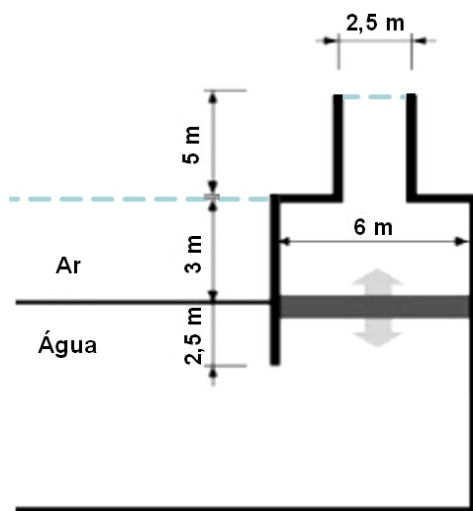


Figura 5. Características do dispositivo conversor de energia das ondas (adaptado de Gomes *et al.* (2009)).

Com relação à discretização espacial do domínio computacional, utilizou-se uma malha do tipo *stretched*, recomendada por Gomes *et al.* (2012), caracterizada por aplicar maior refinamento na região da superfície livre. Sendo assim, o domínio computacional foi dividido em três regiões verticais: R1, a região acima da superfície livre, que contém apenas ar, foi subdividida em 20 elementos; R2 a região da superfície livre, onde ocorre interação água-ar, subdividida em 40 elementos; R3, região abaixo da superfície livre, contendo apenas água, subdividida em 60 elementos. Horizontalmente, o domínio computacional foi dividido em duas regiões: R4, a região anterior ao dispositivo CAO, discretizada em 50 elementos por comprimento de onda; R5 região referente ao interior do dispositivo, discretizada em quadriláteros de lado $\Delta x = 0,01$ m, conforme recomendado por Lima *et al.* (2019). Por fim, quanto à discretização temporal, foram considerados 100 s de simulação com passo de tempo $\Delta t = T/500$, conforme indicado por Gomes *et al.* (2014). A Fig. 6 ilustra as regiões do domínio computacional para aplicação da malha *stretched*.

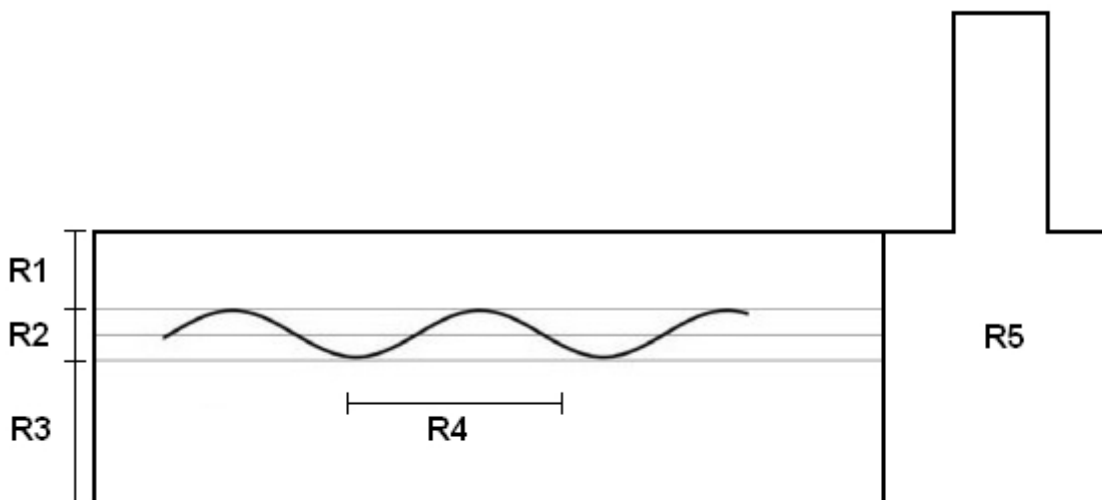


Figura 6 – Ilustração das regiões utilizadas na malha *stretched* (adaptado de Gomes *et al.* (2012)).

Conforme mencionado anteriormente, o presente estudo utiliza duas formas distintas para representar o estado de mar no local e período estudados: as ondas irregulares realísticas, obtidas a partir de dados de estado de mar simulados, e as ondas regulares representativas deste estado de mar. Portanto, destaca-se que, para a realização das discretizações necessárias na utilização da malha *stretched*, foram considerados, para ambos os casos, o T e o λ das ondas regulares.

Para monitorar a elevação da superfície livre, foi utilizada uma sonda vertical do tipo integral na posição $x = 0$ m, ou seja, na região de imposição da condição de contorno na entrada do domínio computacional, pois os dados realísticos são referentes a este ponto. E, para realização do cálculo da potência hidropneumática média, foi utilizada uma sonda horizontal no centro do duto da chaminé, com o objetivo de monitorar pressão estática, velocidade do ar e vazão mássica do ar nessa região.

4. RESULTADOS

Para avaliar a qualidade das ondas geradas no presente estudo foram utilizados os dados de elevação da superfície livre monitorados pela sonda mencionada anteriormente. No caso das ondas irregulares, os dados de elevação da superfície monitorados foram comparados com os dados de estado de mar realísticos obtidos do software TOMAWAC, enquanto, para as ondas regulares representativas foi realizada a avaliação comparando-as com a solução analítica para elevação da superfície livre dada através da Eq. (8).

A análise da qualidade dos resultados foi realizada de forma quantitativa utilizando o cálculo das métricas de erro MAE (*Mean Absolute Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*), definidas, respectivamente, como (Chai e Draxler 2014):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N O_i - P_i}{N} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (10)$$

onde, O_i representa o valor encontrado numericamente, P_i representa o valor definido pela solução analítica (no caso das ondas regulares representativas) ou representa o dado obtido através do software TOMAWAC (no caso das ondas irregulares realísticas), N representa o número total de dados e i varia de 1 até N , de forma a considerar todos os valores para O e P encontrados nessa faixa de tempo. Pode-se observar os resultados obtidos na Tab. 2, verificando o modelo computacional empregado.

Tabela 2. Resultados de MAE e RMSE.

Ondas	MAE (m)	RMSE (m)
Irregulares Realísticas	0,042	0,052
Regulares Representativas	0,009	0,011

Visando comparar a potência teórica disponível no duto do dispositivo para cada uma das ondas, calculou-se a potência hidropneumática, conforme indicado em Gomes *et al.* (2018):

$$P_H = \left(p_e + \frac{\rho v^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (11)$$

onde P_H é a potência hidropneumática (W), p_e é a pressão estática (Pa), \dot{m} é a vazão mássica de ar (kg/s) e v a velocidade do ar (m/s).

Na Figura 7 observa-se a potência hidropneumática obtida ao longo dos 100 s de simulação para as duas ondas consideradas neste estudo. Qualitativamente, como era esperado, observa-se que a potência obtida a partir das ondas irregulares realísticas apresenta maior oscilação, enquanto a extraída das ondas regulares representativas apresenta maior estabilidade a partir de $t \approx 40$ s, instante em que a onda incide no dispositivo CAO para ambos os casos. Observa-se, também, que a potência hidropneumática disponível atinge valores máximos no intervalo $55 \text{ s} \leq t \leq 65 \text{ s}$.

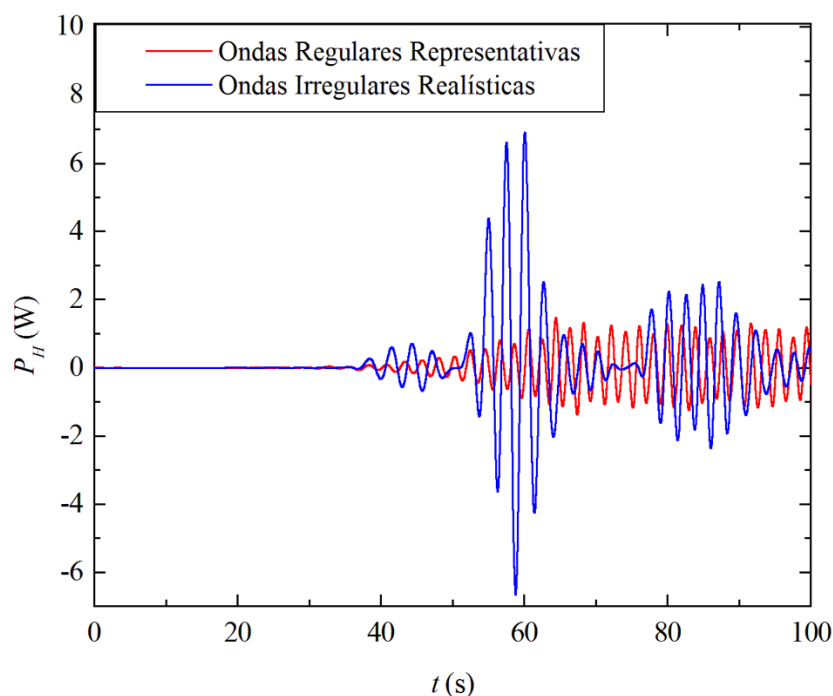


Figura 7. Resultados para a potência hidropneumática disponível no conversor CAO.

Com a finalidade de determinar o valor potência hidropneumática disponível obtida para cada caso durante o intervalo de tempo considerado, calculou-se a média RMS (*Root Mean Square*) da P_H (Holthuijsen, 2007):

$$P_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N P_k^2}{N}} \quad (12)$$

A Tab. 3 apresenta a potência hidropneumática média P_{RMS} disponível em cada caso.

Tabela 3. Potência hidropneumática média disponível.

Ondas	Potência Hidropneumática Média (W)
Irregulares Realísticas	1,292
Regulares Representativas	0,515

Analisando a Tab. 3, é possível inferir que a potência hidropneumática disponível no duto do dispositivo durante a simulação com as ondas irregulares realísticas, que reproduzem o estado de mar real da região, é 2,4 vezes maior do que aquela disponível durante a simulação com as ondas regulares representativas. O que evidencia a importância da utilização das ondas irregulares realísticas do estado de mar da região em estudo na avaliação numérica do potencial teórico disponível em um dispositivo CAO.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou a comparação entre simulações numéricas considerando ondas regulares e irregulares na costa de Rio Grande – RS, utilizando como base um estado de mar com H_s e T_m correspondentes ao estado de mar mais frequente no local de estudo no ano de 2018. O estado de mar selecionado foi utilizado para gerar perfis transientes de velocidade orbital das ondas, que foram então impostos como condição de contorno de velocidade prescrita no software de CFD Fluent para a simulação fluidodinâmica das ondas irregulares.

Para a comparação, foram simuladas também ondas regulares com altura igual à altura significativa das ondas irregulares, e período igual ao período médio das ondas irregulares. Os resultados mostraram que a simulação realizada reproduz adequadamente as ondas impostas no modelo, com RMSE de 0,05 m para as ondas irregulares e 0,01 m para as ondas regulares, quando comparando o resultado do Fluent com a série temporal de elevação original, no caso das ondas irregulares, e com a solução analítica, para o caso das ondas regulares.

Além disso, calculou-se potência hidropneumática disponível no duto de ar do dispositivo CAO simulado. Os resultados mostraram que as ondas irregulares têm uma potência disponível média 2,4 vezes maior do que a potência simulada utilizando as ondas regulares.

Partindo do princípio que as ondas irregulares representam melhor o comportamento do mar, que também é irregular, o resultado do presente trabalho indica que a utilização de H_s e T_m como os únicos preditores do estado de mar (ondas regulares) para a simulação da conversão de energia das ondas pode conduzir a resultados pouco precisos. Neste caso, por exemplo, a potência média disponível no dispositivo CAO foi reduzida em aproximadamente 60% quando submetido a incidência da onda regular representativa. Esse resultado enfatiza a importância de utilizar dados de ondas irregulares para estudos de conversão de energia das ondas.

6. REFERÊNCIAS

- Chai, T., Draxler, R. R. 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, Maryland USA, v. 7, n. 3, p. 1247-1250.
- Cruz, J. M. B. P. e Sarmento, A. J. N. A. “Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais”. Ed. Instituto do Ambiente, 2004.
- Dean, R. G. e Dalrymple, R.A.; “*Water wave mechanics for engineers and scientists*”. Vol. 2, *World Scientific*, Singapura. 1991.
- Falcão, A. F. O. e Henriques, J. C. C. “*Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review*”. *Renewable Energy*, v. 85, p. 1391 – 1424, 2016.
- Gomes, M. N., Isoldi, L. A., Olinto, R. C., Rocha, O. A., Santos, D. E. e Souza, Á. J. “Modelagem computacional de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante para a costa de Rio Grande”. *Vetor*, v. 19, n. 2, p. 58-73, 2009.
- Gomes, M. N., Isoldi, L. A., dos Santos, E. D. e Rocha, L. A. O.; “Análise de malhas para geração numérica de ondas em tanques”, VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, São Luís – Maranhão, 2012.
- Gomes, M. N.; Isoldi, L. A.; Dos Santos, E. D.; Rocha, L. A. O. Numerical Simulation of Regular Wave Propagation In Tanks. In: Luiz Alberto Oliveira Rocha E Mateus Das Neves Gomes. (Org.). *Wave Propagation*. 1ed. Cheyenne: Academicpublishing.Org (Publishing Services Llc), V., P. 115-134, 2014.
- Gomes, M. das N. Lorenzini, G., Rocha, L. A. O., dos Santos, E. D. e Isoldi, L.A. *Constructal Design Applied to the Geometric Evaluation of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter Considering Different Real Scale Wave Periods*. *J. Engin. Thermophys.* 27, 173–190, 2018.
- Hirt, C. W. and Nichols, B.D. 1981 *Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries*. *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5).
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. 1ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, p. 387.
- Lima, Y. T. B. Gomes, M. N., Cardozo, C. F., Isoldi, L. A., Santos, E. D. e Rocha, L. A. O. *Analysis of Geometric Variation of Three Degrees of Freedom through the Constructal Design Method for a Oscillating Water Column Device with Double Hidropneumatic Chamber*. *Defect and Diffusion Forum*, 396, 22–31, 2019.
- Lisboa, R. C., Teixeira, P. R. de F. e Didier, D. Simulação da Propagação de Ondas Regulares e Irregulares em um Canal Bidimensional com Praia Numérica. on: *Anais do VII SEMENGO*. Rio Grande, 2016.
- Lisboa, R. C., Teixeira, P. R de F. e Fortes C. J. Numerical evaluation of wave energy potential in the south of Brazil. Elsevier. 2017.
- Machado, B. N., Kisner, E. V., Paiva, M. S., Gomes, N. G., Rocha, L. A. O., Marques, W. C., Santos, E. D. e Isoldi, L. *A Numerical Generation of Regular Waves Using Discrete Analytical Data as Boundary Condition of Prescribed Velocity*. In: CILAMCE 2017 - XXXVIII Congresso Ibero-Latinoamericano de Métodos Computacionais em Engenharia, 2017, Florianópolis. *Anais do XXXVIII CILAMCE*, 2017.
- Mc Cormick, M. E. *Ocean Engineering Mechanics*. New York: Cambridge University Press, 1976
- Oleinik, P. H., O programa Spec2Wave: Manual do Usuário. 2019.
<https://gist.github.com/PhelypeOleinik/6dc87900dbde73ad33575b9d333e1f35/raw/spec2wave.pdf>

Tavares, P. G. Estudo Numérico Comparativo da Potência Disponível entre Ondas Regulares e Irregulares — Estudo de Caso de um Dispositivo de Conversão de Energia CAO na Costa de Rio Grande — RS. Graduação. FURG. Rio Grande. 2019.

Versteeg, H.K. e Malalasekera, W., An introduction to computational fluid dynamics – The finite volume method. Longman Group Ltd, 1995.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPERGS pelo suporte financeiro para a realização dessa pesquisa.