

Simulação Numérica de Dispositivos Conversores da Energia das Ondas do Mar Submetidos à Incidência de Ondas Irregulares que ocorreram em Rio Grande - RS

Maycon da S. Paiva¹, Ana P. G. Mocellin², Liércio A. Isoldi³

FURG, Rio Grande, RS

Bianca N. Machado⁴

UFRGS, Porto Alegre, RS

Resumo. O presente estudo visa avaliar o comportamento fluidodinâmico de dispositivos conversores da energia das ondas do mar em energia elétrica quando submetidos às ondas irregulares realísticas que ocorreram no município de Rio Grande, no estado do Rio Grande do Sul. Para tanto, são considerados os conversores do tipo Galgamento, composto por uma rampa e um reservatório, e do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), composto por uma câmara hidropneumática e um duto de ar. Quanto às simulações numéricas, foram realizadas através do software Fluent, que é baseado no Método dos Volumes Finitos e emprega o modelo multifásico *Volume of Fluid* para o tratamento da interface entre a água e o ar. A geração das ondas irregulares ocorreu por meio da metodologia WaveMIMO, que emprega dados discretos transientes da velocidade de propagação das partículas de água como condição de contorno de velocidade prescrita. Desse modo, foi possível obter uma potência teórica de 5.744,09 W para o dispositivo de Galgamento e de 155.468,93 W para o dispositivo CAO.

Palavras-chave. Energia das Ondas do Mar, Galgamento, Coluna de Água Oscilante, Ondas Irregulares Realísticas, Metodologia WaveMIMO

1 Introdução

A atual crise energética mundial, reforça a necessidade de explorar novas fontes de energia, em especial aquelas desassociadas de emissões de gases causadores do efeito estufa. De acordo com Pecher e Kofoed [15], através da extração e da conversão da energia contida nas ondas, o oceano é capaz de suprir uma parte significativa da demanda global por energia elétrica.

Uma das possibilidades para a conversão desta fonte renovável de energia dá-se através de dispositivos conversores de energia das ondas do tipo Galgamento, cujo princípio de funcionamento baseia-se em uma estrutura parcialmente submersa que utiliza uma rampa para conduzir água, acumulá-la em um reservatório e devolvê-la ao oceano passando por turbinas hidráulicas de baixa queda que acionam geradores elétricos [15]. Outra forma, é através de dispositivos do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), composto por uma câmara hidropneumática e um duto, onde a turbina e o gerador elétrico são acoplados, a câmara é aberta abaixo da superfície livre (SL) do mar e o duto aberto para a atmosfera, a oscilação da água no interior da câmara faz com que exista um escoamento de ar no duto, que incide na turbina e aciona o gerador elétrico [15].

¹mayconpaiva@furg.br

²ana.mocellin@furg.br

³liercioisoldi@furg.br

⁴bianca.machado@ufrgs.br

Estes dispositivos vêm sendo estudados no campo numérico, onde são realizados estudos de geração de ondas em canais onde os dispositivos são acoplados. A metodologia WaveMIMO, apresentada e verificada em Machado *et al.* [9], e verificada e validada em Maciel *et al.* [10], possibilita a geração de ondas irregulares baseadas em dados realísticos de estado de mar, permitindo, assim, a reprodução do fenômeno como ocorre na natureza.

A aplicação da metodologia WaveMIMO na modelagem numérica de conversores de energia das ondas podem ser vistos em: Koch *et al.* [7], que analisaram a potência hidropneumática disponível em um conversor do tipo CAO submetido às ondas irregulares realísticas e às ondas regulares representativas referentes ao município de Rio Grande (RG), no estado do Rio Grande do Sul (RS); Hübner *et al.* [6], que compararam o comportamento fluidodinâmico de um dispositivo de Galgamento sob a incidência de ondas irregulares realísticas e regulares representativas, onde foram considerados dados realísticos de estado de mar referentes a três municípios do RS; Mocellin *et al.* [12], que realizaram a otimização geométrica de um conversor do tipo CAO sujeito às ondas irregulares realísticas, que ocorreram no município de Tramandaí - RS; Paiva [14], que realizou a otimização geométrica de um dispositivo de Galgamento, sujeito às ondas irregulares realísticas que ocorreram em RG, no ano de 2018.

Nesse sentido, o presente estudo propõe realizar a análise numérica do comportamento fluido-dinâmico dos conversores de Galgamento e CAO, avaliados de forma individual. A metodologia WaveMIMO [9] foi empregada para a geração numérica das ondas irregulares realísticas que ocorreram no dia 09/11/2018 das 07:15 h às 07:18 h, no ponto de coordenadas geográficas $-52^{\circ}4' 45.08''$ O, $-32^{\circ}11' 24.92''$ S, localizado próximo aos Molhes da Barra, no município de Rio Grande, no estado do Rio Grande do Sul.

2 Modelagem Matemática e Numérica

Para a execução do presente estudo, foram realizadas simulações de geração de ondas em um canal através do software Fluent, um pacote de dinâmica de fluidos computacional. O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) [5] foi empregado, o que possibilita representar dois ou mais fluidos imiscíveis resolvendo um único conjunto de equações ao longo do domínio. Para tanto, o conceito de fração de volume (α) é usado para representar as fases no volume de controle; onde 0 indica que o volume de controle não contém uma das fases ($\alpha_{\text{água}}$ ou α_{ar}), enquanto 1 indica que apenas uma delas está contida no volume. Se o volume contém uma mistura de ar e água, então:

$$\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}. \quad (1)$$

Como mencionado, no modelo VOF um único conjunto de equações é resolvido, sendo composto pelas equações de conservação de massa, fração volumétrica e quantidade de movimento. Segundo Schlichting [16], essas equações são dadas, respectivamente, por:

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

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla(\alpha \vec{v}) = 0; \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\nabla \vec{v})\vec{v} = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} - \rho \vec{g} + S; \quad (4)$$

onde, ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3); t é o tempo (s); \vec{v} o vetor de velocidades; p é a pressão estática (N/m^2); $\bar{\tau}$ é o tensor de deformações (N/m^2) e \vec{g} é a aceleração da gravidade (m/s^2). Quanto ao termo S , presente na Eq. (4), trata-se de um sumidouro referente à ferramenta de praia numérica, que é utilizada para evitar a reflexão das ondas ao incidir no final do canal [8].

2.1 Geração de Ondas Irregulares

A geração de ondas irregulares realísticas no software Fluent ocorre através da metodologia WaveMIMO [9], que consiste na imposição de dados transientes discretos das velocidades orbitais de propagação das ondas nas direções horizontal (u) e vertical (w) como condições de contorno de velocidade prescrita. Para tanto, no presente estudo, são considerados dados realísticos de estado de mar oriundos do modelo espectral TOMAWAC. Após a obtenção dos dados de estado de mar, o espectro de ondas é transformado em uma série temporal de elevação da SL, através do procedimento proposto em Oleinik *et al.* [13], que emprega a Transformada Inversa de Fourier.

Como mencionado, os dados realísticos do estado de mar abordados neste estudo se referem a um local próximo aos Molhes da Barra, no município de RG. A fim de determinar o estado de mar mais frequente, os dados realísticos de altura significativa (H_s) e período médio (T_m) referentes a este local foram analisados. Após, visando estabelecer as características das ondas regulares representativas deste estado de mar, calculou-se o comprimento de onda (λ) utilizando a relação de dispersão. Deste modo, as características das ondas regulares representativas deste estado de mar são: altura significativa, $H_s = 1,14$ m; comprimento, $\lambda = 31,50$ m; período médio, $T_m = 4,50$ s; e profundidade $h = 13,29$ m. Destaca-se que, no presente estudo, tais características são utilizadas na discretização espacial e na discretização temporal do domínio computacional. Além disso, cabe ressaltar que h se refere à profundidade encontrada na região selecionada.

3 Descrição do Problema

Foi considerado um domínio computacional bidimensional, que consiste em um canal de ondas numérico de altura $H = 16,00$ m e comprimento $L = 171,06$ m, que corresponde à distância entre o local selecionado para o estudo e os Molhes da Barra. Além disso, seguindo a recomendação de Mocellin *et al.* [12], a batimetria do local de estudo é reproduzida no fundo do canal, por meio de dados batimétricos da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha Brasileira, digitalizados por Cardoso *et al.* [2], desse modo, a profundidade do mesmo varia de $h = 13,29$ m, na região do local selecionado, até $h_f = 10,54$ m, na região dos Molhes da Barra.

Para a verificação do modelo numérico, as ondas irregulares realísticas são geradas no canal de ondas sem a presença dos dispositivos conversores, onde uma sonda de monitoramento da elevação da SL é empregada em $x = 0$ m. Nessa etapa do estudo, é utilizada a praia numérica, que, seguindo a recomendação de Lisboa *et al.* [8], possui comprimento $L_B = 2\lambda$. Os resultados obtidos foram comparados à elevação da SL proveniente do modelo espectral TOMAWAC. Para tanto, utilizou-se as médias de erro MAE (*Mean Absolute Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*) [3]. A ilustração do domínio computacional empregado é apresentada na Figura 1, onde são destacadas as condições de contorno empregadas e as principais cotas.

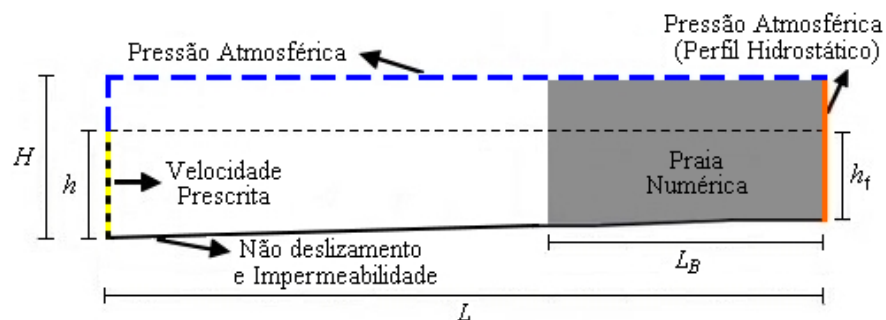


Figura 1: Domínio computacional utilizado para a verificação do modelo numérico. Fonte: os autores.

Para a avaliação do comportamento fluidodinâmico dos conversores de energia sob a incidência de ondas irregulares realísticas, o domínio computacional é considerado sem a região de praia numérica e com o dispositivo acoplado ao final do canal. Nessa etapa do estudo, os resultados foram monitorados por sondas na entrada do reservatório do dispositivo, no caso do conversor do tipo Galgamento, e por uma sonda no centro do duto da turbina, no caso do dispositivo CAO.

Ainda, cabe ressaltar que a determinação da potência teórica disponível no dispositivo do tipo Galgamento foi obtida como em Martins *et al.* [11], enquanto para o dispositivo do tipo CAO a potência hidropneumática foi calculada conforme Gomes *et al.* [4]. Por fim, cabe destacar que as dimensões adotadas para os conversores no presente estudo se referem ao caso ótimo encontrado em avaliações geométricas do dispositivo de Galgamento [14] e do tipo CAO [12]. Nesse sentido, as geometrias consideradas para os dispositivos abordados são apresentadas na Figura 2, onde suas principais cotas são destacadas.

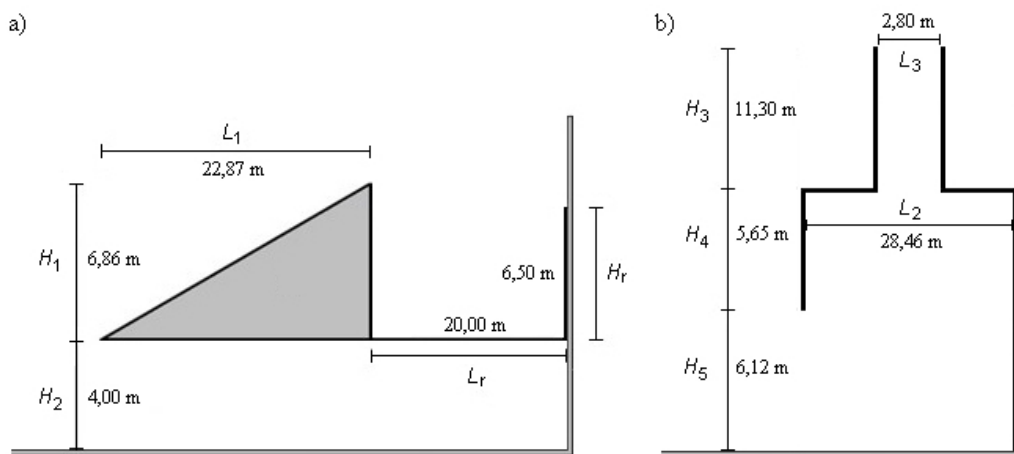


Figura 2: Conversor de energia das ondas do tipo: (a) Galgamento; (b) CAO. Fonte: os autores.

Quanto à discretização espacial do domínio computacional, utilizou-se a recomendação de Gomes *et al.* [4] para a malha do tipo *stretched*. Já a discretização espacial na região dos dispositivos, deu-se conforme Paiva [14], para o dispositivo de Galgamento; e Mocellin *et al.* [12], para o dispositivo CAO. Enquanto para a discretização temporal, foi utilizado um passo de tempo de 0,01 s, que corresponde à $T_m/450$, conforme indicado por Barreiro [1]. Foi considerado um tempo total de 200 s de simulação numérica de geração e propagação de ondas irregulares realísticas.

Por fim, quando aos métodos numéricos empregados, têm-se os esquemas PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) na resolução do acoplamento pressão-velocidade e PRESTO (*PREssure STaggering Option*) na discretização da equação de pressão. Para o tratamento dos termos advectivos, foi adotado o método de discretização *upwind* de primeira ordem. Para a determinação da superfície ocupada pela água é empregado o método *Geo-reconstruction*. Além disso, foram impostos fatores de sub-relaxação para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento de, respectivamente, 0,3 e 0,7.

4 Resultados e Discussões

A fim de verificar o modelo numérico empregado, na Figura 3 é apresentada uma comparação qualitativa entre a série de ondas irregulares realísticas, geradas utilizando a metodologia WaveMIMO, e a série temporal de elevação da superfície livre, oriunda do modelo espectral TOMAWAC.

Desse modo, pode-se observar na Figura 3 que o estado de mar que ocorreu no município de RG foi adequadamente reproduzido nas simulações numéricas. Este resultado é corroborado, quantitativamente, através das métricas obtidas, sendo MAE = 0,102566 m e RMSE = 0,129689 m.

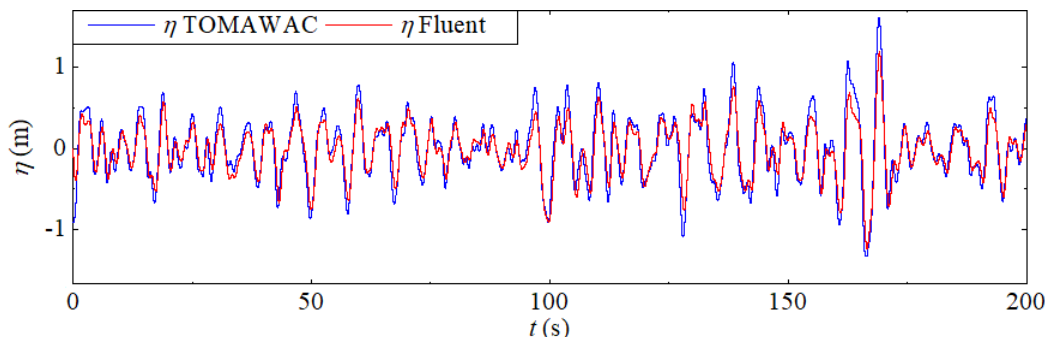


Figura 3: Comparação qualitativa dos resultados obtidos. Fonte: os autores.

Com isso, dando prosseguimento à análise dos resultados, na Figura 4 (a) é apresentada a evolução da massa de água acumulada (m) no reservatório do dispositivo de Galgamento; enquanto na Figura 4 (b) apresenta-se a potência hidropneumática instantânea obtida ao longo dos 200 s de simulação. Em ambos os casos, é possível observar a condição inicial de inércia do escoamento, visto que tanto os primeiros galgamentos, na Figura 4 (a); quanto a geração de potência, na Figura 4 (b), ocorrerem após os 20 s de simulação e passam a ser mais frequentes após $t = 50$ s.

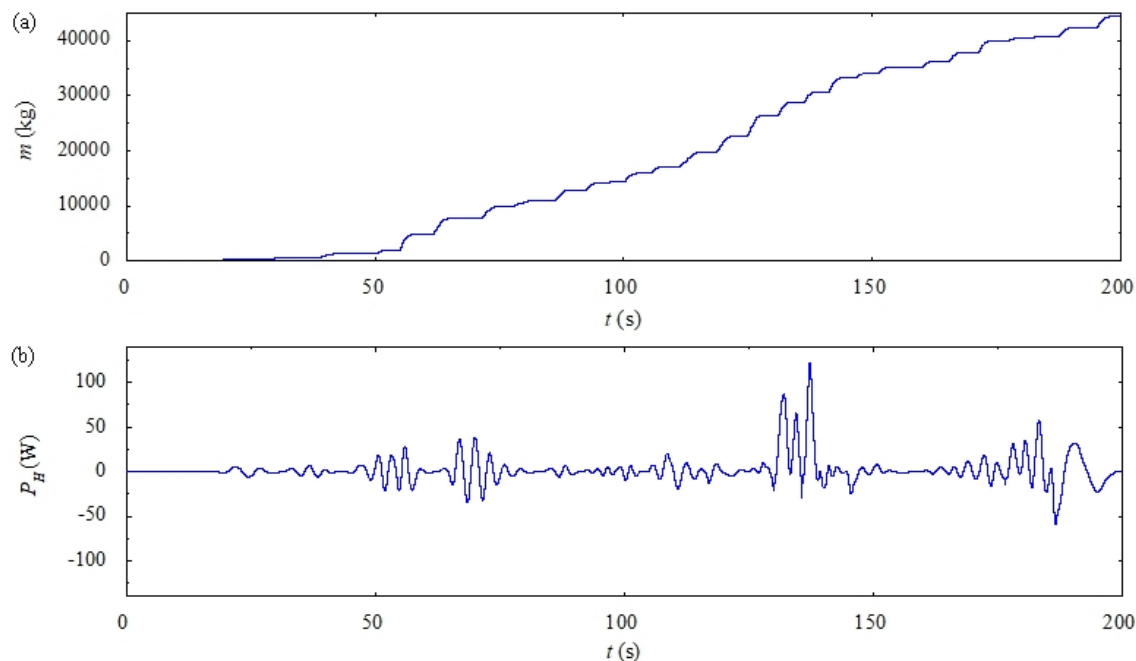


Figura 4: Resultados obtidos: (a) evolução da massa de água acumulada no reservatório do dispositivo de Galgamento; (b) potência hidropneumática instantânea disponível no dispositivo CAO. Fonte: os autores.

Em uma análise quantitativa dos resultados obtidos para o dispositivo de Galgamento, destaca-se que o maior pico de vazão mássica correspondeu à $\dot{m} = 47,52$ kg/s, que ocorreu em $t = 126,26$ s. Ao final da simulação, o reservatório do dispositivo de Galgamento captou um total de $m = 44.370,63$ kg. Por fim, a potência teórica disponível no dispositivo no presente estudo foi de $P_d = 5.744,09$ W; sendo válido ressaltar que o intervalo de tempo considerado para o cálculo da potência abrange o intervalo entre o primeiro galgamento ($t = 19,96$ s) e o final da simulação.

Quanto aos resultados obtidos para o dispositivo CAO, observou-se que os maiores picos de potência instantânea ocorreram em torno de $t = 130$ s, sendo que o maior pico foi registrado em $t = 137$ s e corresponde a $P_H = 122,56$ W. Cabe destacar que como a turbina do dispositivo é acionada independentemente do sentido do escoamento de ar, na avaliação quantitativa considera-se o módulo da potência hidropneumática. Assim, obteve-se um total de $P_H = 155.468,93$ W.

5 Considerações Finais

Através da metodologia WaveMIMO, foi possível reproduzir adequadamente as ondas irregulares encontradas no local. Desse modo, pôde-se analisar o comportamento fluidodinâmico dos dispositivos conversores de energia das ondas de Galgamento e CAO, quando submetidos à incidência das ondas irregulares realísticas encontradas na costa do município de Rio Grande - RS.

Ressalta-se que, em ambos os estudos, foram considerados 200 s de simulação numérica de geração e propagação de ondas no canal. Dessa forma, o dispositivo de Galgamento atingiu uma potência teórica disponível de $P_d = 5.744,09$ W, enquanto o dispositivo CAO obteve uma potência teórica disponível consideravelmente superior, na ordem de $P_H = 155.468,93$ W. No entanto, cabe ressaltar que uma comparação direta entre as potências obtidas não é pertinente, visto que tratam-se de princípios de conversão diferentes. Quanto a estudos futuros, sugere-se a simulação de um dispositivo híbrido, combinando ambos os princípios físicos de conversão abordados no presente estudo, Galgamento e CAO.

Agradecimentos

A. P. G. M. e M. S. P. agradecem ao CNPq e à CAPES (Código de financiamento 001) por suas bolsas de mestrado e doutorado. L. A. Isoldi agradece ao CNPq pela bolsa de pesquisa (Processo: 309648/2021-1). B. N. M. agradece o apoio financeiro do programa institucional de auxílio à pesquisa para professores recém-contratados da UFRGS. Todos os autores agradecem à FAPERGS (Chamada Pública FAPERGS 07/2021 - Programa Pesquisador Gaúcho (PqG), Processo: 21/2551-0002231-0) e ao CNPq (Chamada Pública CNPq/MCTI N^o 10/2023 – Universal, Processo: 403408/2023-7).

Referências

- [1] T. G. Barreiro. “Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia”. Dissertação de mestrado. Universidade de Nova Lisboa, 2009.
- [2] S. D. Cardoso, W. C. Marques, E. d. P. Kirinus e C. E. Stringari. “Levantamento batimétrico usando cartas náuticas”. Em: **13^a Mostra da Produção Universitária**. Rio Grande: Universidade Federal do Rio Grande, 2014, p. 2.
- [3] T. Chai e R. R. Draxler. “Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature”. Em: **Geoscientific Model Development** 7 (2014), pp. 1247–1250. DOI: 10.3390/earth2040059.

- [4] M. N. Gomes, G. Lorenzini, L. A. O. Rocha, E. D. Dos Santos e L. A. Isoldi. “Constructal design applied to the geometric evaluation of an oscillating water column wave energy converter considering different real scale wave periods”. Em: **Journal of Engineering Thermophysics** 27 (2018), pp. 173–190. DOI: 10.1134/S1810232818020042.
- [5] C. W. Hirt e B. D. Nichols. “Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries”. Em: **Journal of Computational Physics** 39 (1981), pp. 201–225.
- [6] R. G. Hübner, C. Fragassa, M. da S. Paiva, P. H. Oleinik, M. das N. Gomes, L. A. O. Rocha, E. D. dos Santos, B. N. Machado e L. A. Isoldi. “Numerical Analysis of an Overtopping Wave Energy Converter Subjected to the Incidence of Irregular and Regular Waves from Realistic Sea States”. Em: **Journal of Marine Science and Engineering** 10.8 (2022), p. 1084. DOI: 10.3390/jmse10081084.
- [7] A. H. S. Koch, M. S. Paiva, C. B. Monteiro, P. H. Oleinik, L. A. Isoldi e B. N. Machado. “Numerical Evaluation of the Hydropneumatic Power of the Oscillating Water Column Wave Energy Converter Submitted to Regular and Irregular Waves”. Em: **Engineering Science Technology** 3 (2022). DOI: 10.37256/est.3120221022.
- [8] R. C. Lisboa, P. R. Teixeira e E. Didier. “Regular and irregular wave propagation analysis in a flume with numerical beach using a Navier-Stokes based model”. Em: **Defect and Diffusion Forum** 372 (2017), pp. 81–90. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ddf.372.81.
- [9] B. N. Machado, P. H. Oleinik, E. P. Kirinus, E. D. Dos Santos, L. A. O. Rocha, M. das N. Gomes, J. M. P. Conde e L. A. Isoldi. “WaveMIMO Methodology: Numerical Wave Generation of a Realistic Sea State”. Em: **Journal of Applied and Computational Mechanics** 7 (2021), pp. 2129–2148. DOI: 10.22055/jacm.2021.37617.3051.
- [10] R. P. Maciel, C. Fragassa, B. N. Machado, L. A. O. Rocha, E. D. Dos Santos, M. Das N. Gomes e L. A. Isoldi. “Verification and Validation of a Methodology to Numerically Generate Waves Using Transient Discrete Data as Prescribed Velocity Boundary Condition”. Em: vol. 9. 2021. DOI: 10.3390/jmse9080896.
- [11] J. C. Martins, M. M. Goulart, M. das N. Gomes, J. A. Souza, L. A. O. Rocha, L. A. Isoldi e E. D. dos Santos. “Geometric evaluation of the main operational principle of an overtopping wave energy converter by means of Constructal Design”. Em: **Renewable Energy** 118 (2018), pp. 727–741. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.061>.
- [12] A. P. G. Mocellin, R. P. Maciel, P. H. Oleinik, E. D. dos Santos, L. A. O. Rocha, J. S. Ziebell, L. A. Isoldi e B. N. Machado. “Geometrical Analysis of an Oscillating Water Column Converter Device Considering Realistic Irregular Wave Generation with Bathymetry”. Em: **Journal of Experimental and Theoretical Analyses** 1.1 (2023), pp. 24–43. DOI: 10.3390/jeta1010003.
- [13] P. H. Oleinik, G. P. Tavares, B. N. Machado e L. A. Isoldi. “Transformation of Water Wave Spectra into Time Series of Surface Elevation”. Em: **Earth** 2 (2021), pp. 997–1005. DOI: 10.3390/earth2040059.
- [14] M. S. Paiva. “Simulação Numérica de um Conversor de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Galgamento Considerando Dados Realísticos de Estado de Mar Encontrados na Costa do Município de Rio Grande – RS”. Dissertação de Mestrado em Matemática Aplicada. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2023.
- [15] A. Pecher e J. P. Kofoed. **Handbook of ocean wave energy**. Springer Nature, 2017.
- [16] H. Schlichting. **Boundary Layer Theory**. McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1979.