



Investigação Numérica e Geométrica de um Conversor de Energia das Ondas do Tipo Galgamento: Análise da Profundidade de Submersão

Sthefany Amaral da Silva¹; Liércio André Isoldi²; Elizaldo Domingues dos Santos³; Luiz Alberto Oliveira Rocha⁴; Mateus das Neves Gomes⁵

Resumo: A demanda por eletricidade e a busca por fontes de energia limpa têm aumentado, impulsionadas por preocupações ambientais e pela necessidade de diversificar a matriz energética. Nesse contexto, a energia das ondas se destaca como uma solução promissora. Este artigo apresenta uma investigação numérica e geométrica de um conversor de energia das ondas do tipo galgamento. Foram consideradas ondas com período $T = 8$ s e altura $H_s = 1,25$ m, características do clima de ondas da região do litoral do Paraná, em um ponto com profundidade de 30 metros (Ponto 30) a 41 km da costa da cidade de Pontal do Paraná. O objetivo da investigação foi avaliar a eficiência do dispositivo de galgamento quando submetido a diferentes profundidades de submersão. Foram considerados quatro níveis de submersão ($S_1 = 28,5$ m, $S_2 = 27,5$ m, $S_3 = 26,0$ m, e $S_4 = 25,5$ m) e diferentes ângulos de inclinação da rampa, com o parâmetro H_1/L_1 (H_1 é a altura da rampa e L_1 é o comprimento da rampa) mantido constante. A metodologia foi dividida em duas partes principais. A avaliação geométrica foi realizada utilizando o Design Construtal, associado à busca exaustiva, para otimizar a configuração do dispositivo, com variações na inclinação da rampa. Para a solução numérica do problema, foram realizadas 37 simulações utilizando o modelo VOF, implementado no ANSYS Fluent, que emprega o método dos volumes finitos. Os resultados indicam que a configuração mais eficiente foi para profundidade de submersão $S_4 = 25,5$ m e ângulo de 14° , resultando em eficiência de 6,18% e maior volume de água acumulada. Profundidades maiores, como $S_3 = 26,0$ m, mostraram menor eficiência, especialmente em ângulos maiores.

Palavras-chave: Conversor de energia das ondas do mar; dispositivo de galgamento; ANSYS Fluent; Design Construtal; eficiência energética.

¹ Instituto Federal do Paraná-Campus Paranaguá / 20241mcts0003@ifpr.edu.br

² Universidade Federal do Rio Grande-Rio Grande / liercioisoldi@gmail.com

³ Universidade Federal do Rio Grande-Rio Grande / elizaldosantos@furg.br

⁴ Universidade Federal do Rio Grande-Rio Grande / laorochoa@gmail.com

⁵ Instituto Federal do Paraná-Campus Paranaguá / mateus.gomes@ifpr.edu.br

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica desempenha um papel crucial na vida moderna, sendo indispensável tanto para o bem-estar das pessoas quanto para o desenvolvimento industrial e econômico, especialmente em economias emergentes (Hinrichs *et al.*, 2014; Raghutla e Chittedi, 2021). Devido à sua importância central na matriz energética global, há uma necessidade crescente de diversificar as fontes de energia para atender à demanda em aplicações residenciais, comerciais e industriais (Todorović *et al.*, 2023).

Com o aumento das preocupações sobre as mudanças climáticas e a segurança energética, as energias renováveis têm se destacado como alternativas viáveis aos combustíveis fósseis, que são responsáveis por mais de 75% das emissões globais de gases de efeito estufa (Marouani, 2024).

A energia oceânica, uma forma de energia renovável, inclui diversas fontes, como a energia das ondas, das marés, além dos gradientes de temperatura e salinidade (Tolmasquim, 2016). A energia das ondas é gerada pelo movimento das ondas no mar, causado pelos ventos que sopram sobre a superfície oceânica. Esses ventos são, por sua vez, originados pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, o que provoca variações nas pressões atmosféricas (Cruz e Sarmento, 2004; Santos, 2013).

O aproveitamento da energia das ondas ocorre por meio de dispositivos conversores, que transformam o movimento das ondas em eletricidade. Os dispositivos que convertem a energia das ondas em eletricidade podem ser classificados tanto pela localização de instalação quanto pelo princípio de funcionamento. Em termos de localização, há os dispositivos costeiros (*onshore*), próximos à costa (*nearshore*) e afastados da costa (*offshore*), que diferem em facilidade de manutenção e potencial energético. Quanto ao princípio de funcionamento, os principais tipos são a Coluna de Água Oscilante (CAO), os Corpos Oscilantes e os Dispositivos de Galgamento (Cruz e Sarmento, 2004).

O princípio de funcionamento do dispositivo de galgamento consiste em utilizar uma rampa inclinada que guia as ondas do mar para um reservatório localizado acima do nível médio do mar. A energia potencial da água armazenada é convertida em energia cinética quando ela flui de volta para o mar, passando por turbinas hidráulicas, que transformam essa energia em energia mecânica. Essa energia mecânica é então convertida em eletricidade por geradores. Após passar pelas turbinas, a água retorna ao oceano, completando o ciclo de geração de energia (Margheritini, Vicinanza e Frigaard, 2009).

Para analisar o comportamento do dispositivo de galgamento ao variar a profundidade de submersão da rampa e o grau de liberdade, este artigo dedica-se à investigação numérica e geométrica de um conversor de energia das ondas, considerando as características das ondas na região costeira do sul do Brasil. O estudo é conduzido em um ponto específico do litoral do Paraná, denominado Ponto 30 (Nemes e Marone, 2013), localizado a 41 km da costa de Pontal do Paraná, com profundidade de 30 metros, conforme a figura 1.

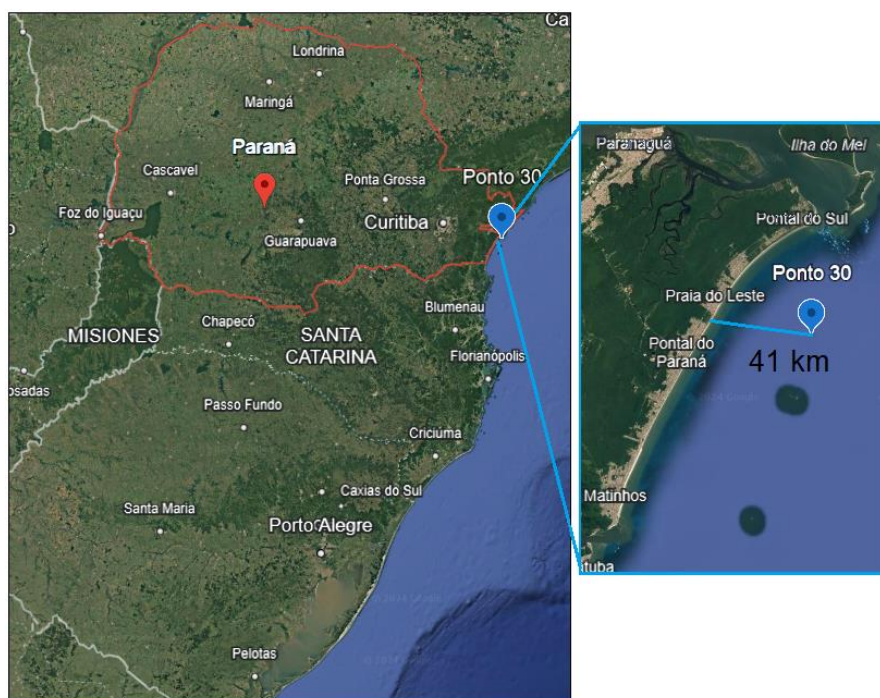


Figura 1: Localização do Ponto 30 no litoral do Paraná.

A metodologia utilizada para esta análise envolve uma abordagem computacional, utilizando o método *Volume of Fluid* (VOF) (Hirt e Nichols, 1981). As simulações numéricas foram realizadas no *software* ANSYS Fluent, onde foi gerado o domínio computacional bidimensional (2D). A análise numérica baseou-se em um código de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), empregando o método de volumes finitos (MVF). O método VOF tem sido amplamente utilizado em simulações numéricas para dispositivos de galgamento como nos trabalhos de Liu, Hyun e Jin, (2008), Iahnke *et al.* (2009), Peng e Zou (2011) e Musa *et al.* (2020).

Além disso, o Design Construtal foi utilizado para avaliar as diferentes configurações geométricas da rampa do dispositivo de galgamento, enquanto a otimização dos parâmetros foi realizada por meio de uma busca exaustiva. A Teoria Construtal explica como sistemas de fluxo evoluem para maximizar o escoamento e garantir sua eficiência ao longo do tempo, observando esse princípio na natureza. O Design Construtal é a aplicação prática dessa teoria na engenharia, onde se desenvolvem sistemas otimizados com base na evolução geométrica, considerando restrições físicas e visando melhorar o desempenho, como eficiência e fluxo. Diferente de um método de otimização matemática, o Design Construtal pode ser associado a métodos de otimização, como a busca exaustiva, para alcançar o melhor desempenho (Bejan, 2000; Bejan e Zane, 2012; Bejan e Lorente, 2008, 2013; GOMES *et al.*, 2018).

Diversos estudos têm abordado, de forma computacional e experimental, o desempenho de dispositivos de galgamento. Paiva *et al.* (2021) realizaram uma pesquisa bibliométrica sobre estudos científicos dedicados no uso desses dispositivos para converter a energia das ondas do mar em eletricidade.

Em geral, os trabalhos analisaram o impacto dos parâmetros de inclinação da rampa do dispositivo de galgamento com o objetivo de maximizar a captação de água no reservatório. Machado (2012) demonstrou que a inclinação da rampa pode aumentar a eficiência em até vinte

vezes em comparação ao pior desempenho. Já dos Santos *et al.* (2014) mostraram que a forma ideal da rampa está fortemente relacionada à profundidade relativa, ou seja, a razão entre a profundidade da água e o comprimento de onda das ondas de entrada. Além disso, Gomes *et al.* (2015) afirmam que não há uma forma universal que garanta o melhor desempenho para o dispositivo em todas as condições, reforçando a necessidade de analisar as condições geométricas e físicas específicas de cada local de instalação.

No estudo de Goulart *et al.* (2015), foi analisado o impacto da profundidade de submersão no desempenho de um dispositivo de galgamento em escala real. As descobertas indicam que a quantidade de água captada aumenta conforme a profundidade de submersão, e as geometrias ideais da rampa variam de acordo com essa profundidade, sugerindo que a submersão é um fator crítico para a eficiência. Por outro lado, Martins *et al.* (2018) observou que o afundamento do dispositivo não resultou necessariamente em um melhor desempenho. Na pesquisa de Zhang *et al.* (2023), que analisou um dispositivo de múltiplos estágios, os resultados indicaram que, embora a profundidade de submersão seja um fator importante no projeto, outros parâmetros têm um impacto maior no desempenho, direcionando os esforços futuros de design para esses fatores.

Assim, esta pesquisa busca contribuir com uma análise de parâmetros geométricos e operacionais que influenciam a eficiência energética de dispositivos de galgamento, considerando as características específicas do litoral paranaense e aplicando abordagens numéricas e geométricas para otimização do desempenho, conforme a recomendação de Gomes *et al.* (2015) de analisar cada caso com base nas particularidades regionais.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelagem Matemática e condições de contorno e inicial do problema

As simulações numéricas foram realizadas considerando um dispositivo *nearshore*, devido à localização do ponto, a 41 km da costa de Pontal do Paraná, a uma profundidade de 30 m (Nemes e Marone, 2013). O domínio computacional bidimensional (figura 2) ilustra a interação entre ondas regulares, que representam as características médias de uma onda oceânica, e o dispositivo de galgamento. Variou-se a profundidade de submersão do dispositivo de galgamento, medidos a partir do fundo, em quatro níveis ($S_1 = 28,5$ m, $S_2 = 27,5$ m, $S_3 = 26,0$ m, e $S_4 = 25,5$ m) para avaliar seu impacto na eficiência.

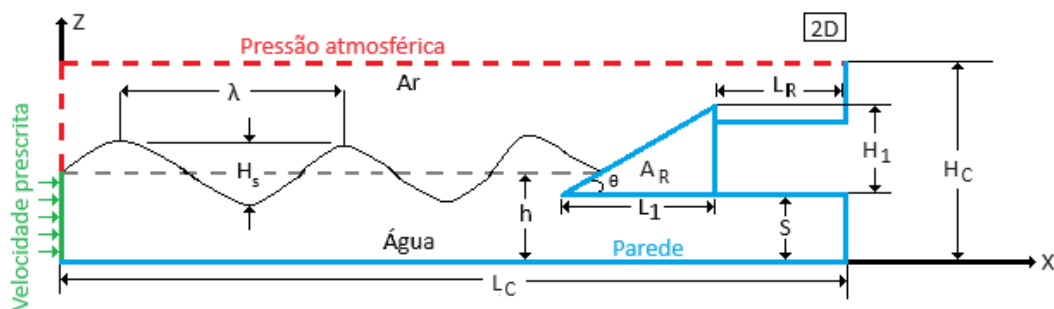


Figura 2: Ilustração do domínio computacional 2D.

Nas simulações, a profundidade de submersão S (figura 2) foi o parâmetro variado, permitindo analisar o desempenho do dispositivo sob diferentes condições e compreender sua influência na eficiência da conversão de energia das ondas.

Segundo Nemes e Marone (2013) as características de onda mudam de acordo com a estação do ano, e na presente pesquisa foi analisada a estação verão com altura significativa de onda de 1,25 e período igual a 8 s (tabela 1). É importante ressaltar que a escolha do verão para a análise é justificada, pois essa estação é predominante na região do litoral do Paraná.

Tabela 1: Características de onda no verão.

	Verão
Período (T)	8 s
Comprimento de onda (λ)	95,96 m
Altura significativa da onda (H_S)	1,25 m
Profundidade da água (h)	30 m
Potência incidente da onda (P_{INC})	22.203,91 W

Fonte: Nemes e Marone (2013).

As equações da relação do comprimento de onda λ e do comprimento do canal L_C , estão descritas em Chakrabarti (2005). O comprimento do reservatório L_R do domínio computacional (figura 2) foi mantida fixa $L_R = 10,0$ m, além de $H_C = 43,0$ m (altura do canal). O comprimento do canal (L_C) é dado por $L_C = 2\lambda + L_1 + L_R$.

As ondas foram geradas a partir da prescrição de velocidade na superfície lateral esquerda do canal de ondas, simulando o comportamento de um gerador de ondas Martins *et al.* (2018) conforme mostrado na figura 2 (linha verde). As componentes de velocidade (equações (1) e (2)) foram calculadas com base na teoria de ondas de Stokes de 2ª ordem, nas direções de propagação horizontal (x) e vertical (z) (Chakrabarti, 2005).

$$u(x, z) = \frac{H g k \cosh k(h + z)}{2\sigma \cosh k h} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3H^2 \sigma k \cosh 2k(h + z)}{16 \sinh^4 k h} \cos 2(kx - \sigma t) \quad (1)$$

$$w(x, z) = \frac{H g k \sinh k(h + z)}{2\sigma \cosh k h} \sin(kx - \sigma t) + \frac{3H^2 \sigma k \sinh 2k(h + z)}{16 \sinh^4 k h} \sin 2(kx - \sigma t) \quad (2)$$

onde: H é a altura significativa da onda (m), $k = 2\pi/\lambda$ é o número de onda (m^{-1}), h é a profundidade da água (m), T é o período da onda (s), $\sigma = 2\pi/T$ é a frequência (rad/s) e t é o tempo (s).

Na parte superior da superfície lateral esquerda e na superfície superior do canal de ondas incluem a aplicação de pressão atmosférica (tracejado vermelho da figura 2), enquanto as demais superfícies foram modeladas como paredes, com condição de não deslizamento. A condição inicial adotada foi de fluido em repouso (condição FLAT), com uma superfície livre de 30 m de altura, resolvendo o escoamento transiente da mistura de ar e água no regime laminar.

Na equação (3) é definida a elevação da superfície livre numa posição fixa do canal de ondas (Chakrabarti, 2005).

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) + \frac{(2A)^2 k \cosh(kh + kz)}{16 \sinh^3(kh)} [2 \cosh(2kh)] \cos[2(kx - \omega t)] \quad (3)$$

2.2 Design Construtal Aplicado ao Dispositivo de Galgamento

No presente estudo, o Design Construtal (Bejan, 2000; Bejan e Zane, 2012; Bejan e Lorente, 2008, 2013), é aplicado com o objetivo de avaliar a geometria do sistema em conjunto com o método de busca exaustiva visando maximizar o aproveitamento da energia das ondas e aumentar a eficiência do dispositivo de galgamento. Para tanto foram aplicadas duas restrições: a área da rampa (A_R), apresentada na equação (4) e uma limitação dimensional (equação (5)), que visa garantir que o dispositivo não fique totalmente submerso (e por consequência garanta o adequado funcionamento do dispositivo).

$$A_R = \frac{L_1 H_1}{2} \quad (4)$$

$$S + H_1 > h + \left(\frac{H_S}{2}\right) \quad (5)$$

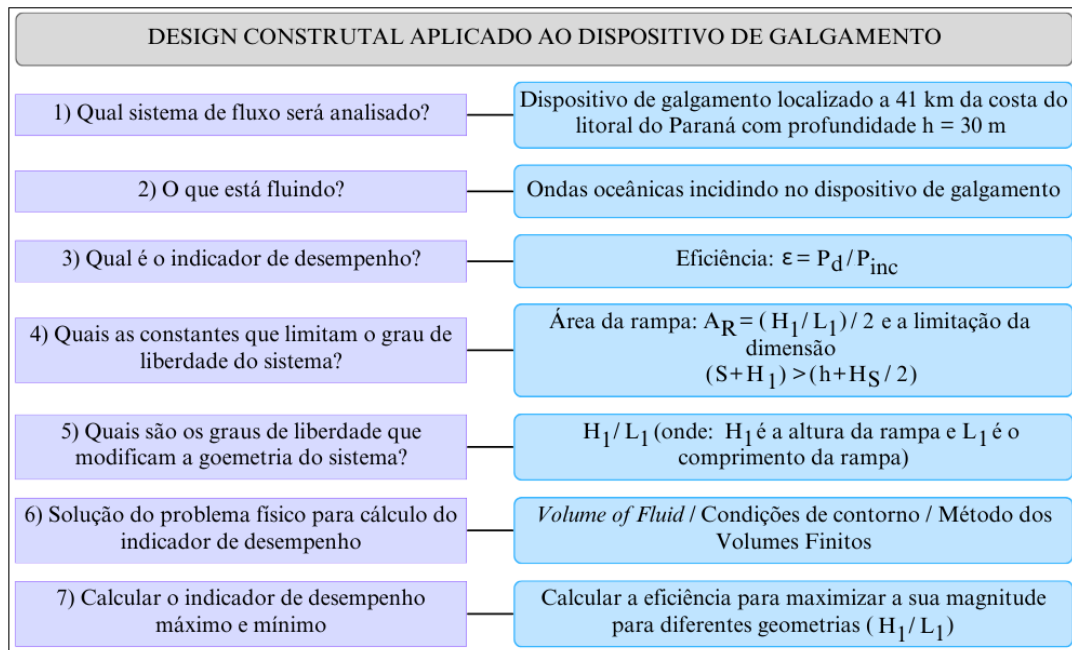
A área da rampa é mantida fixa, sendo calculada pelo produto entre o comprimento de onda λ e a altura significativa H_S , dividido por 2, em que λ e H_S estão definidos na tabela 1, além disso, os parâmetros estão ilustrados na figura 2.

O grau de liberdade é definido por H_1/L_1 (onde: H_1 é a altura da rampa e L_1 é o comprimento da rampa), e o indicador de desempenho é a relação da eficiência que segundo Martins *et al.* (2018) definida pela equação (6):

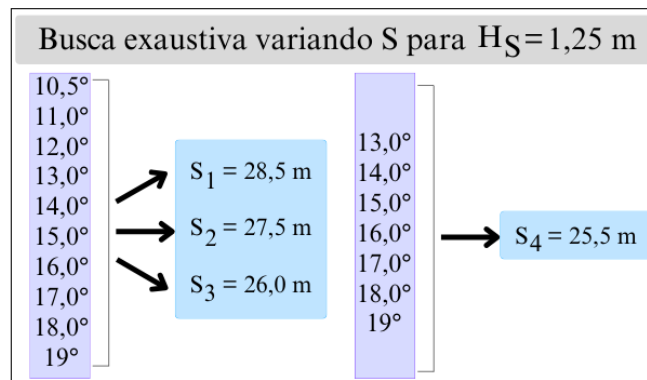
$$\varepsilon = \frac{P_d}{P_{INC}} = \frac{\frac{\rho g A^2 \omega}{4k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right)}{\frac{g h_a(t_f)}{t_f} \int_{t_i}^{t_f} \dot{m}_i dt} \quad (6)$$

onde: P_{INC} é a potência incidente (W); P_d é a potência disponível (W); ρ é a densidade da água (kg/m^3); A é a amplitude da onda (m), dada por $H_S/2$; k é o número de onda, dado por $2\pi/\lambda$; ω é a frequência (rad/s), dada por $2\pi/T$; \dot{m}_i é a taxa de fluxo de massa (kg/s); h_a representa a quantidade de água acumulada no reservatório (m); e t_f é o tempo final (s).

Na figura 3 (a) e (b) estão indicadas as duas etapas da avaliação geométrica: aplicação do Design Construtal ao dispositivo de galgamento, e a otimização associada a busca exaustiva, respectivamente. Na figura 3(b) para as submersões S_1 , S_2 e S_3 , foram simulados 10 casos com ângulos variando de $10,5^\circ$ a 19° . Já para S_4 , foram simulados 7 ângulos, de 13° a 19° , pois apenas nesses ângulos a equação (5) foi satisfeita.



(a)



(b)

Figura 3: Etapas da avaliação geométrica: (a) aplicação do Design Construtal e (b) busca exaustiva aplicada ao problema.

2.3 Modelo multifásico *Volume of Fluid*

As simulações numéricas foram realizadas utilizando o modelo VOF (Hirt e Nichols, 1981), indicado para representar a interação entre dois fluidos imiscíveis, como ar e água. O escoamento foi considerado laminar, incompressível e bifásico. As equações de conservação de massa (equação (7)) e de quantidade de movimento (equação (8)) foram resolvidas, enquanto o tensor de taxa de deformação (equação (9)) representou o comportamento de um fluido newtoniano.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (7)$$

onde: ρ é a densidade (kg/m^3); e \vec{V} é o vetor velocidade do escoamento (m/s).

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (8)$$

onde: P é a pressão (N/m^2); ρ , \vec{g} e \vec{F} são as forças de flutuação e externa do corpo (N/m^3), respectivamente;

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} I \right] \quad (9)$$

onde: μ é a viscosidade dinâmica ($kg/m \cdot s$); I é um tensor unitário; e o segundo termo do lado direito diz respeito à tensão desviadora (N/m^2).

A equação (10) representa a fração volumétrica (α), utilizada para determinar a quantidade de água e ar em cada volume de controle, sendo a soma das frações sempre igual a 1. A interface entre os fluidos foi rastreada com precisão por meio desse método.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{V}) = 0 \quad (10)$$

Além disso, a densidade e a viscosidade da mistura têm de ser calculadas em cada volume de controle elementar através da equação (11) e da equação (12).

$$\rho = \alpha \rho_{agua} + (1 - \alpha) \rho_{ar} \quad (11)$$

$$\mu = \alpha \mu_{agua} + (1 - \alpha) \mu_{ar} \quad (12)$$

2.4 Método Numérico e discretização

As simulações numéricas foram conduzidas utilizando um solucionador baseado em pressão, com acoplamento pressão-velocidade PISO. A discretização espacial foi realizada através do método *Green-Gauss* para avaliação de gradientes, e o esquema PRESTO foi adotado para o cálculo de pressão. Para o cálculo do momento, foi utilizado o esquema de *First Order Upwind*, enquanto a fração de volume foi tratada pelo método *Geo-Reconstruct*. O esquema de diferenciação temporal aplicado foi implícito de primeira ordem. O regime de escoamento considerado foi laminar, e os critérios de convergência foram definidos com um residual de continuidade de 10^{-6} , aplicado tanto para a velocidade no eixo x quanto para a velocidade no eixo y . Além disso, foi utilizado o método de inicialização de canal aberto FLAT (Martins *et al.*, 2022).

A figura 4 apresenta as divisões realizadas para a discretização espacial em cada parte do canal de ondas, com o dispositivo posicionado no final do canal. Como resultado, o número total de volumes finitos retangulares das malhas foi de aproximadamente 60.000. A figura 5 apresenta os detalhes do refinamento da malha gerada, incluindo ampliações de três áreas específicas, bem como as divisões efetuadas em cada seção do canal (Goulart, 2014).

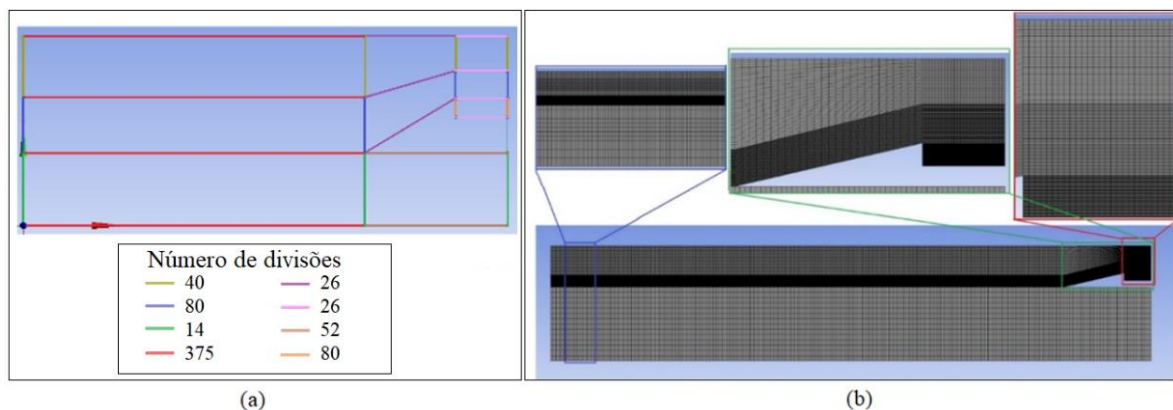


Figura 4: Ilustração (a) das divisões do domínio computacional e (b) dos detalhes do refinamento da malha gerada.

2.5 Linhas de medição

Foram consideradas seis linhas de medição, inseridas no domínio computacional com o intuito de monitorar a elevação da superfície livre no canal e o fluxo de massa de água que entra no reservatório. Essas sondas incluem uma linha vertical no início do canal de onda numérica, denominada L_E ; quatro linhas verticais no interior do reservatório do dispositivo de galgamento, sendo L_1 , L_2 , L_3 e L_4 ; e uma linha de medição horizontal na região superior do reservatório, denominada L_h , conforme mostrado na figura 5.

A linha de monitoramento L_E foi posicionada verticalmente a 10 m da entrada do canal e mede a elevação da superfície livre de água ao longo do tempo. Convém mencionar que as posições das 4 linhas de medição vertical do reservatório, L_1 , L_2 , L_3 e L_4 , são variáveis, dependendo da configuração geométrica do reservatório, sendo utilizadas para monitorar o fluxo de massa. Já a linha de medição L_h que se estende horizontalmente a partir do canto superior da rampa até o final do canal, é responsável por monitorar a vazão volumétrica de água que passa por ela, entrando no reservatório.

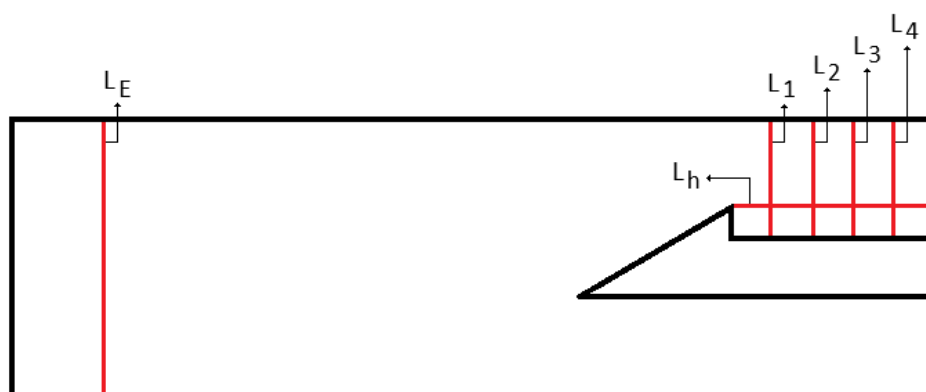


Figura 5: Ilustração das posições das linhas de medição no domínio computacional 2D.

3 VERIFICAÇÕES DO MODELO

3.1 Verificação do modelo numérico de propagação de ondas

Inicialmente foi realizada a verificação da geração da onda, indicada na tabela 1, sem a inclusão do dispositivo de galgamento.

Na figura 6, apresenta-se a comparação entre a elevação da superfície livre da onda simulada numericamente e a solução analítica (adotada como referência). A diferença entre os resultados numéricos e a solução analítica foi calculada utilizando a equação de erro percentual (equação (13)) (Ferziger e Peric, 2002).

$$E = \left[\sum_{n=1}^N |\eta_n^{Ana} - \eta_n^{Num}| \right] \frac{100}{N} \quad (13)$$

onde: η_n^{Ana} representa a elevação analítica, η_n^{Num} representa a elevação obtida na simulação e N é o número total de amostras analisadas.

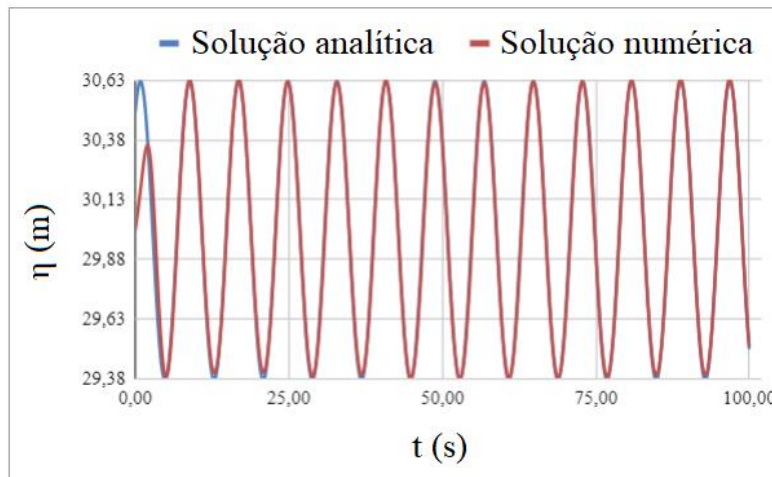


Figura 6: Comparação da elevação da superfície livre entre a solução analítica e a solução numérica.

A análise apresentou uma diferença de 1,17% entre os resultados numéricos e a solução analítica, demonstrando a boa precisão do modelo numérico de propagação de ondas utilizado na simulação.

3.2 Verificação do modelo numérico do princípio de funcionamento do dispositivo de galgamento

Para verificar o princípio operacional do dispositivo de galgamento, foi realizada uma comparação com um caso apresentado em Martins *et al.* (2018) no qual segue às seguintes características: $\lambda = 65,4$ m, $T = 7,5$ s, $H = 1,0$ m, $H_T/L_T = 0,061$, $S = 6,0$ m e $\varphi = 0,012$. A figura 7 mostra uma comparação entre o presente estudo e os resultados de Martins *et al.* (2018).

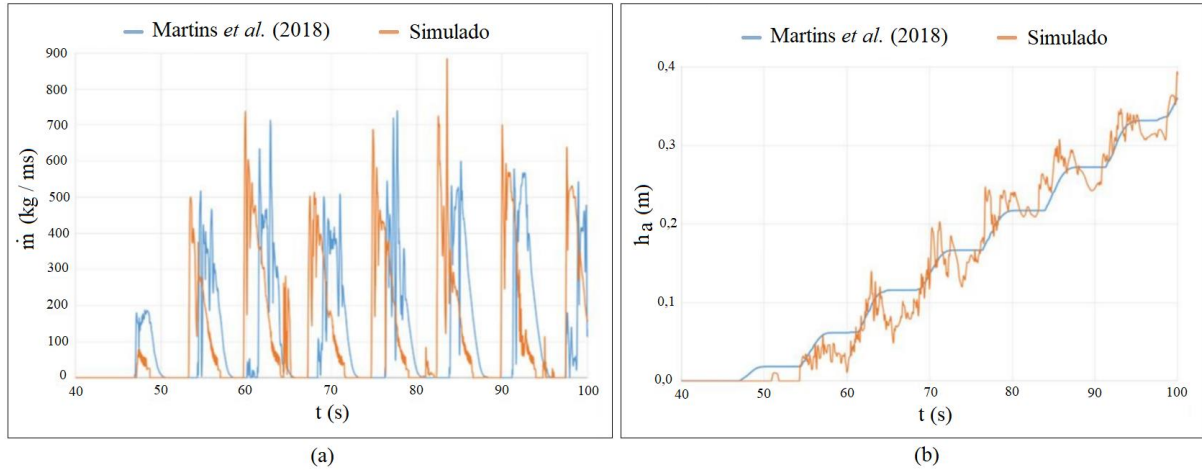


Figura 7: Comparação entre o caso de referência e o simulado: (a) da taxa de fluxo de massa, e (b) do fluxo da água acumulada (h_a) dentro do reservatório.

Para avaliar a diferença obtida nas comparações realizadas nas figuras 7 (a) e 7 (b), foi usada a estratégia RMS (*Root Mean Square*), representada na equação (14) (Marjani *et al.*, 2008):

$$\bar{X} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \bar{X}^2 dt} \quad (14)$$

onde \bar{X} representa uma grandeza genérica, t o tempo, e T o período.

Considerando os resultados da figura 7 e da equação (14), para a vazão mássica, o valor médio RMS obtido no estudo de referência foi 8,76 kg/s, enquanto no presente estudo foi 8,48 kg/s, resultando em uma diferença de $-0,28$ kg/s. Quanto à altura de acúmulo de água no reservatório, o valor RMS no estudo de referência foi 0,14 m, e no presente estudo foi 0,15 m, com uma diferença de 0,01 m. Esses resultados indicam que as diferenças são pequenas, validando o modelo computacional implementado para representar a física do problema.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As profundidades de submersão S_1 (28,5 m) e S_2 (27,5 m) apresentaram valores próximos a zero tanto para a vazão mássica quanto para a quantidade de água acumulada no reservatório. Como resultado, a eficiência também se aproximou de zero, o que indica a ausência de galgamento.

A ausência de galgamento nos casos analisados S_1 (28,5 m) e S_2 (27,5 m) pode ser explicada pela geometria do dispositivo, em especial pela altura da rampa H_1 e pela profundidade de submersão (S_1 e S_2). Em ambos os casos, a altura da rampa H_1 aumenta de 4,71 m a 6,43 m, conforme a abertura do ângulo da rampa varia. O lado direito da equação (5) é constante, $h + (H_5/2) = 30,63$ m. Já o lado esquerdo da equação, para S_1 (28,5 m), varia entre 33,22 m e 34,93 m; e para S_2 (27,5 m), varia de 32,22 m a 33,93 m.

Embora a equação (5) tenha sido satisfeita, o lado esquerdo se torna suficientemente elevado para impedir que as ondas sejam conduzidas ao reservatório do dispositivo. Como consequência, as ondas são refletidas pela superfície inclinada da rampa e retornam ao mar, sem que ocorra o galgamento esperado.

A Figura 8 apresenta três gráficos que comparam as profundidades de submersão S_3 (26,0) m e S_4 (25,5) m em relação à vazão mássica (\dot{m}), à água acumulada no reservatório (h_a) e à eficiência (ε). Observa-se que a curva correspondente a S_4 inicia-se após a de S_3 , com valores para S_4 a partir de $H_1/L_1 = 0,23$, devido à necessidade de satisfazer a equação (5).

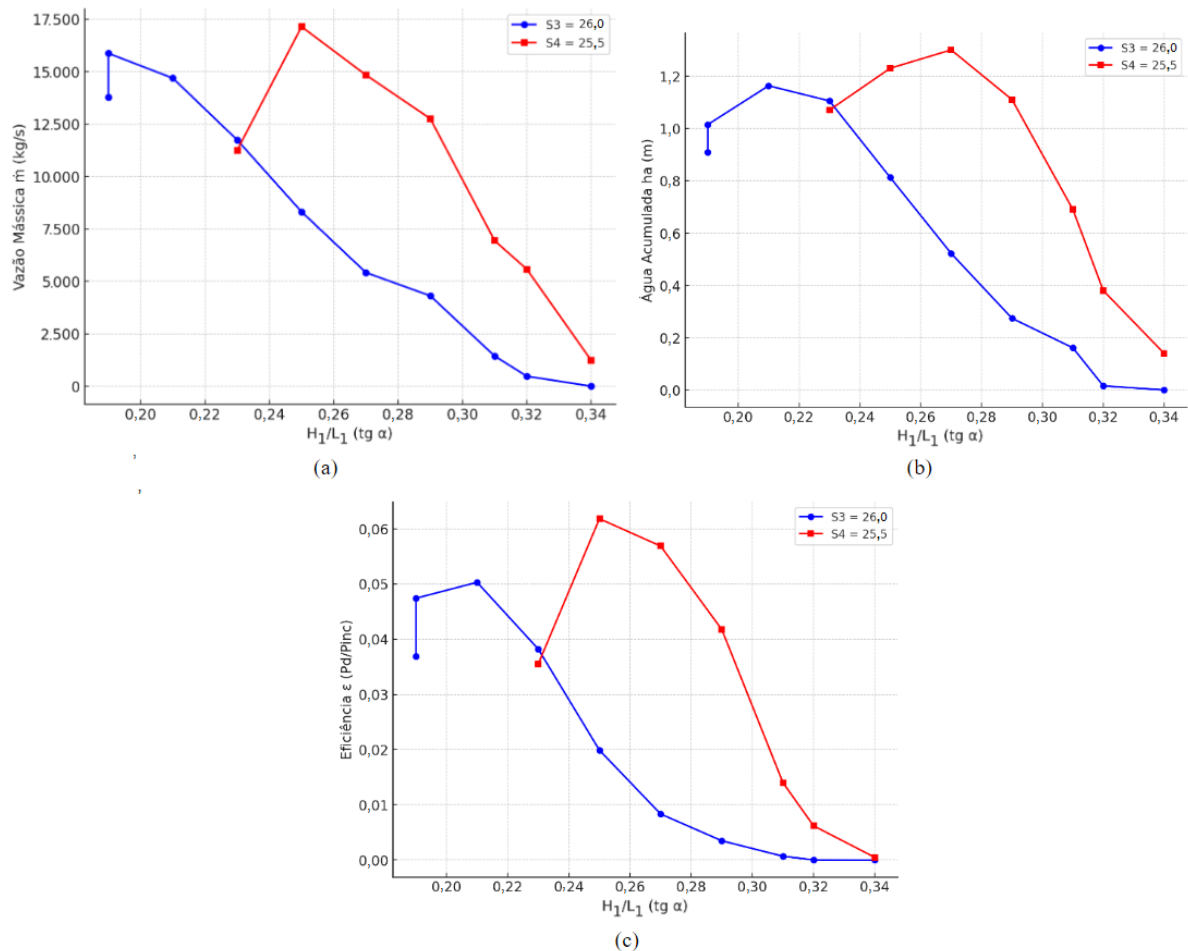


Figura 8: Resultados das curvas referentes as profundidades de submersão S_3 (26,0 m) e S_4 (25,5 m), quanto a: (a) vazão, (b) água acumulada e (c) eficiência.

A figura 8 (a) mostra a quantidade de água que flui para o reservatório conforme a variação de diferentes parâmetros geométricos e operacionais, como o ângulo de inclinação da rampa e a profundidade de submersão do dispositivo. Em geral, quanto menor a profundidade de submersão, maior é a vazão de água, especialmente nos ângulos de inclinação menores. Esse comportamento sugere que o dispositivo opera melhor quando o dispositivo está mais submerso, permitindo um galgamento mais eficiente das ondas. A curva S_4 (25,5 m) apresentou uma vazão maior em relação à curva S_3 (26,0 m), para $H_1/L_1 = 0,25$ em diante, ou seja, de 14° até 19° . E para $H_1/L_1 = 0,23$ as curvas tiveram valores próximos. Isso indica que a profundidade

de submersão $S_4 = 25,50 \text{ m}$ contribui para um aumento na quantidade de água acumulado no reservatório do dispositivo, o que confirma a hipótese de que profundidades menores favorecem o fluxo de água para o reservatório.

O gráfico apresentado na figura 8 (b) mostra a quantidade de água acumulada no reservatório do dispositivo durante a simulação. Observa-se que, em S_4 (25,5 m), a quantidade de água acumulada é significativamente maior em comparação a S_3 (26,0 m), especialmente para $H_1/L_1 = 0,25$ em diante, ou seja, de 14° até 19° . O ponto ótimo de operação, onde a quantidade acumulada é o maior, para S_3 (26,0 m) é $H_1/L_1 = 0,21$ e para S_4 (25,5 m) é $H_1/L_1 = 0,27$, 12° e 15° respectivamente.

A figura 8 (c) apresenta a razão entre a potência disponível e a potência incidente das ondas, ou seja, da eficiência (ε). Verifica-se que, para S_3 (26,0 m), o ponto de maior eficiência ocorre para de $H_1/L_1 = 0,21$, correspondendo ao ângulo de 12° . Aplicando a equação (6), obtém-se um valor decimal de 0,0503, que, ao ser multiplicado por 100, resulta em uma eficiência de 5,03%. Para S_4 (25,5 m), o ponto ótimo de eficiência é atingido para $H_1/L_1 = 0,25$ correspondendo ao ângulo de 14° , onde o valor calculado pela equação (6) é 0,0618, correspondendo a uma eficiência de 6,18%.

Esses resultados indicam que a profundidade de submersão de S_4 (25,5 m) proporciona um desempenho superior ao de S_3 (26,0 m). Nota-se também que conforme o ângulo aumenta além de 16° , a eficiência diminui devido à redução da vazão e do volume de água acumulada. Este comportamento indica que o ajuste fino entre o ângulo de inclinação e a profundidade de submersão é essencial para otimizar a conversão de energia.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa, realizou uma análise numérica e geométrica do comportamento de um dispositivo de galgamento considerando as características das ondas do litoral do Paraná, localizado a 41 km da costa, com altura significativa de $H_s = 1,25 \text{ m}$. Avaliou-se o impacto da profundidade de submersão e do ângulo de inclinação da rampa na eficiência do dispositivo.

A avaliação geométrica foi realizada utilizando o Design Construtal, variando a inclinação da rampa, associado à busca exaustiva, para otimizar a configuração do dispositivo. Para a solução numérica, foram realizadas 37 simulações utilizando o modelo VOF, implementado no ANSYS Fluent, que emprega o método dos volumes finitos.

Os resultados indicaram que as submersões S_1 (28,5 m) e S_2 (27,5 m) tiveram desempenho quase nulo, com pouca vazão e eficiência. A altura excessiva da rampa refletiu as ondas, impedindo que elas transferissem energia suficiente para o reservatório, mesmo com a equação (5) satisfeita. Além disso, conclui-se que a profundidade de submersão e o ângulo de inclinação são parâmetros essenciais para otimizar o desempenho do dispositivo. A profundidade de submersão S_4 (25,5 m), associada a $H_1/L_1 = 0,25$ correspondente ao ângulo de 14° , demonstrou ser a configuração mais eficiente, resultando em uma eficiência de 6,18% e maior vazão.

REFERÊNCIAS

- Bejan, A. (2000). *Shape and structure: From engineering to nature*. Cambridge University Press.
- Bejan, A., e J. Zane. (2012). *Design in nature*. Doubleday.
- Bejan, A., e S. Lorente. (2008). *Design with Constructal Design* (1.ed.). John Wiley e Sons.
- Bejan, A., e S. Lorente. (2013). Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society. *Journal of Applied Physics*, 113(15). <https://doi.org/10.1063/1.4798429>
- Chakrabarti, S. K. (2005). *Handbook of Offshore Engineering*. Elsevier.
- Cruz, J. M. B. P., e A. J. N. A. Sarmiento. (2004). *Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais*. Instituto do Ambiente.
- dos Santos, E. D., B. N. *et al.* (2014). Numerical Study of the Effect of the Relative Depth on the Overtopping Wave Energy Converters According to Constructal Design. *Defect and Diffusion Forum*, 348, 232–244. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.348.232>
- Ferziger, J. H., e M. Peric. (2002). *Computacional Methods for Fluid Dynamics* (3.ed.). Springer.
- Gomes, M. das N. *et al.* (2015). Numerical Approach of the Main Physical Operational Principle of Several Wave Energy Converters: Oscillating Water Column, Overtopping and Submerged Plate. *Defect and Diffusion Forum*, 362, 115–171. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.362.115>
- Gomes, M. N. *et al.* (2018). Avaliação numérica de diferentes formatos geométricos quadriláterais da câmara hidropneumática de conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante submetidos à incidência de ondas regulares. In *Anais do XXI ENMC – Encontro Nacional de Modelagem Computacional e IX ECTM – Encontro de Ciências e Tecnologia de Materiais*. Instituto Federal Fluminense.
- Goulart, M. M. (2014). *Estudo Numérico da Geometria de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real Empregando Constructal Design*. [Dissertação de mestrado]. Universidade Federal do Rio Grande.
- Goulart, M. M. *et al.* (2015). Constructal design of an onshore overtopping device in real scale for two different depths. *Marine Systems e Ocean Technology*, 10(2), 120–129. <https://doi.org/10.1007/s40868-015-0010-7>
- Hinrichs, R. A., M. H. Kleinbach, e L. B. dos Reis. (2014). *Energia e meio ambiente* (5. ed.). Cengage Learning.
- Hirt, C. W., e B. D. Nichols. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201–225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- Iahnke S. L. P. *et al.* (2009). Energia das Ondas do Mar: Modelagem Computacional de um Dispositivo de Galgamento. *VETOR - Revista De Ciências Exatas e Engenharias*, 19, 20–36.

- Liu, Z., B.-S. Hyun, e J. Jin. (2008). Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC. *OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANSKOB.2008.4531009>
- Machado, B. N. (2012). *Modelagem Computacional e Otimização Geométrica de um dispositivo de Galgamento para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica*. [Dissertação de mestrado]. Universidade Federal do Rio Grande.
- Margheritini, L., D. Vicinanza, e P. Frigaard. (2009). SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. *Renewable Energy*, 34(5), 1371–1380. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.09.009>
- Marjani, A. E. *et al.* (2008). Numerical Modeling in Wave Energy Conversion Systems. *Energy*, 33, pp.1246-1256.
- Marouani, I. (2024). Contribution of renewable energy technologies in combating phenomenon of global warming and minimizing GHG emissions. *Clean Energy Science and Technology*, 2(2), 1–164. <https://doi.org/10.18686/cest.v2i2.164>
- Martins, J. C. *et al.* (2018). Geometric evaluation of the main operational principle of an overtopping wave energy converter by means of Constructal Design. *Renewable Energy*, 118, 727–741. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.061>
- Martins, J. C. *et al.* (2022). Constructal Design of an Overtopping Wave Energy Converter Incorporated in a Breakwater. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4), 471. <https://doi.org/10.3390/jmse10040471>
- Musa, M. A. *et al.* (2020). The Influence of Ramp Shape Parameters on Performance of Overtopping Breakwater for Energy Conversion. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), pp.1-875. <https://doi.org/10.3390/jmse8110875>
- Nemes, D., e E. Marone. (2013). Characterization of surface waves on the inner shelf of the Paraná State. *Boletim Paranaense de Geociências*, 12–25.
- Paiva, M. da S. *et al.* (2021). Bibliometric Study Applied to the Overtopping Wave Energy Converter Device. *Sustainable Marine Structures*, 2(1), 35–45. <https://doi.org/10.36956/sms.v2i1.306>
- Peng, Z., e Q.-P. Zou. (2011). Spatial distribution of wave overtopping water behind coastal structures. *Coastal Engineering*, 58(6), 489–498. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.01.010>
- Raghutla, C., e K. R. Chittedi. (2021). Energy poverty and economic development: evidence from BRICS economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(7), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16174-6>
- SANTOS, M. A. dos (org.). (2013). *Fontes de energia nova e renovável* (1. ed.). LTC.
- Todorović, I. *et al.* (2023). Electric energy utilization in modern industrial environments. *Open Research Europe*, 3, 1–4. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.15286.1>
- Tolmasquim M. T. (coord.). (2016). *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Oceânica*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE).
- Zhang, G. *et al.* (2023). Numerical Study on Overtopping Performance of Multi-stage Overtopping Wave Energy Converters. *Proceedings of the European Wave and Tidal Energy Conference*, 15. <https://doi.org/10.36688/ewtec-2023-584>