

# ANÁLISE NUMÉRICA DE UM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR HÍBRIDO G-CAO SUBMETIDO ÀS ONDAS IRREGULARES REALÍSTICAS ENCONTRADAS EM RIO GRANDE – RS

## NUMERICAL ANALYSIS OF AN O-OWC HYBRID WAVE ENERGY CONVERTER SUBJECTED TO REALISTIC IRREGULAR WAVES FOUND IN RIO GRANDE - RS

Maycon da Silveira Paiva<sup>1</sup> 

Ana Paula Giussani Mocellin<sup>2</sup> 

Phelype Haron Oleinik<sup>3</sup> 

Bianca Neves Machado<sup>4</sup> 

Liércio André Isoldi<sup>5</sup> 

**Resumo:** A energia contida nas ondas do mar pode ser convertida em energia elétrica por meio de dispositivos conversores, como o do tipo Galgamento, composto por uma rampa e um reservatório; e o do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), composto por uma câmara hidropneumática e um duto de ar. Buscando extrair ao máximo o potencial energético contido nas ondas do mar, o presente estudo visa analisar o comportamento fluidodinâmico de um dispositivo híbrido, que combina os princípios de conversão de Galgamento e CAO, denominado G-CAO. Para tanto, os conversores do tipo Galgamento e CAO em forma de L (isolados), e o dispositivo híbrido G-CAO, foram submetidos às ondas irregulares realísticas que ocorreram no município de Rio Grande, no estado do Rio Grande do Sul. As simulações numéricas foram realizadas através do software ANSYS Fluent, que se baseia 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. Estudos preliminares foram realizados para ajustar o modelo empregado, obtendo recomendações para a malha e para os parâmetros da solução numérica. Tanto para os dispositivos isolados quanto para o G-CAO, os resultados indicam que alterar o posicionamento do Galgamento no canal afeta seu desempenho; além disso, indicam que geometrias com dutos de entrada mais curtos favorecem o CAO-L.

<sup>1</sup> Mestre em Matemática Aplicada, Universidade Federal do Rio Grande, mayconpaiva@furg.br.

<sup>2</sup> Mestra em Matemática Aplicada, Universidade Federal do Rio Grande, ana.mocellin@furg.br.

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, phelype.oleinik@gmail.com.

<sup>4</sup> Doutora em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, bianca.machado@ufrgs.br.

<sup>5</sup> Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande, liercioisoldi@furg.br.

**Palavras-chave:** Conversor de Energia das Ondas Híbrido. Coluna de Água Oscilante. Galgamento. Metodologia WaveMIMO. Ondas Irregulares Realísticas.

**Abstract:** The energy contained in ocean waves can be converted into electrical energy by means of converter devices, such as the Overtopping type, composed of a ramp and a reservoir; and the Oscillating Water Column (OWC) type, composed of a hydropneumatic chamber and an air duct. Seeking to maximize the extraction of the energy potential contained in ocean waves, the present study aims to analyze the fluid-dynamic behavior of a hybrid device, which combines the conversion principles of Overtopping and OWC, designated as O-OWC. To this end, the Overtopping and L shaped OWC converters (in isolation), and the hybrid O-OWC device, were subjected to the realistic irregular waves that occurred in the municipality of Rio Grande, in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The numerical simulations were performed using ANSYS Fluent software, which is based on the Finite Volume Method and employs the multiphase Volume of Fluid model to treat the interface between water and air. The generation of the irregular waves was achieved through the WaveMIMO methodology. Preliminary studies were conducted to calibrate the model, resulting in recommendations for mesh configuration and numerical solution parameters. For both the isolated devices and the G-CAO, the results indicate that altering the position of the Overtopping device within the channel affects its performance; furthermore, they demonstrate that geometries with shorter water entrance ducts enhance the performance of the L-OWC.

**Keywords:** Hybrid Wave Energy Converter. Oscillating Water Column. Overtopping. WaveMIMO Methodology. Realistic Irregular Waves.

# 1 INTRODUÇÃO

Devido à constante expansão populacional e o conseqüente aumento na demanda por eletricidade, assim como ao enfrentamento dos desafios associados às mudanças climáticas, a utilização de fontes renováveis de energia tornou-se uma necessidade (ØSTERGAARD *et al.*, 2022). Nesse sentido, a energia marinha representa um recurso renovável a ser explorado. De acordo com Pecher e Kofoed (2017), a energia contida nas ondas do mar pode suprir uma parcela significativa da demanda global por energia elétrica.

Uma forma de extrair este tipo de energia é por meio de dispositivos do tipo Galgamento, que utilizam uma rampa para conduzir água a um reservatório, onde são instaladas turbinas hidráulicas de baixa queda que acionam geradores elétricos quando a água retorna ao oceano (PECHER e KOFOED, 2017). Estudos numéricos, como Martins *et al.* (2022), analisaram dispositivos com uma e duas rampas incorporados em quebra-mares; enquanto Paiva *et al.* (2025a) investigaram a influência da razão entre altura e comprimento da rampa no desempenho do dispositivo.

Outra forma de conversão é através do dispositivo do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), que consiste em uma câmara hidropneumática e um duto de ar com turbina e gerador. A oscilação da água no interior da câmara força o ar a escoar pelo duto, acionando a turbina e gerando eletricidade (PECHER e KOFOED, 2017). Estudos como Lopez *et al.* (2021), analisaram quatro configurações de CAO, incluindo os formatos em L e U; enquanto Mocellin *et al.* (2023), avaliaram a influência da razão entre altura e comprimento da câmara hidropneumática do CAO sobre seu desempenho.

Adicionalmente, Koutrouveli *et al.* (2021), apresentaram um conversor de energia das ondas híbrido G-CAO, que integra os princípios físicos de funcionamento dos dispositivos de Galgamento e CAO. Visando contribuir com o avanço no campo da conversão de energia das ondas, o objetivo do presente trabalho consiste em analisar o comportamento fluidodinâmico do dispositivo

híbrido G-CAO e comparar seu desempenho com o obtido pelos dispositivos de Galgamento e CAO-L avaliados de maneira isolada.

Cabe ressaltar que o modelo em forma de L foi adotado porque, ao desconsiderar a rampa e o reservatório do dispositivo G-CAO (referentes ao componente de Galgamento), obtém-se um CAO-L. Nesta configuração, a câmara hidropneumática conta com um duto de entrada de água, responsável por direcionar a energia das ondas incidentes ao seu interior.

Desse modo, os conversores foram submetidos a ondas irregulares baseadas em dados realísticos de estado de mar obtidos próximo aos Molhes da Barra, no município de Rio Grande, no estado do Rio Grande do Sul (RS). Para a geração das ondas irregulares realísticas, empregou-se a metodologia WaveMIMO (MACHADO *et al.*, 2021), que permite a reprodução numérica de ondas como ocorrem na natureza. Ademais, destaca-se que esta metodologia foi validada para a geração e propagação de ondas irregulares em Paiva *et al.* (2025b), onde obtiveram-se recomendações teóricas para sua aplicação.

## 2 Modelagem Matemática e Numérica

Para a execução do estudo, foram realizadas simulações numéricas de geração de ondas irregulares em um canal utilizando o software ANSYS Fluent 2024 R2 (Ansys, 2024); que é um software de fluidodinâmica computacional baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) (HIRT E NICHOLS, 1981), foi empregado para tratar a interface entre as fases, a água e o ar. Essas fases são representadas por meio do conceito de fração volumétrica ( $\alpha$ ), onde a soma das frações em cada volume de controle deve ser unitária. Como duas fases são consideradas, cada célula computacional pode assumir três estados distintos. Seja contendo apenas a fase água, onde:

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

contendo apenas a fase ar, neste caso:

$$\alpha_{\text{ar}} = 1 \quad (2)$$

ou, apresentando a interface entre as duas fases, onde, dada a imiscibilidade dos fluidos, vale que:

$$\alpha_{\text{água}} = 1 - \alpha_{\text{ar}} \quad (3)$$

No modelo VOF, um único conjunto de equações é solucionado. Dessa forma, a fração volumétrica é considerada em todo o domínio computacional por meio da equação de transporte. Conforme descrito por Versteeg e Malalasekera (2007), o modelo é constituído pelas equações da continuidade, transporte da fração volumétrica e quantidade de movimento, respectivamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla(\alpha \vec{V}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \rho(\nabla \vec{V})\vec{V} = -\nabla p + \nabla \dot{\tau} - \rho \vec{g} + S \quad (6)$$

onde,  $\rho$  é a massa específica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ );  $t$  é o tempo (s);  $\vec{V}$  é o vetor velocidade do escoamento (m/s);  $p$  é a pressão estática (Pa);  $\vec{g}$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );  $\dot{\tau}$  é o tensor de deformações (Pa); enquanto  $S$  representa um sumidouro ( $\text{N/m}^2$ ).

Para a verificação do modelo numérico, é empregada a ferramenta de praia numérica, que evita o fenômeno de reflexão das ondas que atingem o final do canal, sendo representada pelo termo  $S$  na Equação (6). A formulação de  $S$  é dada por (PARK *et al.*, 2003; FOYHIRUN *et al.*, 2020):

$$S = - \left[ C_1 \rho V + \frac{1}{2} C_2 \rho |V|V \right] \left( 1 - \frac{z - z_{fs}}{z_b - z_{fs}} \right) \left( \frac{x - x_s}{x_e - x_s} \right)^2 \quad (7)$$

onde,  $C_1$  é o coeficientes de amortecimento linear ( $\text{s}^{-1}$ );  $C_2$  é o coeficiente amortecimento quadrático ( $\text{m}^{-1}$ );  $V$  é o módulo da velocidade do fluido no ponto analisado (m/s);  $x$  e  $z$  são, respectivamente, as coordenadas horizontal e vertical (m);  $x_s$  e  $x_e$  são as posições de início e de fim da praia numérica (m), respectivamente;  $z_{fs}$  a posição vertical da superfície livre (m);  $z_b$  a posição vertical do fundo (m) do canal. Em concordância com as recomendações obtidas em Lisboa *et al.* (2017), os coeficientes  $C_1$  e  $C_2$  foram definidos, respectivamente, como  $20 \text{ s}^{-1}$  e  $0 \text{ m}^{-1}$ .

Quanto à configuração numérica empregada para resolver o equacionamento do problema, tem-se: o esquema PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), para o acoplamento pressão-velocidade; o esquema PRESTO (*PREssure STaggering Option*), para discretização espacial para a equação da pressão; o método *upwind* de primeira ordem, para o tratamento dos termos advectivos; e o método *geo-reconstruction*, para a representação das fases nos volumes. Destaca-se que a escolha de tais métodos e configurações numéricas se baseia em metodologias utilizadas em Machado *et al.* (2021); Martins *et al.* (2022); Mocellin *et al.* (2023); e Paiva *et al.* (2025a).

Visando garantir a estabilidade e convergência das simulações, os parâmetros *pre-sweeps* e *post-sweeps* do solucionador *Algebraic Multigrid* (AMG) foram investigados em um estudo preliminar (descrito posteriormente na Seção 4.2).

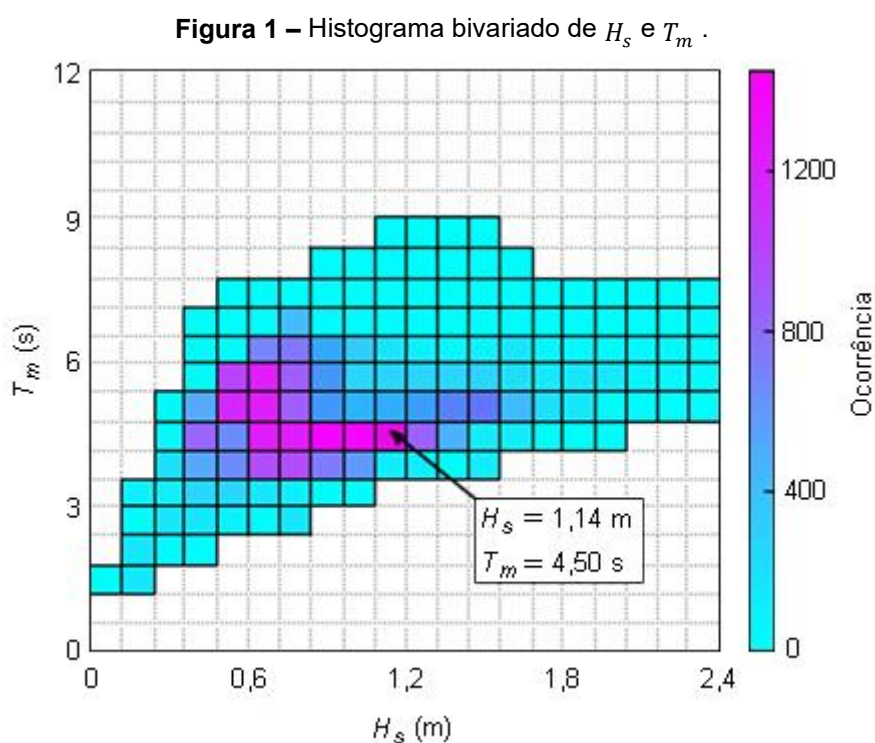
## 2.1 Geração das Ondas Irregulares Realísticas

A geração das ondas irregulares realísticas no ANSYS Fluent ocorre através da imposição dos perfis orbitais discretizados da velocidade de propagação da onda nas direções horizontal ( $u$ ) e vertical ( $w$ ) como condição de contorno. Para tanto, é utilizada a metodologia WaveMIMO (MACHADO *et al.*, 2021), que consiste em tratar dados realísticos de estado de mar e aplica-los como condição de velocidade prescrita. No presente estudo, estes dados são oriundos do modelo espectral TOMAWAC, que os obtém resolvendo a equação da conservação da ação de onda, que descreve a propagação de ondas em meios não estacionários e não homogêneos, dada por (Awk, 2017):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{x}N)}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{z}N)}{\partial z} + \frac{\partial(\dot{K}_x N)}{\partial K_x} + \frac{\partial(\dot{K}_z N)}{\partial K_z} = Q(K_x, K_z, x, z, t) \quad (8)$$

onde,  $N$  representa o espectro direcional de densidade de ação das ondas ( $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{rad}$ );  $k_x$  a componente em  $x$  do vetor número de onda ( $\text{m}^{-1}$ );  $k_z$  a componente em  $z$  do vetor número de onda ( $\text{m}^{-1}$ ); e  $Q$  representa o termo de fonte ( $\text{m}^2/\text{rad}$ ).

Os dados realísticos considerados no presente estudo são referentes ao ponto localizado a 171,06 m do quebra-mar Molhes da Barra, no município de Rio Grande – RS (32°11'24" S, 52°04'45" O). Estes dados correspondem à altura significativa ( $H_s$ ) e ao período médio ( $T_m$ ) das ondas registradas nessa região ao longo do ano de 2018. Nesse sentido, a Figura 1 apresenta o histograma bivariado que correlaciona as ocorrências de  $H_s$  e  $T_m$ , identificando a combinação mais frequente, que, no presente estudo corresponde à ocorrida no dia 11 de setembro de 2018, das 07:15 às 07:30.



Então, um espectro de ondas com estas características é selecionado a partir do banco de dados gerado no TOMAWAC e transformado em uma série temporal de elevações da superfície livre. Para tanto, utiliza-se o software Spec2Wave, que emprega a Transformada Inversa de Fourier nesta conversão (maiores detalhes a respeito do procedimento podem ser obtidos em Oleinik *et al.*, 2021). Assim, é possível aproximar os dados espectrais por uma soma finita de ondas monocromáticas, as elevações da superfície livre ( $\eta$ ) causadas por essas ondas são descritas, individualmente, por (McCORMICK, 2010):

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (9)$$

Desse modo, ainda por meio do Spec2Wave, pode-se decompor a série temporal de elevação da superfície livre irregular em perfis de velocidade orbital horizontal ( $u$ ) e vertical ( $w$ ), que variam de acordo com a profundidade. Estes perfis são, então, aplicados como condições de contorno de velocidade prescrita no ANSYS Fluent, permitindo a simulação das ondas irregulares realísticas em um canal de ondas numérico. Os perfis  $u$  e  $w$  associados a cada  $\eta$  são dados, respectivamente, por (McCORMICK, 2010):

$$u = \frac{H}{2} g k \frac{\cosh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (10)$$

$$w = \frac{H}{2} g k \frac{\sinh(kz + kh)}{\omega \sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (11)$$

onde,  $H$  é a altura de onda (m), representando  $H_s$ ; enquanto  $\omega$  é a frequência angular (Hz) e  $k$  é o número de onda ( $m^{-1}$ ), dados respectivamente por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (12)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (13)$$

onde,  $T$  é o período de onda (s), representando  $T_m$ ; e  $\lambda$  é o comprimento de onda (m), calculado através da relação da dispersão (McCORMICK, 2010):

$$\omega^2 = g k \tanh(kh) \quad (14)$$

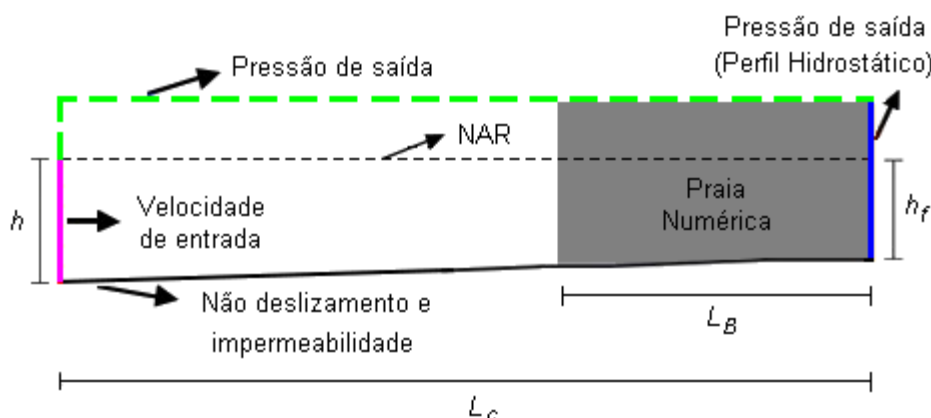
Desse modo, as características que definem as ondas regulares representativas deste estado de mar são: altura,  $H = 1,14$  m; período  $t = 4,50$  s; comprimento,  $\lambda = 31,50$  m; e profundidade,  $h = 13,29$  m. Estas características são, posteriormente, utilizadas para a discretização espacial e temporal do domínio computacional.

### 3 DESCRIÇÃO DOS CASOS

Para a verificação do modelo numérico, foram geradas ondas em um canal sem a presença dos dispositivos. O canal possui comprimento  $L_c = 171,06$  m e

profundidade que varia de  $h = 13,29$  m, no começo do canal, até  $h_f = 10,54$  m, no final do mesmo, reproduzindo a batimetria presente na região dos Molhes da Barra, como recomendado por Mocellin *et al.* (2023). A Figura 2 ilustra o domínio computacional, onde são destacadas as condições de contorno empregadas, além da região da praia numérica, que possui comprimento equivalente a  $2\lambda$ , conforme indicado por Lisboa *et al.* (2017).

**Figura 2** – Domínio computacional empregado para verificação do modelo numérico.



**Fonte:** os autores.

É importante destacar que o domínio computacional foi configurado para a aplicação da metodologia WaveMIMO assim como em Paiva *et al.* (2025b), de modo que a região de imposição da velocidade de entrada foi discretizada em 15 segmentos. Para a discretização espacial, foi empregada a malha *stretched* (GOMES *et al.*, 2018), aplicando um maior refino no centro da região da superfície livre como indicado em Paiva *et al.* (2025b). Quanto à discretização temporal, foi empregado um passo de tempo de  $\Delta t = 0,0375$  s, que corresponde à  $T_m/120$  (PAIVA *et al.*, 2025b), para um total de 300 s de simulação.

Para a análise dos resultados, a elevação da superfície livre das ondas foi monitorada por uma sonda localizada na zona de geração das ondas,  $x = 0$  m. Os resultados foram comparados com os dados realísticos provenientes do TOMAWAC por meio das métricas *Mean Absolute Error* (MAE) e *Root Mean Square Error* (RMSE) (CHAI e DRAXLER, 2024):

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^M O_i - P_i \quad (15)$$

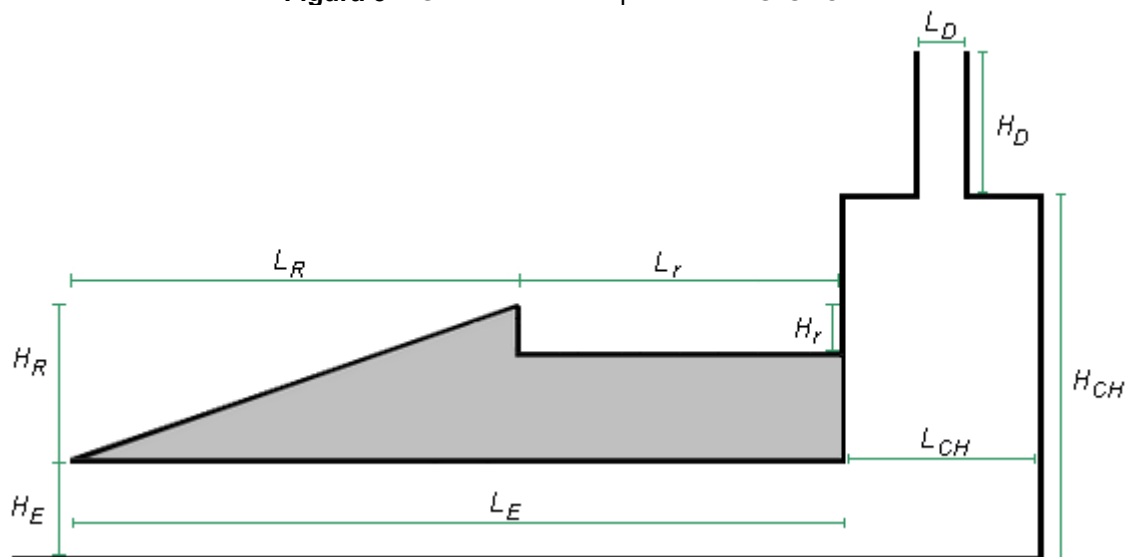
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^M (O_i - P_i)^2} \quad (16)$$

onde,  $O_i$  representa o valor obtido no ANSYS Fluent (m);  $P_i$  corresponde ao valor de referência; e  $n$  indica a quantidade total de dados.

### 3.1 Análise dos Conversores de Energia das Ondas

O objeto de estudo do presente trabalho consiste em um conversor de energia das ondas do mar híbrido G-CAO, como apresentado em Koutrouveli *et al.* (2021). Este dispositivo é composto por uma rampa de Galgamento acoplada a um CAO-L, como ilustrado na Figura 3, que apresenta suas características geométricas. Destaca-se que as características dos componentes do G-CAO se referem às mesmas consideradas para os conversores do tipo Galgamento e CAO-L analisados de maneira isolada.

**Figura 3** – Geometria do dispositivo de G-CAO.



Fonte: os autores.

Quanto às dimensões do componente de Galgamento, adotaram-se as do caso ótimo encontrado por Paiva *et al.* (2025a), mantendo constantes: altura da rampa,  $H_R = 6,86$  m; comprimento da rampa,  $L_R = 22,87$  m; e profundidade de submersão,  $S_G = 4,05$  m; altura do reservatório,  $H_r = 1,00$  m. Para a avaliação do dispositivo de Galgamento, o comprimento do reservatório foi reduzido, variando também a posição do conversor no canal de ondas. Ou seja, quanto menor o reservatório, mais ao fundo do canal o dispositivo é posicionado. As dimensões adotadas para o comprimento ( $L_r$ ) do reservatório e a posição inicial da rampa ( $x_R$ ) estão detalhadas na Tabela 1.

**Tabela 1** – Variação geométrica do dispositivo de Galgamento isolado.

<b>Caso</b>	<b><math>L_r</math> (m)</b>	<b><math>x_R</math> (m)</b>
1 <sub>G</sub>	20,00	128,19
2 <sub>G</sub>	15,00	133,19
3 <sub>G</sub>	10,00	138,19
4 <sub>G</sub>	5,00	143,19

**Fonte:** os autores.

No que tange às dimensões do componente de CAO-L, têm-se: a câmara hidropneumática, com comprimento,  $L_{CH} = 8,00$  m; e altura,  $H_{CH} = 15,50$  m; o duto da turbina, com comprimento,  $L_D = 2,00$  m; e altura,  $H_D = 4,00$  m; duto de entrada de água, com altura,  $H_E = 4,05$  m. Na avaliação geométrica do CAO-L isolado, o comprimento do duto de entrada de água ( $L_E$ ) variou de acordo com a variação do tamanho do reservatório do dispositivo de Galgamento:

$$L_E = L_R + L_r \quad (17)$$

Os valores de  $L_E$  adotados em cada caso são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** – Variação geométrica do duto de entrada do dispositivo CAO-L isolado.

<b>Caso</b>	<b><math>H_E</math> (m)</b>	<b><math>L_E</math> (m)</b>
1 <sub>C</sub>	4,05	42,87
2 <sub>C</sub>	4,05	37,87
3 <sub>C</sub>	4,05	32,87
4 <sub>C</sub>	4,05	27,87

**Fonte:** os autores.

Por fim, para o dispositivo híbrido, foram adotadas quatro configurações geométricas, correspondentes ao acoplamento das geometrias dos dispositivos

de Galgamento e CAO-L avaliadas individualmente. A Tabela 3 apresenta as características geométricas que foram variadas no dispositivo G-CAO, assim como a posição de início de sua rampa. Com essa abordagem buscou-se definir a melhor geometria para o dispositivo híbrido, além de estabelecer comparativos diretos com o desempenho dos conversores analisados de forma isolada.

**Tabela 3** – Variação geométrica do dispositivo híbrido G-CAO.

Caso	$L_r$ (m)	$L_E$ (m)	$x_R$ (m)
1 <sub>H</sub>	20,00	42,87	120,19
2 <sub>H</sub>	15,00	37,87	125,19
3 <sub>H</sub>	10,00	32,87	130,19
4 <sub>H</sub>	5,00	27,87	135,19

Fonte: os autores.

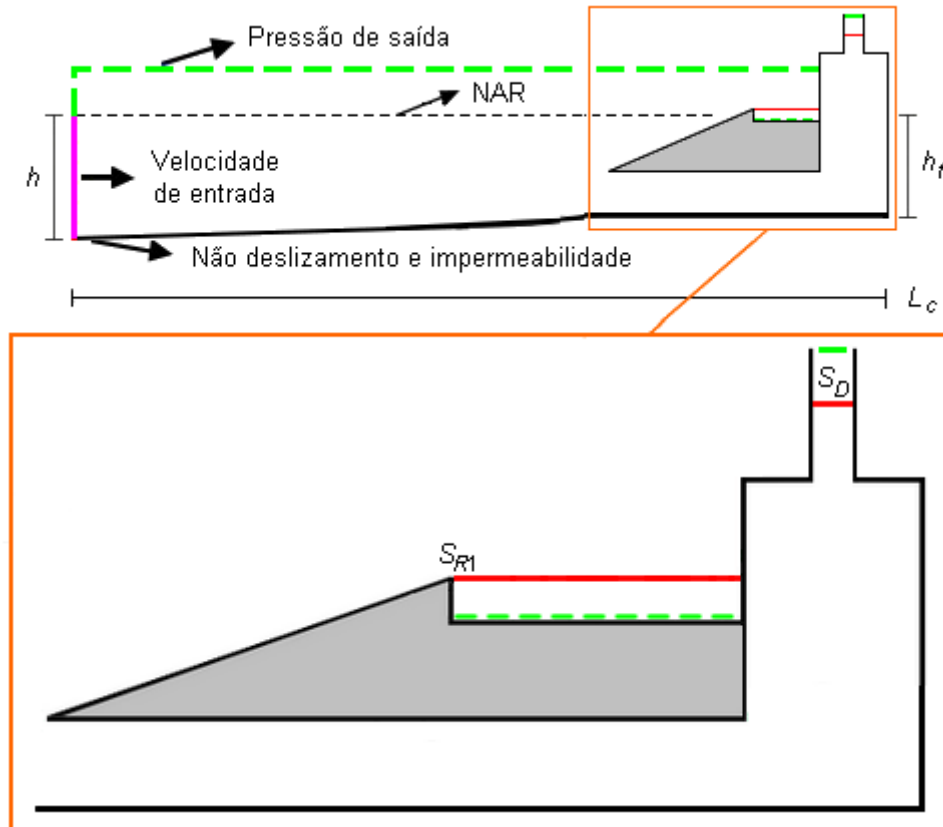
Para a análise numérica do comportamento fluidodinâmico dos conversores sob a incidência das ondas irregulares realísticas, o domínio computacional foi configurado sem a região de praia numérica, com os dispositivos acoplados ao final do canal. A Figura 4 ilustra o domínio computacional utilizado para avaliar o dispositivo híbrido, destacando suas principais cotas geométricas. Destaca-se que a condição de contorno de pressão atmosférica (linha verde) foi aplicada no fundo do reservatório do dispositivo de Galgamento, evitando o acúmulo de água, como em Koutrouveli *et al.* (2021) e Paiva *et al.* (2025a); assim como na saída do duto da turbina, permitindo o escoamento do ar.

Conforme ilustrado na Figura 4, os resultados foram obtidos por sondas posicionadas na entrada do reservatório do dispositivo de Galgamento ( $S_{R1}$ ), visando monitorar a vazão mássica de água ( $\dot{M}_{\acute{a}gua}$ ) ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) que adentrou o mesmo; e no centro do duto da turbina do CAO-L ( $S_D$ ), para monitorar a pressão ( $p$ ) e a vazão mássica do ar ( $\dot{M}_{ar}$ ). Desse modo, o desempenho do dispositivo de Galgamento foi definido pelo total de massa de água ( $M_{\acute{a}gua}$ ) (kg) que adentrou o reservatório; enquanto, para o conversor do tipo CAO-L, considerou-se a potência hidropneumática disponível ( $P_H$ ), conforme Gomes *et al.* (2018):

$$P_H = \left( p + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{M}_{ar}}{\rho_{ar}} \quad (18)$$

onde,  $P_H$  é a potência hidropneumática disponível (W);  $v_{ar}$  é a velocidade do ar (m/s); e  $\dot{M}_{ar}$  é a vazão mássica do ar (kg/m<sup>3</sup>). O desempenho dos componentes do dispositivo G-CAO foi determinado de acordo com os respectivos conversores do tipo Galgamento e CAO-L analisados isoladamente.

**Figura 4** – Domínio computacional empregado na análise do dispositivo G-CAO.



**Fonte:** os autores.

No que diz respeito à discretização espacial do domínio computacional, foi empregada a malha *stretched* (GOMES *et al.*, 2018) para o canal de ondas. No entanto, buscando garantir a convergência das simulações, foi realizado um estudo para definir a configuração de malha aplicada na região dos conversores de energia das ondas (descrito a seguir, na Seção 4.1).

## 4 ESTUDOS PRELIMINARES

### 4.1 Qualidade de Malha na Região dos Conversores

O estudo de qualidade de malha realizado tem como foco principal o dispositivo de Galgamento isolado. Ao empregar o passo de tempo recomendado em Paiva *et al.* (2025b) para a geração de ondas irregulares realísticas por meio da metodologia WaveMIMO ( $T_m/120$ ), as simulações iniciais com este conversor apresentaram divergência numérica. Destaca-se que em Paiva *et al.* (2025a), onde o dispositivo de Galgamento foi submetido à incidência de ondas irregulares realísticas, o passo de tempo utilizado foi de  $\Delta t = T_m/450$ , o que acarreta um aumento expressivo no tempo de processamento demandado. Este comportamento instável indica uma possível dependência dos resultados em relação à discretização espacial, justificando a investigação.

Desse modo, partindo da malha empregada em Paiva *et al.* (2025a), foram testadas diferentes configurações de refino. A Tabela 4 apresenta as dimensões horizontais ( $\Delta x$ ) das células computacionais aplicadas em cada região, assim como o intervalo de convergência das simulações. Ressalta-se que o  $\Delta x$  indicado na região do reservatório corresponde também à dimensão vertical, pois foram consideradas células computacionais quadradas. Adicionalmente, nestas simulações, considerou-se a geometria do dispositivo de Galgamento com  $L_r = 20,00$  m.

**Tabela 4** – Configurações de malha avaliadas.

Configuração	Rampa - $\Delta x$ (m)	Reservatório - $\Delta x$ (m)	Intervalo de Convergência (s)
Paiva <i>et al.</i> (2025a)	0,05	0,05	$0 \leq t \leq 61,46$
1	0,07	0,05	$0 \leq t \leq 61,46$
2	0,09	0,05	$0 \leq t \leq 47,33$
3	0,10	0,05	$0 \leq t \leq 124,72$
4	0,10	0,10	$0 \leq t \leq 94,50$
5	0,20	0,10	$0 \leq t \leq 300,00$

**Fonte:** os autores.

Como observado na Tabela 4, a Configuração 5 foi a única que garantiu a convergência da solução numérica durante todo o tempo simulado. Nesta

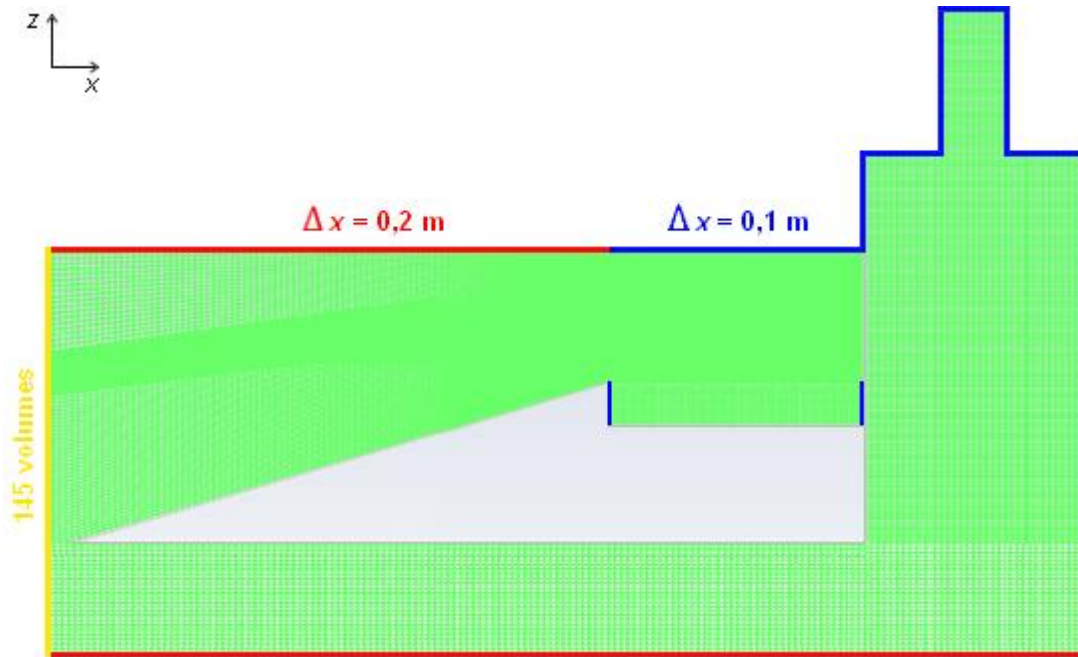
configuração, a região da rampa deve funcionar como uma região de transição entre a malha mais grosseira, no restante do canal de ondas, para a malha mais refinada, na região do reservatório. Essa abordagem se assemelha ao indicado por Martins *et al.* (2022) para a discretização espacial do domínio computacional na região do dispositivo de Galgamento.

Quanto à região referente ao dispositivo CAO-L, a recomendação para sua discretização espacial consiste em células computacionais quadradas de lado  $\Delta x = 0,01$  m (GOMES *et al.*, 2018; MOCELLIN *et al.*, 2023). Entretanto, nos referidos estudos, não há a presença do duto de entrada de água, característico do CAO-L.

Durante as simulações iniciais do dispositivo G-CAO, observou-se divergência numérica instantânea, ou seja, no primeiro passo de tempo. Desse modo, constatou-se a necessidade de discretizar a região do duto de entrada de água com células computacionais de lado  $\Delta x = 0,02$  m. Essa configuração garante uma transição de mesma magnitude acima e abaixo da rampa do dispositivo em relação à discretização espacial empregada no restante do canal de ondas.

A Figura 5 apresenta em detalhe a configuração de malha adotada na região do dispositivo G-CAO. As 145 células computacionais que chegam à região do conversor pela esquerda, referem-se à malha *stretched* recomendada em Paiva *et al.* (2025b) para a geração de ondas irregulares realísticas por meio da metodologia WaveMIMO. É importante enfatizar que, quando analisados de maneira isolada, cada componente do dispositivo híbrido (Galgamento e CAO) manteve sua respectiva discretização espacial adotada no modelo hibridizado.

**Figura 5** – Discretização espacial adotada, com foco na região do dispositivo G-CAO.



Fonte: os autores.

## 4.2 Solucionador *Algebraic Multigrid* (AMG)

Após definir a discretização espacial do domínio computacional, investigou-se os controles algébricos da solução numérica, responsáveis pelo solucionador AMG. Este estudo buscou assegurar maior estabilidade na convergência das simulações, pois as alterações geométricas realizadas nos conversores de energia das ondas acarretaram, novamente, erro de ponto flutuante, indicando divergência no solucionador AMG (ANSYS, 2024).

No software ANSYS Fluent, é possível modificar os controles avançados da solução, como os *pre-sweeps*, que representam o número de relaxações realizadas antes de se transferir o problema para um nível de malha mais grosseiro; e os *post-sweeps*, o número de relaxações realizadas após interpolar a correção de volta para o nível de malha mais fino (ANSYS, 2024).

Em resumo, estes parâmetros suavizam os erros numéricos dentro de um ciclo do solucionador AMG. Por padrão do software ANSYS Fluent, o AMG é definido com 0 *pre-sweeps* e 1 *post-sweep*, sendo recomendado no manual do usuário

que esta configuração seja alterada caso necessário para melhorar a convergência das simulações (ANSYS, 2024).

Deste modo, foram realizados testes alternando o número de *pre-sweeps* e *post-sweeps* utilizados, partindo da configuração padrão do software ANSYS Fluent. A Tabela 5 apresenta as configurações paramétricas avaliadas, junto com o intervalo de convergência registrado em cada caso. Para esta análise, foi considerado o dispositivo de Galgamento isolado com  $L_r = 5,00$  m.

**Tabela 5** – Variação de parâmetros do solucionador AMG.

<i>Pre-Sweep</i>	<i>Post-Sweep</i>	Intervalo de Convergência (s)
0	1	$0 \leq t \leq 216,60$
0	2	$0 \leq t \leq 216,60$
0	3	$0 \leq t \leq 216,60$
1	1	$0 \leq t \leq 52,12$
1	2	$0 \leq t \leq 227,59$
1	3	$0 \leq t \leq 98,48$
2	1	$0 \leq t \leq 110,44$
2	2	$0 \leq t \leq 300,00$
2	3	$0 \leq t \leq 98,59$
3	1	$0 \leq t \leq 90,56$
3	2	$0 \leq t \leq 98,44$
3	3	$0 \leq t \leq 197,89$

**Fonte:** os autores.

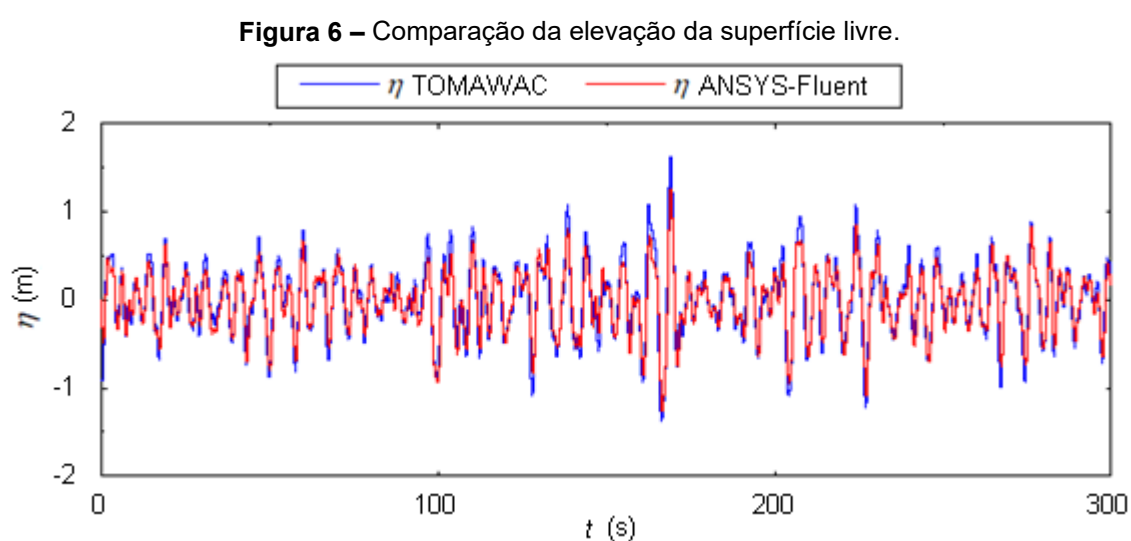
Conforme observado na Tabela 5, a configuração com 2 *pre-sweeps* e 2 *post-sweeps* foi a única que possibilitou simulações da geração e propagação de ondas por 300 s. Todas as demais configurações acarretaram divergência numérica. Além disso, notou-se a ausência de uma relação direta entre o aumento dos *sweeps* e do intervalo de convergência, evidenciando a dependência de uma combinação específica de parâmetros. Isso ressalta a necessidade de uma investigação paramétrica como a que foi realizada. Portanto, indica-se que estes testes sejam reproduzidos caso seja necessário lidar com divergência numérica em problemas distintos.

A adaptação dos parâmetros do AMG foi necessária para garantir a estabilidade e convergência das simulações com ondas irregulares realísticas incidindo sobre os dispositivos de Galgamento isolado e o híbrido G-CAO. Contudo, foi também

considerada nos casos com o CAO-L isolado, preservando a coerência do modelo numérico empregado.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os primeiros resultados a serem apresentados referem-se à verificação do modelo numérico empregado. Nesse sentido, a Figura 6 apresenta uma comparação qualitativa entre a série de ondas irregulares realísticas geradas pela metodologia WaveMIMO e a série temporal proveniente do modelo espectral TOMAWAC ao longo dos 300 s simulados.



Como observou-se na Figura 6, o estado de mar ocorrido em Rio Grande foi reproduzido de maneira adequada. Quantitativamente, obteve-se  $MAE = 0,1026$  m e  $RMSE = 0,1297$  m, indicando resultados concordantes com a literatura, como em Paiva *et al.* (2025a). Desse modo, foi possível verificar o modelo numérico empregado.

A seguir, os resultados referentes aos dispositivo de Galgamento isolado são apresentados na Tabela 6. Junto ao total de massa de água que adentrou o reservatório ( $M_{\text{água}}$ ), também se apresenta as diferenças relativas ( $D_R$ ) encontrada entre o desempenho das geometrias, onde cada caso foi comparado com aquele localizado na linha imediatamente acima na tabela.

**Tabela 6** – Resultados referentes ao dispositivo de Galgamento isolado.

<b>Caso</b>	<b><math>M_{\acute{a}gua}</math> (kg)</b>	<b><math>D_R</math> (%)</b>
1 <sub>G</sub>	75.887,35	–
2 <sub>G</sub>	75.624,29	-0,35
3 <sub>G</sub>	77.649,52	+2,69
4 <sub>G</sub>	75.196,38	-3,16

**Fonte:** os autores.

Conforme a Tabela 6 mostra, houve pouca variação no total de  $M_{\acute{a}gua}$  capturada pelo reservatório, mantendo os resultados relativamente estáveis, como esperado. Nota-se que os valores de  $D_R$  não exibem um comportamento puramente crescente ou decrescente, indicando a necessidade de uma análise mais detalhada para investigar se o posicionamento do conversor no canal afeta seu desempenho. Este tipo de análise é particularmente importante para compreender o comportamento fluidodinâmico do Galgamento sujeito às ondas irregulares realísticas, pois, estas ondas não incidem de maneira uniforme sobre o dispositivo, como acontece com ondas regulares.

Como já mencionado, ao alterar o comprimento do reservatório, a posição de início da rampa no canal de ondas ( $x_R$ ) também foi alterada. Nesse sentido, esperava-se que, ao deslocar o conversor para o fundo do canal (como nos casos 3<sub>G</sub> e 4<sub>G</sub>), o desempenho do dispositivo de Galgamento fosse afetado negativamente, visto que estaria recebendo uma menor quantidade de ondas. Entretanto, não foi isso o que ocorreu, pois o caso de melhor desempenho foi o 3<sub>G</sub>, aquele onde  $x_R = 130,19$  m.

Dando continuidade à análise do comportamento fluidodinâmico dos conversores de energia das ondas do mar, na Tabela 7 são apresentados os resultados referentes ao CAO-L isolado. Nesse sentido, além da potência hidropneumática ( $P_H$ ) obtida em cada caso avaliado, também se apresenta a  $D_R$  encontrada entre as geometrias.

Na Tabela 7, nota-se uma relação inversamente proporcional entre a dimensão de  $L_E$  e a  $P_H$  obtida. Desse modo, a geometria com o duto mais curto (4<sub>C</sub>)

apresentou o melhor desempenho, enquanto a com o duto mais comprido ( $1_C$ ) foi o pior caso analisado.

**Tabela 7** – Resultados referentes ao dispositivo CAO-L isolado.

<b>Caso</b>	<b><math>P_H</math> (W)</b>	<b><math>D_R</math> (%)</b>
$1_C$	572,25	–
$2_C$	835,89	+46,07
$3_C$	953,25	+14,04
$4_C$	1.276,31	+33,89

**Fonte:** os autores.

Cabe mencionar que a baixa magnitude dos valores obtidos para a  $P_H$  se deve ao fato que as configurações geométricas avaliadas para o CAO-L no presente estudo mantiveram a altura do duto de entrada de água fixa em  $H_E = 4,05$  m. Com isso, a abertura da câmara hidropneumática encontra-se muito abaixo da região da superfície livre, tornando-se difícil que a energia das ondas incidente consiga adentrar a câmara para produzir energia elétrica.

No que diz respeito ao dispositivo híbrido G-CAO, a Tabela 8 apresenta os resultados referentes aos componentes de Galgamento ( $M_{\text{água}}$ ) e CAO-L ( $P_H$ ), junto à  $D_R$  calculada para os resultados de cada geometria.

**Tabela 8** – Resultados referentes ao dispositivo CAO-L isolado.

<b>Caso</b>	<b><math>M_{\text{água}}</math> (kg)</b>	<b><math>D_R</math> (%)</b>	<b><math>P_H</math> (W)</b>	<b><math>D_R</math> (%)</b>
$1_H$	77.462,21	–	515,39	–
$2_H$	77.773,11	+0,40	505,93	-1,84
$3_H$	75.780,95	-2,56	611,39	+20,85
$4_H$	75.887,35	+0,14	827,02	+35,27

**Fonte:** os autores.

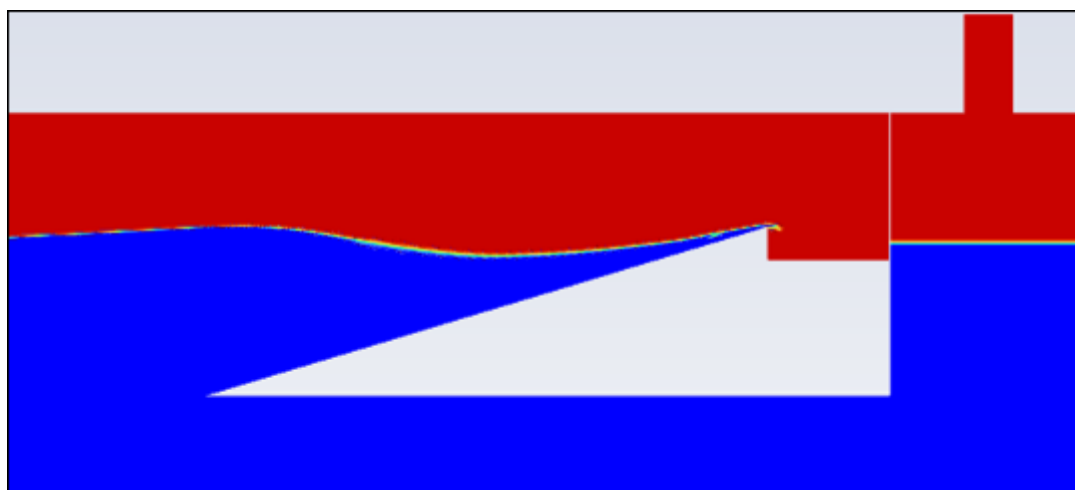
Na Tabela 8, nota-se que o componente de Galgamento do G-CAO apresenta desempenho semelhante ao obtido pelo dispositivo de Galgamento isolado (ver Tabela 6), com valores baixos para as  $D_R$ . Entretanto, nota-se que o efeito da variação geométrica afetou de maneira diferente o modelo isolado e o G-CAO, vide os sinais de  $D_R$  nas Tabelas 6 e 8. Cabe destacar que a posição do início das rampas ( $x_R$ ) das geometrias do Galgamento isolado não estão alinhadas com as do G-CAO, devido à presença da câmara hidropneumática. Como antes, as variações em  $M_{\text{água}}$  podem ser atribuídas, em parte, às mudanças no

posicionamento do dispositivo dentro do canal, causadas pela alteração no comprimento do reservatório.

No que se refere ao componente de CAO-L do dispositivo híbrido, os resultados não indicaram uma relação direta entre o aumento de  $P_H$  e a redução de  $L_E$ , como evidenciado pela oscilação negativa da  $D_R$  na configuração  $2_H$ . Apesar disso, a geometria com o menor duto de entrada de água também foi a que obteve a maior  $P_H$  entre as geometrias do G-CAO. Entretanto, quando comparado ao CAO-L isolado, o componente no híbrido teve seu desempenho reduzido de maneira significativa, indicando que a hibridização o afeta negativamente.

Visando ilustrar o fenômeno físico reproduzido numericamente, a Figura 7 apresenta o retrato de fases, sendo o ar representado em vermelho, e a água em azul. Desse modo, na Figura 7 observa-se o instante final da simulação com o dispositivo híbrido  $4_H$ , em  $t = 300$  s, onde há uma onda incidindo sobre o conversor. Nota-se que, apesar desta configuração híbrida ser a de melhor desempenho em relação ao componente de CAO-L, não há oscilações aparentes no interior da câmara hidropneumática.

**Figura 7** – Retrato de fases do instante final da simulação do dispositivo híbrido G-CAO.



**Fonte:** os autores.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo consistiu em analisar o comportamento fluidodinâmico dos dispositivos conversores de energia das ondas do mar do tipo Galgamento e CAO-L isolados; e do híbrido G-CAO, que combina ambos os princípios de conversão (KOUTROUVELI *et al.*, 2021). Para tanto, a metodologia WaveMIMO (MACHADO *et al.*, 2021) foi empregada na geração das ondas irregulares realísticas, simulando as condições encontradas na costa do município de Rio Grande, no Rio Grande do Sul.

Antes de analisar o comportamento fluidodinâmico dos conversores de energia das ondas do mar, foram realizados estudos preliminares para ajustar o modelo numérico empregado. Assim, obteve-se uma recomendação de malha para o dispositivo G-CAO e de calibração dos parâmetros *pre-sweeps* e *post-sweeps*. Os ajustes realizados através dos estudos preliminares foram essenciais para garantir a convergência das simulações considerando o passo de tempo recomendado em Paiva *et al.* (2025b) para a metodologia WaveMIMO, que corresponde à  $T_m/120$ .

Quanto à análise dos conversores, observou-se que a quantidade de água no reservatório ( $M_{\text{água}}$ ) variou tanto para o dispositivo de Galgamento isolado, quanto para o G-CAO, apesar da única alteração na geometria ser o comprimento do reservatório ( $L_r$ ) o que, conseqüentemente, afetou no posicionamento do conversor no canal. No que diz respeito ao dispositivo CAO-L, de modo geral, identificou-se que geometrias com dutos de entrada de água mais curto (menor  $L_E$ ) oferecem um melhor desempenho (maior  $P_H$ ), tanto de maneira isolada, quanto hibridizada.

Ademais, é importante destacar que o componente de Galgamento do G-CAO manteve desempenho semelhante ao do dispositivo isolado, enquanto o componente do CAO-L teve seu desempenho substancialmente reduzido. Estes resultados indicam a necessidade de se investigar outras configurações para o dispositivo híbrido, buscando maximizar, em especial, a  $P_H$  obtida.

Desse modo, quanto a estudos futuros, recomenda-se a investigação da geometria do CAO-L por meio do Design Construtal, visando avaliar a influência da razão entre altura e comprimento do duto de entrada de água ( $H_E/L_E$ ) sobre seu desempenho. Além disso, sugere-se a análise do comportamento fluidodinâmico dos dispositivos considerando o clima de ondas encontrado em outros locais, a fim de aprofundar o entendimento a respeito dos mesmos, em especial do dispositivo híbrido G-CAO, ainda pouco explorado.

## AGRADECIMENTOS

M. S. P. e A. P. G. M. e agradecem, respectivamente, à CAPES (Código de Financiamento 001) e ao CNPq por suas bolsas de doutorado. L. A. I. agradece ao CNPq pela bolsa PQ1D (processo: 309648/2021-1) e à FAPERGS pelo suporte financeiro - Edital PqG (processo: 21/2551-0002231-0). B. N. M. agradece pelo suporte financeiro do programa institucional de auxílio à pesquisa de docentes recém-contratados pela UFRGS.

## REFERÊNCIAS

- AIRY, G. B. **Tides and Waves**. Londres: Encyclopædia Metropolitana, 1845.
- ANSYS. **ANSYS-FLUENT User's Guide, Release 2024 R1**. Canonsburg, PA, USA: ANSYS Inc., 2024.
- AWK, T. **TOMAWAC User Manual Version 7.2. 7.2.3**. The Telemac-Mascaret Consortium, 2017.
- Chai, T.; Draxler, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature, **Geoscientific Model Development**, v. 7, p. 1247–1250, 2014. DOI: 10.5194/gmd-7-1247-2014.
- FOYHIRUN, C.; KOSITGITIWONG, D.; EKKAWATPANIT, C. Wave Energy Potential and Simulation on the Andaman Sea Coast of Thailand. **Sustainability**, v. 12, n. 9, p. 3657, 2020. DOI: 10.3390/su12093657.
- GOMES, M. N.; LORENZINI, G.; ROCHA, L. A. O.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. Constructal Design Applied to the Geometric Evaluation of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter Considering Different Real Scale Wave Periods, **Journal of Engineering Thermophysics**, v. 27, pp. 173–190, 2018. DOI: 10.1134/S1810232818020042.

HIRT, C.; NICHOLS, B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, **Journal of Computational Physics**, v. 39, 1981. doi: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.

KOUTROUVELI, T. I.; DI LAURO, E.; DAS NEVES, L.; CALHEIROS-CABRAL, T.; ROSA-SANTOS, P.; TAVEIRA-PINTO, F. Proof of concept of a breakwater-integrated hybrid wave energy converter using a composite modelling approach, **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 2, p. 226, 2021. DOI: 10.3390/jmse9020226.

LISBOA, R. C., TEIXEIRA, P. R., DIDIER, E. Regular and Irregular wave propagation analysis in a flume with numerical beach using a Navier-stokes based model, **Defect Diffusion Forum**, v. 372, p. 81–90, 2017. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ddf.372.81.

LÓPEZ, I.; CARBALLO, R.; FOUZ; D. M.; IGLESIAS, G. Design Selection and Geometry in OWC Wave Energy Converters for Performance, **Energies**, v. 14, n. 6, p. 1707, 2021. DOI: 10.3390/en14061707.

MACHADO, B. N.; OLEINIK, P. H.; KIRINUS, E. P.; DOS SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O.; GOMES, M. N.; CONDE, J. M. P.; ISOLDI, L. A. WaveMIMO methodology: numerical wave generation of a realistic sea state, **Journal of Applied and Computational Mechanics**, v. 7, p. 2129–2148, 2021. DOI: 10.22055/jacm.2021.37617.3051.

MARTINS, J. C.; FRAGASSA, C.; GOULART, M. M.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; GOMES, M. N.; ROCHA, L. A. O. Constructal Design of an Overtopping Wave Energy Converter Incorporated in a Breakwater, **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 4, p. 471, 2022. DOI: 10.3390/jmse10040471.

MCCORMICK, M. E. **Ocean Engineering Mechanics: with Applications**. New York: Cambridge University Press, 2010.

MOCELLIN, A. P. G.; MACIEL, R. P.; OLEINIK P. H.; DOS SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O.; ZIEBELL, J. S.; ISOLDI, L. A.; MACHADO, B. N. Geometrical Analysis of an Oscillating Water Column Converter Device Considering Realistic Irregular Wave Generation with Bathymetry. **Journal of Experimental and Theoretical Analyses**, v. 1, n. 1, p. 24–43, 2023. DOI: 10.3390/jeta1010003.

OLEINIK, P. H.; TAVARES, G. P.; MACHADO, B. N.; ISOLDI, L. A. Transformation of Water Wave Spectra into Time Series of Surface Elevation, **Earth**, v. 2, n. 4, pp. 997–1005, 2021. DOI: 10.3390/earth2040059.

ØSTERGAARD, P. A.; DUIC, N.; NOOROLLAHI, Y.; KALOGIROU, S. Renewable energy for sustainable development. **Renewable Energy**, v. 199, p. 1145–1152, 2022. DOI: 10.1016/j.renene.2022.09.065.

PAIVA, M. S.; MOCELLIN, A. P. G.; OLEINIK, P. H.; DOS SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O.; ISOLDI, L. A.; MACHADO, B. N. Geometrical Evaluation of an Overtopping Wave Energy Converter Device Subject to Realistic Irregular Waves

and Representative Regular Waves of the Sea State That Occurred in Rio Grande—RS. **Processes**, v. 13, n. 2, p. 335, 2025a. DOI: 10.3390/pr13020335.

PAIVA, M. S.; MOCELLIN, A. P. G.; OLEINIK, P. H.; DOS SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O.; ISOLDI, L. A.; MACHADO, B. N. Theoretical Recommendations and Validation for the Generation of Realistic Irregular Waves Through the WaveMIMO Methodology. **Processes**, v. 13, 1395, 2025b. DOI: 10.3390/pr13051395

PARK, J. C.; KIM, M. H.; MIYATA, H.; CHUN, H. H. Fully nonlinear numerical wave tank (NWT) simulations and wave run-up prediction around 3-D structures. **Ocean Engineering**, v. 30, p. 1969-1996, 2003. DOI: 10.1016/S0029-8018(03)00041-6.

PECHER, A.; KOFOED, J. **Handbook of Ocean Wave Energy**. Berlin: Springer Nature, 2017, ISBN: 978-3-319-39889-1.

VERSTEEG, H. K. E MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method**, 2<sup>a</sup> ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007, ISBN: 978-0-13-127498-3.