



Geração de ondas irregulares realísticas através da metodologia WaveMIMO: um estudo de caso para avaliação de parâmetros

Generating realistic irregular waves using the WaveMIMO methodology: a case study to evaluate parameters

Maycon da Silveira Paiva¹

 <https://orcid.org/0000-0003-0773-9433>  <http://lattes.cnpq.br/8699294705809202>

Ana Paula Giussani Mocellin²

 <https://orcid.org/0000-0002-2645-6941>  <http://lattes.cnpq.br/8381848463167131>

Phelype Haron Oleinik³

 <https://orcid.org/0000-0002-4290-9971>  <http://lattes.cnpq.br/5323185982889744>

Elizaldo Domingues dos Santos⁴

 <https://orcid.org/0000-0003-4566-2350>  <http://lattes.cnpq.br/6854950768271660>

Luiz Alberto Oliveira Rocha⁵

 <https://orcid.org/0000-0003-2409-3152>  <http://lattes.cnpq.br/2535324018884724>

Liércio André Isoldi⁶

 <https://orcid.org/0000-0002-9337-3169>  <http://lattes.cnpq.br/3761060945802171>

Bianca Neves Machado⁷

 <https://orcid.org/0000-0002-2573-2895>  <http://lattes.cnpq.br/1703205767967772>

ENGENHARIAS

RESUMO

Dentre as diversas fontes renováveis de energia que podem ser exploradas, têm-se a energia contida nas ondas do mar. A metodologia WaveMIMO é utilizada para a geração numérica de ondas irregulares baseadas em estados de mar realísticos e consiste em tratar dados espectrais para a obtenção de perfis de velocidade orbital de propagação das ondas, que são impostos como condição de contorno (CC) em um canal de ondas numérico. Nesse sentido, o presente estudo avalia parâmetros para a aplicação desta metodologia, onde se investigou a discretização da região de imposição da CC de velocidade prescrita, a sensibilidade de malha

¹ Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande/RS – Brasil. E-mail: mayconpaiva@furg.br

² E-mail: ana.mocellin@furg.br

³ E-mail: phelype.oleinik@gmail.com

⁴ E-mail: elizaldosantos@furg.br

⁵ E-mail: luizrocha@furg.br

⁶ E-mail: liercioisoldi@furg.br

⁷ E-mail: bianca.machado@ufrgs.br



na região da superfície livre, o passo de tempo empregado e, por fim, a localização do vetor de velocidades em cada segmento da região de imposição da CC de velocidade prescrita. Para tanto, foram considerados dados realísticos referentes a um ponto próximo à costa do município de Mostardas, no estado do Rio Grande do Sul, obtidos do modelo espectral TOMAWAC. Os resultados indicaram que, comparando o melhor e o pior caso avaliado, obteve-se melhorias de 6,58% e 7,60% nas métricas consideradas nas avaliações dos resultados.

Palavras-chave: ondas irregulares realísticas; metodologia WaveMIMO; Fluent; TOMAWAC; dinâmica dos fluidos computacional.

ABSTRACT

Among the various renewable energy sources that can be explored, there is the energy contained in sea waves. The WaveMIMO methodology is used for the numerical generation of irregular waves based on realistic sea states and consists of processing spectral data to obtain orbital velocity profiles of wave propagation, which are imposed as a boundary condition (BC) in a numerical wave channel. In this sense, this study evaluates parameters for the application of this methodology, investigating the discretization of the prescribed velocity BC imposition region, the mesh sensitivity in the free surface region, the time step used and, finally, the location of the velocity vector in each segment of the prescribed velocity BC imposition region. Therefore, realistic data were considered from a point close to the coast of the municipality of Mostardas, in the state of Rio Grande do Sul, obtained from the spectral model TOMAWAC. Results indicated that, comparing the best and worst case evaluated, improvements of 6.58% and 7.60% were obtained in the metrics considered when evaluating the results.

Keywords: realistic irregular waves; WaveMIMO methodology; Fluent; TOMAWAC; computational fluid dynamics.

1. INTRODUÇÃO

Conforme apontado por Adesanya *et al.* (2022, p. 37), as pegadas ambientais negativas associadas à geração de energia por meio de combustíveis fósseis, aliada à perspectiva de esgotamento das reservas destes combustíveis, motivam que países explorem e integrem recursos renováveis em suas matrizes elétricas. No Brasil, segundo a Empresa de Pesquisa Energética no Balanço Energético Nacional de 2023 (EPE, 2023, p. 13), os recursos renováveis representam cerca de 88,0% da matriz elétrica, no entanto, grande parte deste montante concentra-se no setor hidrelétrico, que é responsável por 61,9%, indicando a necessidade de se buscar outras fontes renováveis de energia.

De acordo com Narula (2018, p. 163-164), os oceanos podem contribuir para o fornecimento de energia, uma vez que são grandes fontes renováveis de energia, ainda, destaca que a energia renovável marinha (ERM) pode ser convertida por meio de diferentes princípios. Uma das formas de ERM trata-se da energia contida nas ondas do mar, que tem sido um tema de interesse global no campo de energia renovável. De fato, diversos estudos foram realizados buscando avaliar e quantificar o potencial energético disponível em diferentes países, como Hemer *et al.* (2017) para a Austrália, Gonçalves *et al.* (2018) para a França, Ribal *et al.* (2020) para a Indonésia, entre outros. Quanto ao Brasil, que possui uma costa com mais de 9.000 km de comprimento, de acordo com Espindola e Araújo (2017, p.15), o potencial energético



anual encontrado é de aproximadamente 90 GW, sendo a região sul do país a que possui maior potência média de onda, com 20,63 kW/m.

O meio de se extrair a energia contida nas ondas do mar é através de dispositivos conversores, que são utilizados para transformar a energia cinética em eletricidade. Estes dispositivos vêm sendo estudados tanto no campo experimental, em modelos de laboratório ou protótipos reais, quanto no campo numérico, através da Matemática Aplicada e Computacional, que é empregada a fim de reproduzir o princípio físico de funcionamento destes equipamentos.

No que diz respeito aos estudos numéricos, estes são performados simulando a propagação de ondas em um canal de ondas que, por sua vez, incidem sobre os dispositivos acionando seus respectivos princípios de funcionamento. Nesse sentido, a metodologia WaveMIMO, apresentada e verificada em Machado *et al.* (2021), possibilita a geração de ondas irregulares baseadas em dados realísticos de estado de mar, que são tratados a fim de se obter dados discretos transientes de velocidades da propagação das ondas, que são impostos como condição de contorno (CC) de velocidade prescrita, permitindo a reprodução do fenômeno como ocorre na natureza. Ainda, destaca-se que em Maciel *et al.* (2021), a metodologia WaveMIMO foi verificada e validada para a geração de ondas regulares através da comparação dos resultados obtidos numericamente com resultados experimentais.

De fato, a metodologia WaveMIMO vem sendo utilizada em estudos que avaliam o comportamento fluidodinâmico de conversores de energia das ondas, como em Koch *et al.* (2021), onde a potência hidropneumática disponível obtida em um dispositivo do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) sob a incidência de ondas irregulares realísticas, referentes ao município de Rio Grande, foi comparada com a potência obtida sob a incidência de ondas regulares representativas do mesmo estado de mar. Outro exemplo pode ser observado em Mocellin *et al.* (2023), onde os autores realizaram a otimização geométrica de um dispositivo CAO, avaliando a relação entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática do conversor, considerando ondas irregulares realísticas encontradas no município de Tramandaí. Ainda, a metodologia foi empregada em Maciel *et al.* (2021), onde foram realizadas simulações numéricas de geração de ondas regulares incidindo sobre o dispositivo CAO em escala de laboratório, os resultados obtidos foram comparados com aqueles provenientes de estudos experimentais.

Nesse sentido, visando contribuir com o aperfeiçoamento da metodologia e, portanto, com as investigações a respeito da conversão da energia contida nas ondas do mar em energia elétrica, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo de caso avaliando parâmetros do processo necessário para a execução da metodologia WaveMIMO. Para tanto, são realizados estudos sobre a geração numérica de ondas irregulares realísticas baseadas no estado de mar encontrado no município de Mostardas, no estado do Rio Grande do Sul (RS).



2. MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA

Para a execução do presente estudo, foram realizadas simulações numéricas de geração e propagação de ondas irregulares realísticas em um canal de ondas através do Fluent, que é um *software* de dinâmica de fluidos computacional baseado no Método dos Volumes Finitos. Visando tratar adequadamente a interface entre as fases, que são a água e o ar, o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), proposto por Hirt e Nichols (1981, p. 204-206), foi empregado.

Nesse sentido, para a representação das fases consideradas na modelagem computacional do canal de ondas, é necessário compreender o conceito de fração volumétrica (α). Cabe ressaltar que a soma das fases em cada volume de controle deve ser sempre unitária, desse modo, considerando as fases abordadas, cada célula computacional pode apresentar três diferentes estados, ou seja, contendo apenas água, onde:

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

contendo apenas de ar, onde:

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

ou, contendo a interface entre ambas as fases, neste caso:

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

Ainda, como o VOF é utilizado em fluidos imiscíveis, ou seja, que não se misturam, vale que:

$$\alpha_{\text{água}} = 1 - \alpha_{\text{ar}} \quad (4)$$

Ademais, destaca-se que ao utilizar o modelo VOF, um único conjunto de equações é resolvido, sendo composto pelas equações de conservação de massa, de fração volumétrica e de quantidade de movimento. Segundo Versteeg e Malalasekera (2007, p. 10-11), a taxa de aumento de massa no elemento (T_1) é igual à taxa líquida de fluxo de massa no elemento (T_2), que são dadas, respectivamente, por:

$$T_1 = \frac{\partial(\rho)}{\partial t} \Delta x \Delta z \quad (5)$$

$$T_2 = \left[\frac{-\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] \Delta x \Delta z \quad (6)$$

onde ρ é a massa específica do fluido ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), calculada por (Srinivasan *et al.*, 2011, p. 3713):

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + (1 - \alpha_{\text{água}}) \rho_{\text{ar}} \quad (7)$$

enquanto t é o tempo (s), u e w são as velocidades de escoamento ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) nas direções horizontal (x) e vertical (z) do sistema de coordenadas (m), que compõe o vetor de velocidades \vec{V} . Assim, igualando as equações 5 e 6, realizando uma



manipulação algébrica para substituir \vec{V} e anular os termos simétricos ($\Delta x \Delta z$), tem-se a equação de conservação de massa, dada por:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (8)$$

De forma análoga, substituindo ρ por α na Eq. 8, obtém-se a equação de conservação de fração volumétrica, pois, a função obedece a forma de uma equação de transporte (Srinivasan *et al.*, 2011, p. 3713):

$$\frac{\partial(\alpha)}{\partial t} + \nabla(\alpha \vec{V}) = 0 \quad (9)$$

Por fim, quanto à equação de conservação de quantidade de movimento, a segunda Lei de Newton afirma que a taxa de variação da quantidade de movimento de uma partícula de fluido (T_3) é igual à soma das forças sobre a partícula (T_4), descritas respectivamente por (Versteeg; Malalasekera, 2007, p. 14-15):

$$T_3 = \rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\nabla \vec{V}) \vec{V} \right] \quad (10)$$

$$T_4 = -\nabla p + \nabla \dot{t} - \rho \vec{g} + S \quad (11)$$

Destaca-se que, no presente estudo, um termo sumidouro (S) é adicionado na Eq. 11 e refere-se à ferramenta de praia numérica, que atribui um perfil dissipativo à região do canal de ondas onde é aplicada. Essa ferramenta é utilizada a fim de se evitar o efeito de reflexão das ondas que atingem a parede final do canal de ondas, e é dada por (Lisboa *et al.*, 2017, p. 82):

$$S = - \left[C_1 \rho V + \frac{1}{2} C_2 \rho |V| V \right] \left(1 - \frac{z - z_{fs}}{z_b - z_{fs}} \right) \left(\frac{x - x_s}{x_e - x_s} \right)^2 \quad (12)$$

onde C_1 e C_2 são, respectivamente, os coeficientes de amortecimento linear (s^{-1}) e quadrático (m^{-1}), V é o módulo da velocidade do fluido no ponto analisado ($m \cdot s^{-1}$), z_{fs} e z_b são, respectivamente, as posições verticais da superfície livre (SL) e do fundo (m), enquanto x_s e x_e são, respectivamente, as posições de início e de fim da praia numérica (m). Por fim, destaca-se que os coeficientes de amortecimento, C_1 e C_2 , são definidos, respectivamente, como $20 s^{-1}$ e $0 m^{-1}$, seguindo as indicações de Lisboa *et al.* (2017, p. 86).

Desse modo, igualando as equações 10 e 11, têm-se a equação de conservação de quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \rho(\nabla \vec{V}) \vec{V} = -\nabla p + \nabla \dot{t} - \rho \vec{g} + S \quad (13)$$

onde p é a pressão estática ($N \cdot m^{-2}$), \vec{g} é a aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$) e \dot{t} é o tensor de deformações ($N \cdot m^{-2}$), dado por:



$$\dot{\tau} = \begin{bmatrix} 2\mu \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma(\nabla \vec{V}) & \mu(\nabla \vec{V}) \\ \mu(\nabla \vec{V}) & 2\mu \frac{\partial w}{\partial t} + \gamma(\nabla \vec{V}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

onde, γ é uma viscosidade que relaciona as tensões com a deformação volumétrica ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), considerada nula no presente estudo, por abordar um escoamento incompressível, e μ é a viscosidade dinâmica ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), calculada por (Srinivasan et al., 2011, p. 3713):

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + (1 - \alpha_{\text{água}}) \mu_{\text{ar}} \quad (15)$$

2.1. MÉTODOS NUMÉRICOS EMPREGADOS

Para a execução das simulações numéricas no software Fluent, são selecionadas configurações para a solução do equacionamento envolvido no problema, que corresponde às equações 8, 9 e 13. Nesse sentido, para a solução do acoplamento pressão-velocidade, empregou-se o esquema *Pressure-Implicit with Splitting of Operators* (PISO) e, quanto à discretização espacial para a equação da pressão, o esquema *PREssure STaggering Option* (PRESTO) foi utilizado.

Por fim, estes e os demais métodos numéricos empregados são apresentados na Tabela 1. Ainda, cabe ressaltar, que os procedimentos numéricos adotados foram adaptados a partir da metodologia utilizada em estudos anteriores, como em Machado et al. (2021, p. 2132), Maciel et al. (2021, p. 9) e Mocelling et al. (2023, p. 27).

Tabela 1 – Métodos Numéricos Empregados.

Parâmetros	Método Numérico	
Solver	Pressure-Based	
Acoplamento Pressão-Velocidade	PISO	
Discretização Espacial	Avaliação de Gradiente	Green-Gauss-Cell-Based
	Pressão	PRESTO
	Quantidade de Movimento	Upwind de Primeira Ordem
	Fração Volumétrica	Geo-Reconstruction
Esquema de Discretização Temporal	Implícito de Primeira Ordem	
Fatores de sub-relaxação	Pressão	0,3
	Quantidade de Movimento	0,7
Resíduos	Conservação de Massa	
	Velocidade em x	10^{-3}
	Velocidade em z	
Regime do Escoamento	Laminar	

Fonte: elaborada pelos autores.



3. METODOLOGIA WAVEMIMO

De modo geral, a metodologia WaveMIMO consiste em gerar ondas, numericamente, através da imposição de perfis discretizados da velocidade de propagação da onda nas direções horizontal (u) e vertical (w) como condições de contorno de velocidade prescrita. Nessa metodologia, a fim de se obter esses perfis, dados realísticos de estado de mar são tratados por meio do software Spec2Wave (Oleinik *et al.*, 2021; Oleinik, 2022).

Destaca-se que os dados realísticos abordados no presente estudo são oriundos do modelo espectral *TELEMAC-based Operational Model Addressing Wave Action Computation* (TOMAWAC). Neste modelo, os dados são obtidos a partir da solução da equação que representa a situação geral da propagação de ondas em um meio instável e não homogêneo, dada por (Awk, 2017, p. 9):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{x}N)}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{z}N)}{\partial z} + \frac{\partial(\dot{k}_x N)}{\partial k_x} + \frac{\partial(\dot{k}_z N)}{\partial k_z} = Q(k_x, k_z, x, z, t) \quad (16)$$

onde N é o espectro direcional de densidade de ação das ondas ($\text{m}^2 \cdot \text{Hz}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$), k_x e k_z representam, respectivamente, as componentes em x e z do vetor número de onda (m^{-1}), e Q é o termo fonte ($\text{m}^2 \cdot \text{rad}^{-1}$).

Após os dados de estado de mar serem obtidos, o espectro de ondas é transformado em uma série temporal de elevações da SL através do software Spec2Wave, que emprega o procedimento proposto por Oleinik *et al.* (2021), utilizando a Transformada Inversa de Fourier. Deste modo, é possível aproximar os dados espectrais por uma soma finita de ondas monocromáticas, descritas individualmente, segundo a Teoria de Onda Linear de Airy, por (McCormick, 2010, p. 52):

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) \quad (17)$$

cujo potencial de velocidades associado é dado por (McCormick, 2010, p.52):

$$\phi = -A \frac{g}{\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (18)$$

assim, os perfis de velocidades orbitais de propagação das ondas, que são obtidos a partir das derivadas parciais nas direções horizontal (u) e vertical (w), são dados, respectivamente, por (McCormick, 2010, p. 59):

$$u = Agk \frac{\cosh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (19)$$

$$w = Agk \frac{\sinh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (20)$$

onde A é a amplitude da onda (m), k o número de onda (m^{-1}), dado por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (21)$$



onde λ é o comprimento da onda (m), h a profundidade (m), ω a frequência angular (Hz), dada por:

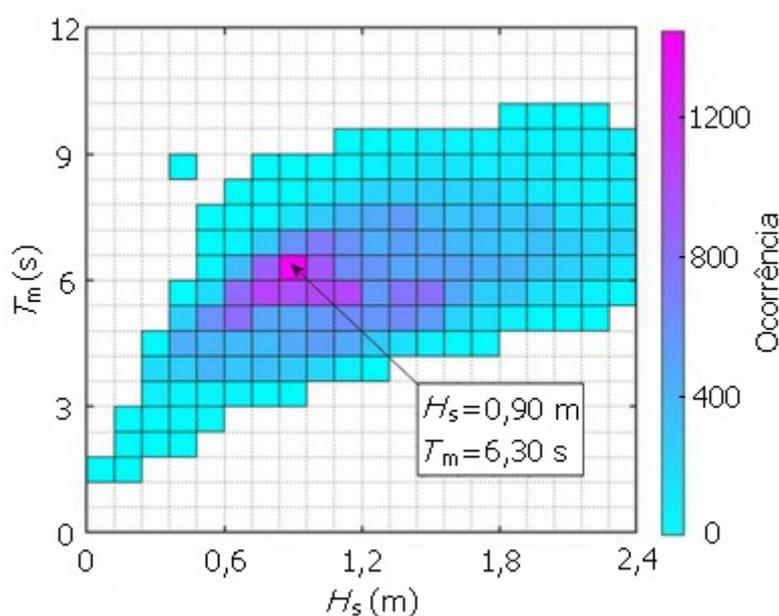
$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (22)$$

onde T é o período da onda (s).

3.1. DADOS REALÍSTICOS DE ESTADO DE MAR

Por fim, como mencionado, os dados realísticos do estado de mar abordados neste estudo se referem à localização de coordenadas geográficas 31°09'51" S, 50°47'27" W, situada há cerca de 2 km da costa do município de Mostardas. Assim, os dados realísticos de altura significativa (H_s) e de período médio (T_m) referentes ao ponto selecionado foram analisados, a fim de determinar o estado de mar mais frequente no local. Desse modo, na Figura 1 é apresentado o histograma bivariado que relaciona a ocorrência de combinações entre H_s e T_m e aponta a mais frequente, que, no presente estudo corresponde à ocorrida no dia 24 de maio de 2018, das 7 h 55 min às 8 h 15 min.

Figura 1 - Histograma de recorrência de ondas relacionando H_s e T_m .



Fonte: elaborada pelos autores.

Utilizando essas características e a profundidade do local analisado, é possível estabelecer as ondas regulares representativas desse estado de mar que, no presente estudo, são utilizadas tanto para definir a discretização espacial quanto à discretização temporal do domínio computacional. Desse modo, a última característica a ser determinada é o comprimento de onda (λ), que é calculado por meio da equação da dispersão (McCormick, 2010, p. 52):

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (23)$$



Finalmente, as características das ondas regulares representativas desse estado de mar são apresentadas na Tabela 2. Ainda, destaca-se que, neste estudo, h é a profundidade encontrada no local do ponto selecionado para o estudo.

Tabela 2 - Características das ondas regulares representativas do estado de mar de Mostardas.

Característica	Nomenclatura	Dimensão
Altura	H_s (m)	0,90
Comprimento	λ (m)	54,45
Período	T_m (s)	6,30
Profundidade	h (m)	11,89

Fonte: elaborada pelos autores.

4. DESCRIÇÃO DOS CASOS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS APLICADOS

A importância de aperfeiçoar a metodologia WaveMIMO reside no fato de que umas das possíveis aplicações desta metodologia é a geração de ondas irregulares realísticas, ou seja, ondas que melhor representam o fenômeno físico que ocorre na natureza. Nesse sentido, foram realizados quatro estudos de geração de ondas irregulares realísticas, onde os resultados dos estudos anteriores foram considerados no estudo seguinte. Desse modo, foram realizadas investigações acerca da:

- Discretização da região de imposição da CC de velocidade prescrita;
- Sensibilidade de malha na região da SL;
- Independência de passo de tempo; e
- Localização do vetor de velocidades.

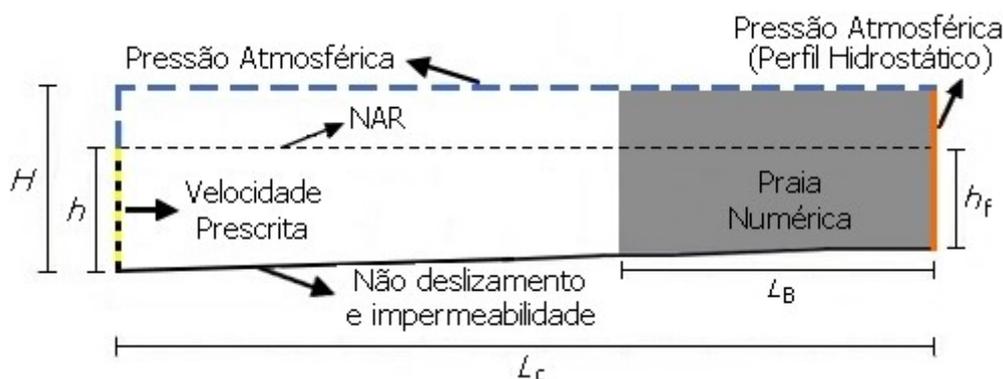
Assim, na presente seção são apresentados aspectos da metodologia que são comuns aos estudos realizados no presente trabalho, como, por exemplo, características dimensionais e critério de avaliação. Enquanto, nas seções subsequentes (4.1, 4.2, 4.3 e 4.4), são apresentados os aspectos específicos sobre cada investigação realizada, como suas motivações e os casos avaliados.

Para tanto, foi considerado um canal de ondas com comprimento $L_c=272,25$ m, que corresponde a 5λ , conforme recomendado em Gomes *et al.* (2018, p.176), altura $H_c=16,00$ m e profundidade que varia de $h=11,89$ m, referente à profundidade do local do ponto selecionado, até $h_f=10,54$ m, no final do canal. Cabe ressaltar que a diferença na profundidade do canal de ondas se dá pelo fato que a batimetria encontrada no local de estudo é reproduzida no fundo do canal, conforme recomendado por Mocellin *et al.* (2023, p.35), o que ocorre através da utilização de dados batimétricos obtidos de cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha Brasileira, que foram digitalizados por Cardoso *et al.* (2014).



Além disso, em concordância com a recomendação de Lisboa *et al.* (2017, p.83), a praia numérica possui comprimento de 2λ , ou seja, $L_B=108,90$ m. Por fim, a ilustração do domínio computacional utilizado nas simulações numéricas pode ser visualizada na Figura 2, onde são destacadas as principais dimensões, as condições de contorno empregadas e a região de imposição da praia numérica (onde a energia das ondas incidentes é dissipada, evitando sua reflexão ao atingir o final do canal). Ademais, destaca-se que NAR se refere ao nível de água em repouso.

Figura 2 - Ilustração do domínio computacional utilizado.



Fonte: elaborada pelos autores.

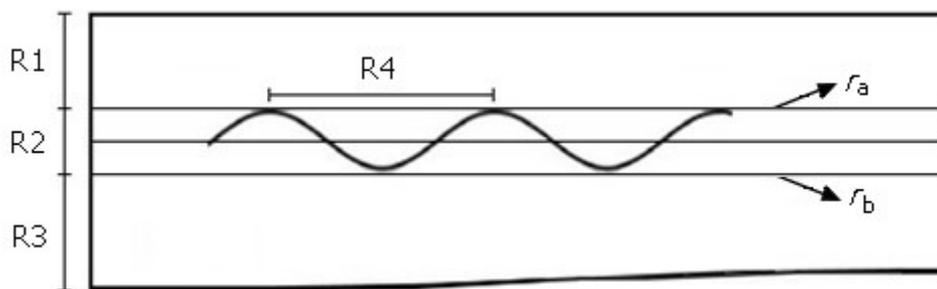
Conforme pôde ser observado na Figura 2, na porção inferior da parede esquerda (linha tracejada amarela e preta), têm-se a região de imposição da CC de velocidade prescrita; enquanto, na parte superior da parede esquerda, assim como no topo do canal (linha tracejada azul), têm-se a CC de pressão atmosférica. Já na parede lateral direita (linha contínua laranja), utiliza-se também a CC de pressão atmosférica, caracterizando um canal de escoamento aberto, no entanto, é imposto um perfil hidrostático que tem por objetivo manter o nível médio da água em uma profundidade constante e igual a h_f , evitando que o canal de ondas esvazie. Por fim, no fundo do canal (linha contínua preta) é utilizada a CC de não deslizamento e impermeabilidade, onde as velocidades são consideradas nulas.

É importante destacar que a metodologia WaveMIMO pode ser empregada considerando diferentes modelos de discretização espacial do domínio computacional, como malhas estruturadas, regulares ou irregulares. No entanto, no presente estudo, assim como em Machado *et al.* (2021), inicialmente utilizou-se a recomendação de Gomes *et al.* (2018, p. 177) para a malha do tipo *stretched*, que emprega um maior refino na região de interesse, neste caso, na região da SL. Como mencionado anteriormente (seção 3.1), a fim de utilizar a recomendação de Gomes *et al.* (2018, p. 177), as características das ondas regulares representativas do estado de mar abordado foram utilizadas como parâmetro para aplicar a malha *stretched*. Portanto, o domínio foi subdividido em três regiões verticais (vide Fig. 3), sendo: R1 a região que contém apenas ar, discretizada em 20 células computacionais; R2 a região da SL, que contém a interface entre a água e o ar, discretizada em 40 células; R3 a região que contém apenas água, discretizada em 60 células. Horizontalmente, têm-se a região R4, onde foram utilizadas 50 células computacionais por λ , totalizando 250 células nessa direção.



Ainda, cabe enfatizar que essa configuração de malha foi desenvolvida considerando a geração e a propagação de ondas regulares; ou seja, ondas com características fixas, que, por sua vez, são relacionadas à discretização espacial do domínio computacional empregado. Por exemplo, a região R2, onde ocorrem as ondas geradas, foi definida de modo que possua um comprimento total de $2H$, sendo H acima e H abaixo do NAR; onde H é a altura de onda (m). No entanto, as ondas irregulares realísticas não possuem características constantes, o que motivou a investigação dessa região no presente trabalho. A fim de possibilitar uma visualização dessa configuração, as regiões da malha *stretched* são ilustradas na Figura 3, onde também são apresentadas as retas r_a e r_b , que representam, respectivamente, os limites superior e inferior da região R2.

Figura 3 - Ilustração das regiões da malha *stretched*.



Fonte: elaborada pelos autores.

Quanto à discretização temporal, que também foi objeto de estudo no presente trabalho, a princípio considerou-se um passo de tempo de 0,05 s, conforme indicado em Machado *et al.* (2021, p. 2141). Destaca-se que foi considerado um tempo total de 900 s de simulação da geração e propagação das ondas irregulares realísticas em cada estudo realizado.

Por fim, cabe ressaltar que visando analisar os resultados obtidos, em todos os estudos realizados no presente trabalho foi utilizada uma sonda de monitoramento da elevação da SL na zona de geração da onda, ou seja, em $x=0$ m. Os dados monitorados foram, então, comparados com a elevação da SL proveniente do modelo espectral TOMAWAC e, a fim de avaliar quantitativamente esses resultados, foram consideradas as métricas MAE (*Mean Absolute Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*) representadas, respectivamente, por (Chai; Draxler, 2014, p. 1248):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^M O_i - P_i}{M} \tag{24}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (O_i - P_i)^2}{M}} \tag{25}$$

onde O_i representa o valor encontrado no Fluent (m), P_i o dado oriundo do TOMAWAC (m), e M representa o número total de dados. Desse modo, as métricas MAE e RMSE

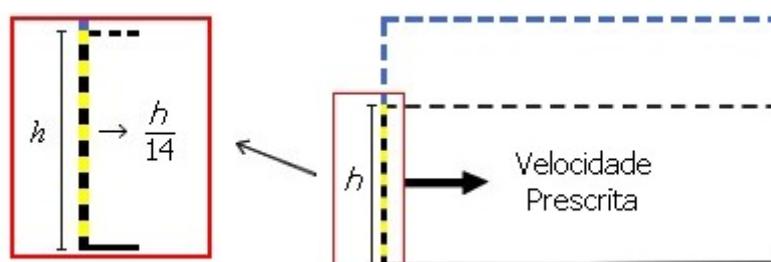


obtidas foram utilizadas a fim de definir o melhor caso avaliado em cada estudo do presente trabalho, onde valores menores indicam resultados melhores; com exceção do estudo da discretização temporal, onde o tempo de processamento demandando também é levado em consideração como critério de avaliação.

4.1. DISCRETIZAÇÃO DA REGIÃO DE IMPOSIÇÃO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO DE VELOCIDADE PRESCRITA

O objetivo do presente estudo consiste em realizar uma investigação a respeito da discretização da região do canal de ondas numérico onde é imposta a CC de velocidade prescrita, assim como em Paiva *et al.* (2023), que realizaram esta análise considerando um estado de mar realístico que ocorreu no município de Rio Grande (RG) no ano de 2018. Este estudo é realizado, pois, para a aplicação da metodologia WaveMIMO, é necessário subdividir esta região em segmentos de reta, onde são inseridos os dados discretos transientes das velocidades orbitais de propagação das ondas. A subdivisão empregada em Machado *et al.* (2021, p. 2138) foi de $h/14$, ou seja, a profundidade do local dividida em 14 segmentos de mesmo tamanho, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Ilustração da subdivisão recomendada.



Fonte: elaborada pelos autores.

Na investigação realizada no presente estudo a respeito da subdivisão desta região, foram avaliados três casos, onde o tamanho dos segmentos de reta utilizados foi investigado. Assim, além da abordagem adotada em Machado *et al.* (2021), foram propostas outras duas análises, que consistem em relacionar h , que é o tamanho da região, com os parâmetros de altura máxima ($H_{máx}$) e de altura significativa (H_s) das ondas irregulares realísticas.

Deste modo, ao invés de fixar a quantidade ou a dimensão dos segmentos a serem utilizados, têm-se uma abordagem que varia de acordo com a série de elevações que é abordada, com segmentos de dimensão aproximadamente iguais à $H_{máx}$ ou H_s . Ainda, destaca-se que $H_{máx}$ é dado pelo módulo da maior crista ou cava encontrada na série de elevações da SL proveniente do modelo TOMAWAC. Assim sendo, na Tabela 3 são apresentadas as características de cada caso avaliado.



Tabela 3 – Características dos casos testados para o estudo discretização da região de imposição da CC de velocidade prescrita.

Caso	Parâmetro	Nº de Segmentos	Dimensão dos Segmentos (m)
1	$h/14$	14	0,8492
2	H_s	13	0,9146
3	$H_{máx}$	9	1,3121

Fonte: elaborada pelos autores.

Por fim, cabe ressaltar que a região da SL (R2 na Fig. 3) possui um tamanho levemente diferente para cada caso analisado, pois esta região foi definida com base no tamanho dos segmentos de reta utilizados, possuindo um segmento acima e outro abaixo do NAR; de modo análogo ao realizado quando se utiliza a malha *stretched* em simulações de ondas regulares. Ainda, é importante frisar que, para os três casos analisados, foi mantida a discretização de 40 células computacionais verticalmente na região da SL.

4.2. SENSIBILIDADE DE MALHA NA REGIÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE

Após estabelecer a melhor abordagem para a discretização da região de imposição da CC de velocidade prescrita, foi realizada a análise da sensibilidade de malha na região da SL. Ressalta-se que a importância desta análise reside no fato de que na região da SL são impostos os maiores gradientes de velocidade de propagação das ondas. Ainda, cabe destacar que o presente estudo foi motivado pela recomendação de Romanowski *et al.* (2019, p. 4), de que a região da SL deve ser subdividida em diferentes regiões, onde as regiões mais refinadas são aquelas que concentram a maior parte das elevações e, para tanto, se faz necessária uma análise estatística.

Assim, além da abordagem adotada no estudo anterior (seção 4.1), que segue a recomendação de Gomes *et al.* (2018, p. 177), o presente estudo propõe avaliar outras três abordagens de discretização, sem que haja a necessidade de uma análise estatística das elevações das ondas irregulares realísticas a serem reproduzidas numericamente. As novas abordagens propostas consistem em dividir cada um dos segmentos que compõe a região da SL em dois segmentos de mesmo tamanho e variar a quantidade de células computacionais aplicadas, assim como ilustrado na Figura 5.

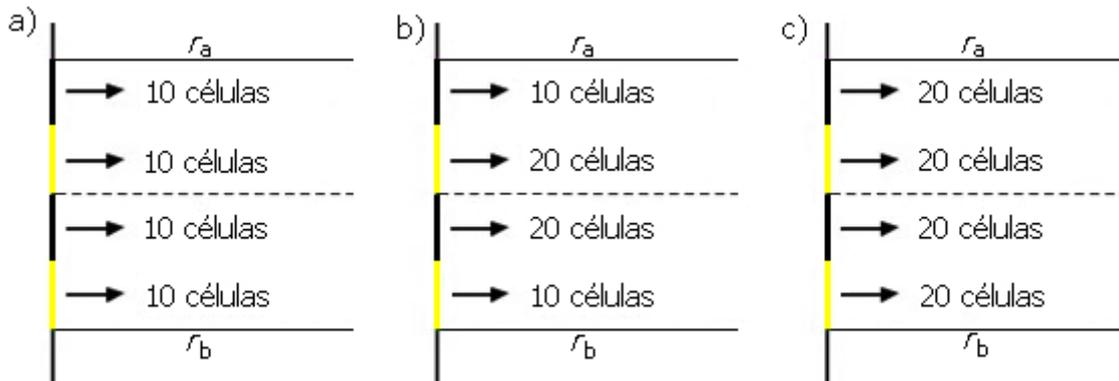
Desde modo, os casos analisados foram:

- Caso 4: cada segmento foi discretizado em 10 células, totalizando 40 células computacionais na vertical, mantendo o refino indicado em Gomes *et al.* (2018, p. 177);
- Caso 5: os segmentos centrais (entorno do NAR) são discretizados em 20 células, enquanto os demais são discretizados em 10, totalizando 60 células computacionais na vertical. Essa abordagem se assemelha à recomendação de Romanowski *et al.* (2019, p. 4); e



- Caso 6: cada segmento é discretizado em 20 células, apresentando o dobro do refino indicado em Gomes *et al.* (2018, p. 177), totalizando 80 células computacionais na vertical.

Figura 5 – Discretização da SL: (a) Caso 4; (b) Caso 5; e (c) Caso 6.



Fonte: elaborada pelos autores.

4.3. INDEPENDÊNCIA DE PASSO DE TEMPO

Após definir os aspectos da discretização espacial do domínio computacional, foi realizada a investigação da discretização temporal. Nesse sentido, foi realizado o estudo de independência de passo de tempo, que busca estabelecer uma relação entre o passo de tempo (Δt) e o T_m . Para isso, buscou-se identificar a relação que proporciona a melhor correspondência entre as elevações da SL geradas no Fluent com aquelas obtidas através do modelo espectral TOMAWAC. Assim, os casos avaliados são apresentados na Tabela 4, juntamente com o número de passos de tempo necessários para executar os 900 s de simulação em cada caso.

Tabela 4 – Casos testados para o estudo de independência de passo de tempo.

Caso	Relação	Δt (s)	Número de Passos de Tempo
7	$T_m/60$	0,1050	8.572
8	$T_m/90$	0,0700	12.858
9	$T_m/120$	0,0525	17.143
10	$T_m/150$	0,0420	21.429

Fonte: elaborada pelos autores.

Como mencionado anteriormente, o estudo da discretização temporal se diferencia dos demais no que diz respeito ao critério de avaliação dos casos analisados. Além das métricas MAE e RMSE obtidas, o tempo de processamento demandado em cada simulação também é levado em consideração para definir o melhor caso. Isso ocorre, pois, um maior refino temporal acarreta um maior número de passos de tempo e, conseqüentemente, um maior tempo de processamento. Por fim, cabe ressaltar que a recomendação de Machado *et al.* (2021, p. 2141), onde $\Delta t=0,05$ s, encontra-se entre $T_m/120$ e $T_m/150$.



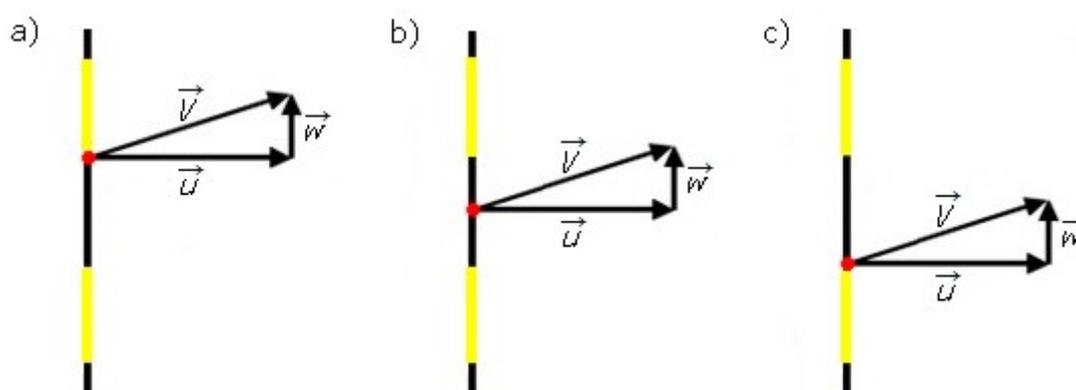
4.4. LOCALIZAÇÃO DO VETOR DE VELOCIDADES

A última avaliação proposta acerca da geração de ondas irregulares realísticas, diz respeito à localização do vetor velocidade que contém os dados discretos transientes que formam os perfis de velocidades orbitais de propagação das ondas utilizados como CC de velocidade prescrita. Seguindo a indicação de Machado *et al.* (2021, p. 2135), ao utilizar a metodologia WaveMIMO, esse vetor é considerado no centro de cada segmento da região de imposição da CC durante a etapa de coleta de dados, a qual ocorre no software Spec2Wave.

Desse modo, além desta, foram avaliadas outras duas abordagens, como ilustrado pela Figura 6, que foram propostas por Maciel *et al.* (2023, p. 230), em um estudo onde esta análise foi realizada considerando o estado de mar referente ao município de Rio Grande no ano de 2014. Assim, o presente estudo buscou identificar qual a abordagem fornece os melhores resultados, ou seja, os menores valores para as métricas MAE e RMSE, sendo:

- Caso 11: considerando o vetor na parte superior dos segmentos;
- Caso 12: considerando o vetor no centro dos segmentos; e
- Caso 13: considerando o vetor na parte inferior dos segmentos.

Figura 6 - Ilustração do vetor velocidade em um segmento na posição: (a) superior; (b) central; e (c) inferior.



Fonte: elaborada pelos autores.

5. RESULTADOS

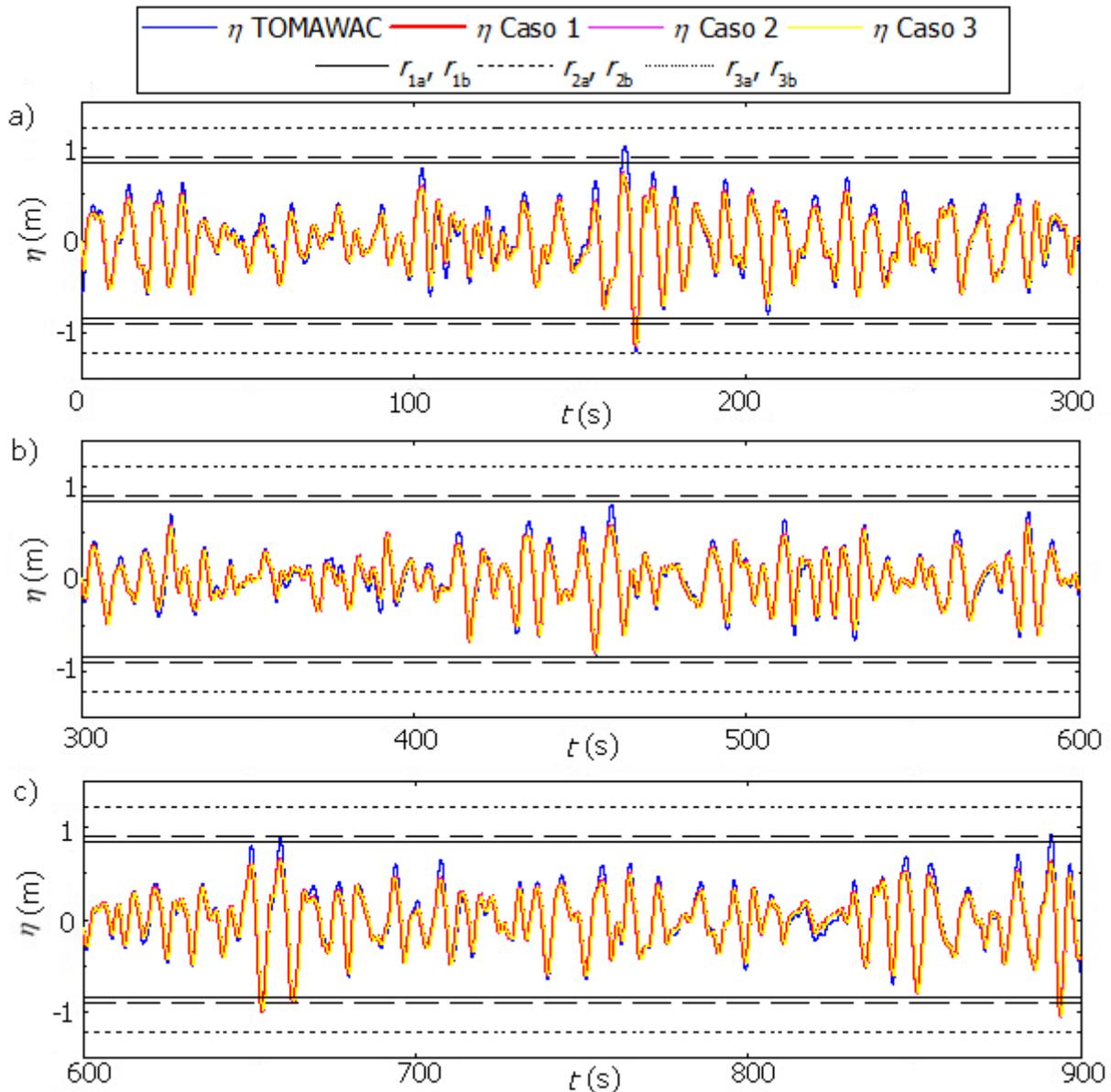
Na presente seção, são apresentados os resultados encontrados ao longo das investigações realizadas acerca dos aspectos da metodologia WaveMIMO e suas respectivas discussões. Além disso, é importante enfatizar que os estudos foram realizados em cadeia, ou seja, o resultado encontrado no estudo anterior é considerado para a execução do estudo seguinte.



5.1. DISCRETIZAÇÃO DA REGIÃO DE IMPOSIÇÃO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO DE VELOCIDADE PRESCRITA

A fim de possibilitar uma melhor análise durante a avaliação dos resultados encontrados, a comparação qualitativa da elevação da SL (η) foi disposta em três faixas de tempo, que compreendem um intervalo de 300 s cada. Assim, na Figura 7 são apresentados os resultados monitorados para o estudo de discretização da região de imposição da CC de velocidade prescrita, onde pode-se observar que o estado de mar referente ao município de Mostardas foi reproduzido adequadamente através da metodologia WaveMIMO.

Figura 7 - Comparação qualitativa dos resultados obtidos para o estudo de discretização da região de imposição da CC de velocidade prescrita: (a) $0 \leq t \leq 300$ s; (b) $300 \leq t \leq 600$ s; e (c) $600 \leq t \leq 900$ s.



Fonte: elaborada pelos autores.



Como pôde ser observado na Figura 7, nos gráficos elaborados são utilizadas retas paralelas ao eixo x , que visam delimitar a região da SL. Nesse sentido, para o presente estudo, cada par de retas está relacionada a um caso avaliado, sendo: r_{1a} e r_{1b} , linhas contínuas que delimitam, respectivamente, a parte superior e inferior da SL no Caso 1; r_{2a} e r_{2b} , linhas tracejadas referentes ao Caso 2; e, analogamente, r_{3a} e r_{3b} , linhas pontilhadas referentes ao Caso 3. Ainda, é válido ressaltar que a localização das retas no eixo z se refere ao tamanho dos segmentos considerados em cada caso.

Nos casos em que os segmentos utilizados para a discretização da região de imposição da CC de velocidade prescrita têm tamanho menor do que o parâmetro $H_{máx}$ (Caso 3), há cristas e cavas fora da região da SL, o mesmo também foi observado em Paiva *et al.* (2023, p.7-8). No entanto, como no presente estudo há uma proximidade do valor de H_s (Caso 2) com o tamanho de $h/14$ (Caso 1), sempre que isso ocorre, as cavas e cristas estão fora da região da SL para ambos os casos. Assim, pode-se observar na Figura 7 (a) que este fenômeno ocorre em instantes de tempo logo após $t=150$ s, assim como, observa-se na Figura 7 (c) a ocorrência nos instantes $t=650$ s e próximo à $t=900$ s. Ainda, destaca-se que essa ocorrência não se apresenta no intervalo em que $300s \leq t \leq 600s$, disposto na Figura 7 (b).

Portanto, a maior parte das elevações geradas encontram-se dentro da região delimitada pelas retas r_{1a} e r_{1b} e pelas retas r_{2a} e r_{2b} , que possuem células computacionais praticamente do mesmo tamanho. Na Tabela 5 são apresentadas as métricas MAE e RMSE para os casos avaliados, além da dimensão vertical de cada elemento de malha presente na região da SL, bem como o tempo de processamento demandado em cada caso.

Tabela 5 - Resultados quantitativos do estudo de discretização da região de imposição da CC de velocidade prescrita.

Caso	Δz (m)	MAE (m)	RMSE (m)	Tempo de Processamento
1	0,04246	0,064253	0,084558	7 h e 50 min
2	0,04500	0,064426	0,084841	7 h e 41 min
3	0,06101	0,065575	0,086569	7 h e 32 min

Fonte: elaborada pelos autores.

Como apresentado na Tabela 5, os resultados são diretamente proporcionais à discretização da região de imposição da CC, sendo o Caso 1 o melhor avaliado, em concordância com os resultados encontrados em Paiva *et al.* (2023, p.8). Ainda, destaca-se que a sensível variação no tempo de processamento se deve ao fato de que em todos os casos é mantida a discretização espacial de 40 células computacionais na região da SL, ou seja, a variação de Δz não apresenta grande influência sobre o mesmo, ocorrendo uma variação máxima de 18 min.

Comparando os casos avaliados, nota-se que as métricas MAE e RMSE para o Caso 2, em comparação ao Caso 1, são respectivamente 0,27% e 0,33% maiores, enquanto apresenta elementos de malha com Δz 5,98% maior e um tempo de processamento 1,91% menor. Já, ao comparar o Caso 3, o pior caso, ao caso 1, nota-se que as

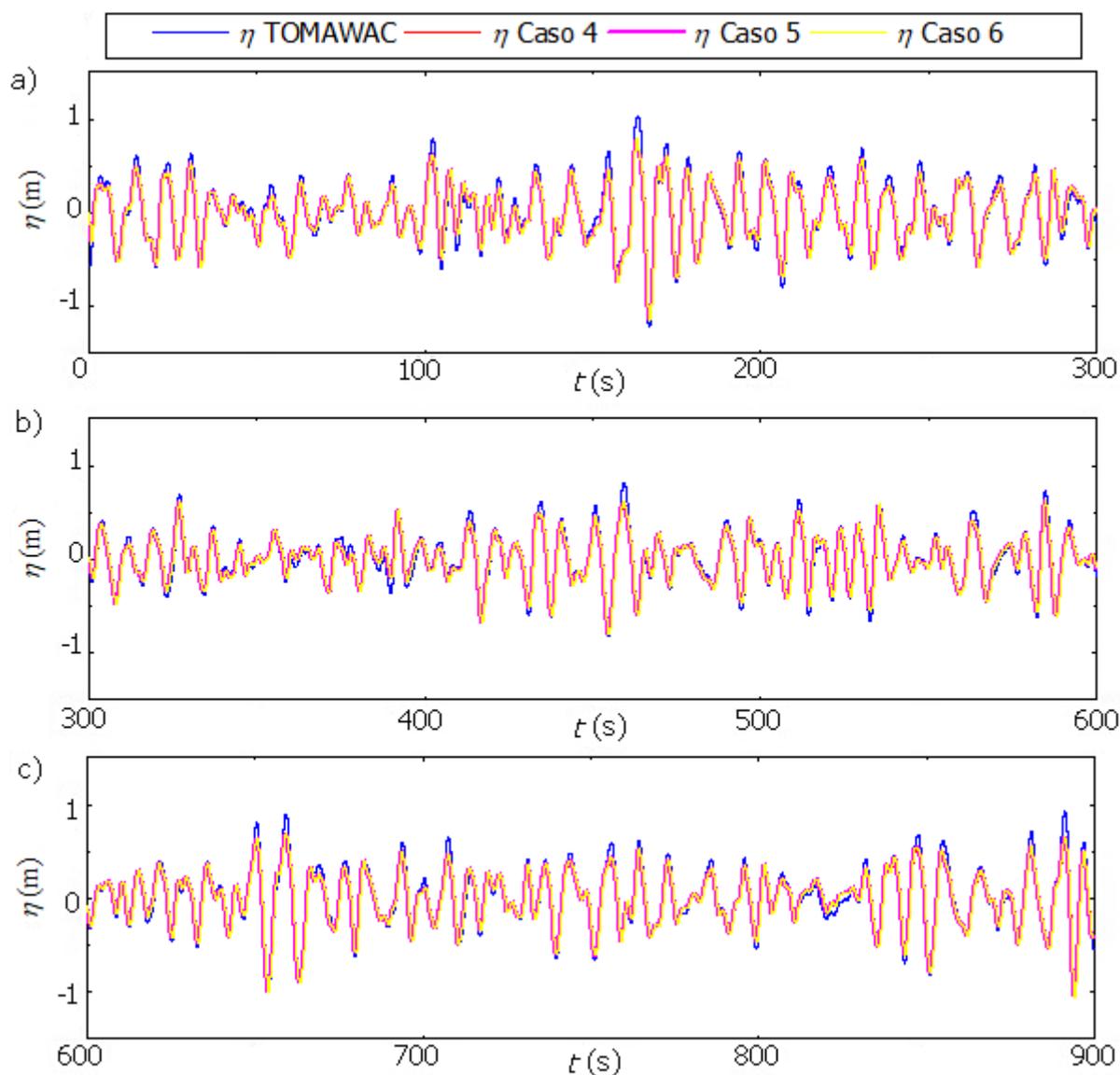


métricas MAE e RMSE são respectivamente 2,06% e 2,38% maiores, empregando elementos de malha 43,69% maiores e apresentando uma redução no tempo de processamento de 3,83%.

5.2. SENSIBILIDADE DE MALHA NA REGIÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE

Conforme os resultados da seção 5.1, ficou estabelecido que a região da SL é composta por 2 segmentos de tamanho $h/14$ (Caso 1). Desse modo, para o estudo de sensibilidade de malha, é proposta a abordagem de subdividir os segmentos da SL em 4 segmentos de tamanho $h/28$ cada. Como mencionado na seção 4.3, as discretizações avaliadas distinguem-se pela quantidade de células computacionais empregadas nos segmentos (vide Fig. 5). Desse modo, na Figura 8 são apresentados os resultados monitorados na presente avaliação.

Figura 8 - Comparação qualitativa dos resultados obtidos para o estudo de sensibilidade de malha: (a) $0 s \leq t \leq 300 s$; (b) $300 s \leq t \leq 600 s$; e (c) $600 s \leq t \leq 900 s$.



Fonte: elaborada pelos autores.



Conforme apresentado na Figura 8, em todos os casos avaliados, as ondas irregulares realísticas geradas através da Metodologia WaveMIMO reproduzem adequadamente o estado de mar realístico abordado. E, como não é possível distinguir visualmente a melhor abordagem dentre as testadas, faz-se necessário a realização de uma avaliação quantitativa. Portanto, na Tabela 6 são apresentadas as métricas MAE e RMSE calculadas, além do tempo de processamento demandado para cada um dos casos analisados, assim como para o Caso 1, que foi adotado como referência.

Tabela 6 – Resultados quantitativos do estudo de sensibilidade de malha.

Caso	MAE (m)	RMSE (m)	Tempo de Processamento
1	0,064253	0,084558	7 h e 50 min
4	0,064266	0,084567	7 h e 52 min
5	0,062428	0,081806	8 h e 55 min
6	0,062671	0,082080	9 h e 42 min

Fonte: elaborada pelos autores.

Como é possível observar na Tabela 6, o melhor caso, i.e., aquele que apresentou as menores métricas MAE e RMSE na presente avaliação, foi o Caso 5, que conta com 60 células computacionais na região da SL. Além disso, também pode-se observar que o Caso 4 não apresentou uma melhora em relação ao Caso 1, ou seja, a abordagem de divisão dos segmentos, por si só, não acarretou uma melhoria nos resultados, sendo necessário, para tanto, variar a quantidade de células computacionais empregadas na região da SL. No entanto, destaca-se que mesmo apresentando diferenças ínfimas, tanto as métricas de erro quanto o tempo de processamento do Caso 4 oscilaram positivamente em relação ao Caso 1.

Ainda, nota-se, que entre as novas abordagens propostas para a malha *stretched* na região da SL, os piores resultados são encontrados para o Caso 4 que, em comparação com o Caso 5, apresenta métricas MAE e RMSE, respectivamente, 2,94% e 3,38% maiores. Ainda, considerando que o aumento de refino na região é na ordem de 50%, passando de 40 para 60 células computacionais, a diferença entre o tempo de processamento é razoavelmente baixa, sendo apenas 11,78% menor do que o Caso 5.

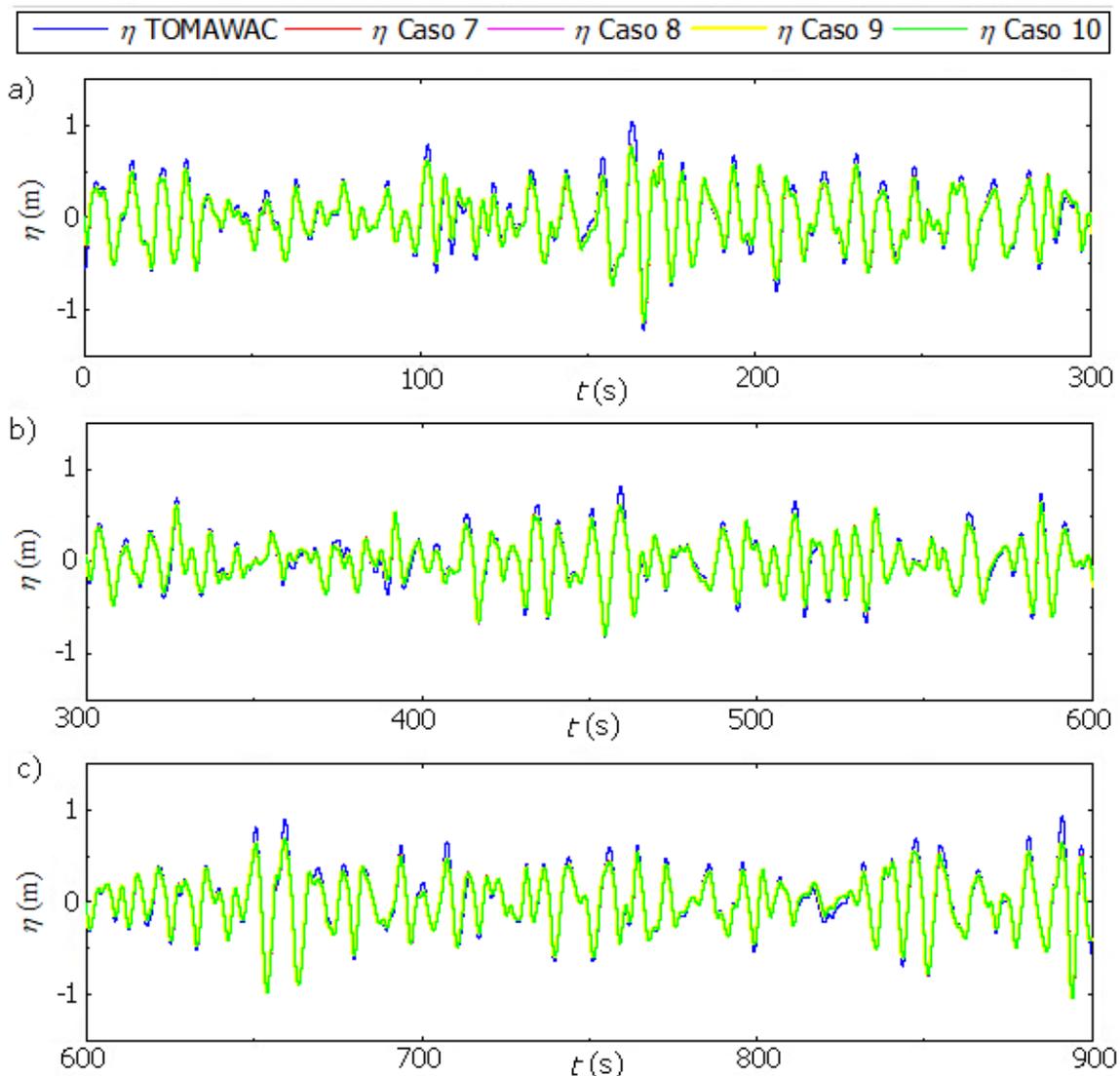
Já ao comparar o Caso 5 com o Caso 6, foi possível identificar que a abordagem de aplicar um maior refino de malha apenas na região próxima ao NAR se mostra assertiva. Pois, apesar de possuir 80 células computacionais na região da SL, o Caso 6 apresentou um aumento nas métricas MAE e RMSE de, respectivamente, 0,39% e 0,33% quando comparadas às obtidas no Caso 5, além de um tempo de processamento 8,79% maior. Sendo assim, foi possível inferir que o Caso 5 apresentou o melhor desempenho.



5.3. INDEPENDÊNCIA DO PASSO DE TEMPO

É importante ressaltar que, para a execução da presente investigação, a configuração de malha obtida até o presente momento pelos estudos anteriores (seções 5.1 e 5.2) foi adotada. Assim, a fim de realizar uma avaliação qualitativa dos resultados monitorados, a comparação entre as elevações geradas no software Fluent e aquelas provenientes do modelo espectral TOMAWAC é apresentada na Figura 9, onde, mais uma vez, nota-se que o estado de mar realístico de Mostardas foi reproduzido adequadamente por meio da metodologia WaveMIMO.

Figura 9 – Comparação qualitativa dos resultados obtidos para o estudo de independência de passo de tempo: (a) $0 s \leq t \leq 300 s$; (b) $300 s \leq t \leq 600 s$; e (c) $600 s \leq t \leq 900 s$.



Fonte: elaborada pelos autores.

Assim como para o estudo anterior, não é possível distinguir visualmente qual a abordagem que melhor reproduz as ondas irregulares realísticas. Portanto, visando uma maior precisão na análise dos resultados monitorados, na Tabela 7 são



apresentadas as métricas MAE e RMSE obtidas em cada caso avaliado, além do tempo de processamento demandado, que, evidentemente, cresce conforme aumenta-se o refino do passo de tempo empregado. Ademais, destaca-se que o Caso 5 também é apresentado na Tabela 7, de modo que os resultados obtidos até então sejam levados em consideração nesta análise, já que esta é a melhor configuração estabelecida até o momento e conta com um passo de tempo de 0,05 s, seguindo a indicação original da metodologia WaveMIMO (Machado *et al.* 2021, p. 2141).

Tabela 7 – Resultados quantitativos do estudo de independência de passo de tempo.

Caso	Relação	MAE (m)	RMSE (m)	Tempo de Processamento
5	$T_m/126$	0,062428	0,081806	8 h e 55 min
7	$T_m/60$	0,064937	0,085195	4 h e 10 min
8	$T_m/90$	0,063232	0,082914	6 h e 16 min
9	$T_m/120$	0,062517	0,081935	8 h e 26 min
10	$T_m/150$	0,062165	0,081430	10 h e 38 min

Fonte: elaborada pelos autores.

Os resultados apresentados na Tabela 7 indicam que as métricas MAE e RMSE apresentaram uma melhoria contínua à medida em que o passo de tempo é refinado, variando de $T_m/60$ à $T_m/150$. Além disso, destaca-se que o Caso 5, que empregou um passo de tempo de 0,05 s, corresponde a uma relação de $T_m/126$, estando, assim, em conformidade com os demais resultados, ou seja, com valores entre àqueles obtidos pelos Casos 9 e 10, tanto para as métricas MAE e RMSE, quanto para o tempo de processamento.

Comparando os resultados obtidos para o Caso 7 e para o Caso 8, há uma redução nas métricas MAE e RMSE de, respectivamente, 2,63% e 2,68%, com um aumento de 50,40% no tempo de processamento. Já ao comparar o Caso 8 com o Caso 9, a redução foi de 1,13% (MAE) e 1,18% (RMSE), e o tempo de processamento apresentou um aumento de 34,17%; enquanto, comparando o Caso 9 ao Caso 10, têm-se reduções de 0,56% (MAE) e 0,62% (RMSE) e um aumento de 26,09% no tempo de processamento.

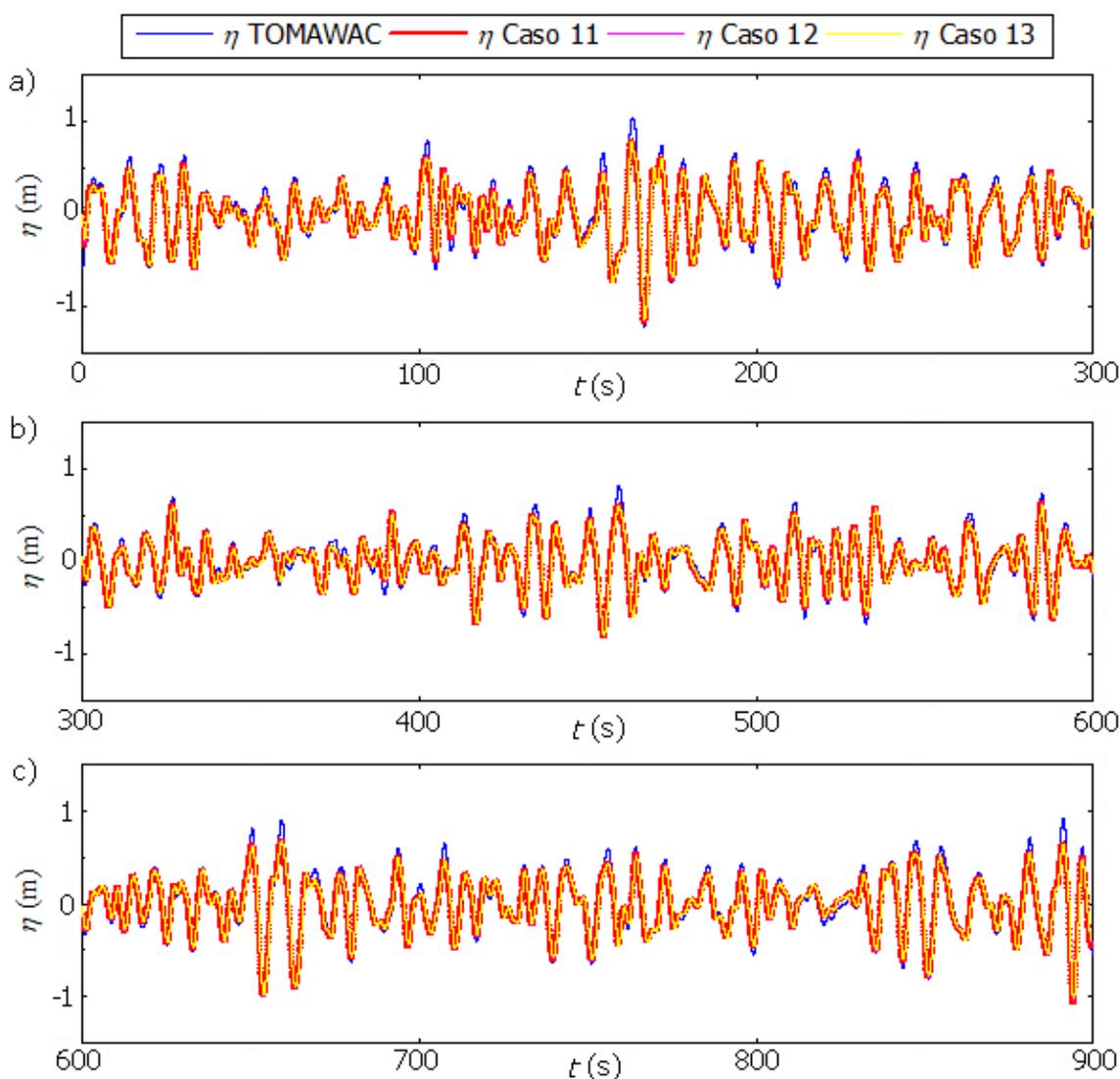
Desse modo, como na presente análise houve uma melhora contínua das métricas avaliadas, o tempo de processamento demandado também é considerado um critério avaliativo. Assim, o Caso 9 ($\Delta t = T_m/120$) é apontado como o melhor caso analisado, visto que a redução nas métricas MAE e RMSE foram inferiores a 1,00% quando comparado com o Caso 10, enquanto o aumento no tempo de processamento foi superior a 26,00%.



5.4. LOCALIZAÇÃO DO VETOR DE VELOCIDADES

Novamente, ressalta-se que os resultados obtidos nos estudos anteriores (seções 5.1, 5.2 e 5.3) são levados em consideração nesta última avaliação, que diz respeito à localização onde é calculado o vetor de velocidades em cada segmento da região de imposição da CC de velocidade prescrita. Desse modo, na Figura 10 apresenta-se a comparação qualitativa entre as elevações da SL monitoradas no software Fluent e a elevação proveniente do modelo espectral TOMAWAC. Nota-se que, em todos os casos simulados, as ondas irregulares geradas na Fluent reproduziram adequadamente o estado de mar realístico encontrado no município de Mostardas, de modo que, assim como em estudos anteriores, não é possível distinguir visualmente o melhor caso.

Figura 10 - Comparação qualitativa dos resultados obtidos para o estudo de localização do vetor de velocidades: (a) $0 s \leq t \leq 300 s$; (b) $300 s \leq t \leq 600 s$; e (c) $600 s \leq t \leq 900 s$.



Fonte: elaborada pelos autores.



Quanto à avaliação quantitativa, na Tabela 8 encontram-se os resultados obtidos, no entanto, é importante ressaltar que a mesma se diferencia das apresentadas até então. Visto que a localização do vetor de velocidades não altera o tempo de processamento demandado, o mesmo não é apresentado, sendo igual ao apresentado no estudo anterior quando considerado o Caso 9.

Além disso, estão presentes na Tabela 8 as diferenças relativas (d_r) entre os resultados obtidos, que indicam a variação das métricas MAE e RMSE entre os casos avaliados. Para tanto, os casos são comparados sempre ao anterior, localizado na linha acima da tabela e, assim, a porcentagem indicada representa um valor positivo, uma vez que as métricas aumentam conforme a localização do vetor velocidade é reduzida.

Tabela 8 – Resultados quantitativos do estudo de localização do vetor de velocidades.

Caso	MAE (m)	d_r (%)	RMSE (m)	d_r (%)
11	0,061261	-	0,079993	-
12	0,062517	2,05	0,081935	2,43
13	0,064138	2,59	0,088421	7,92

Fonte: elaborada pelos autores.

Como pôde-se observar na Tabela 8, o Caso 11, que conta com o vetor na posição superior de cada segmento da região de imposição da CC de velocidade prescrita, apresenta os melhores resultados. Em seguida, têm-se o Caso 12, com o vetor na posição central dos segmentos, abordagem indicada em Machado *et al.* (2021, p. 2135), que conduz à resultados intermediários. Por fim, têm-se o Caso 13, onde o vetor é obtido na posição inferior dos segmentos, caso que apresentou as piores métricas, em especial quando considerada a RMSE, o que vai de encontro aos resultados apresentados em Maciel *et al.* (2023, p. 233), que apontavam essa posição como a melhor abordagem para a reprodução do estado de mar realístico abordado no referido estudo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho foi dividido em quatro estudos de geração de ondas irregulares realísticas através da metodologia WaveMIMO (Machado *et al.*, 2021), visando avaliar parâmetros de aplicação desta metodologia. Para tanto, foram realizadas simulações numéricas considerando dados de estado de mar realísticos encontrados na costa do município de Mostardas, no estado do Rio Grande do Sul, no ano de 2018.

Dentre estes estudos, têm-se aqueles que dizem respeito à discretização espacial do domínio computacional empregado, como a investigação acerca da discretização da região de imposição da CC de velocidade prescrita. Com base nas avaliações realizadas, foi possível determinar que os melhores resultados foram obtidos para o Caso 1, quando a região de imposição da CC foi subdividida em 14 segmentos.

Em outro estudo, a sensibilidade de malha na região da SL foi analisada, onde foi proposto que os segmentos que compõe esta região, que estão acima e abaixo da NAR, fossem divididos em 2 segmentos cada. Posto isso, cabe destacar que a região



de imposição da CC de velocidade prescrita passou a contar com 15 segmentos, sendo os 2 primeiros logo abaixo do NAR de tamanho $h/28$, enquanto os 13 segmentos restantes seguiram com tamanho $h/14$. Desse modo, foi possível constatar que os melhores resultados foram obtidos pelo Caso 5, onde os segmentos centrais da SL, aqueles diretamente acima e abaixo da NAR, são discretizados com um maior refino do que os demais segmentos da região, aqueles mais distantes do NAR, totalizando o emprego de 60 células computacionais na região da SL.

Dando sequência à análise, foi investigada a discretização temporal empregada nas simulações numéricas, onde passo de tempo foi relacionado com o período médio das ondas abordadas. Destaca-se que nesta avaliação o tempo de processamento demandado foi considerado a fim de determinar qual a melhor relação empregada, assim, identificou-se que os melhores resultados são obtidos para o Caso 9, quando $\Delta t = T_m/120$.

Finalmente, o último estudo relativo à geração das ondas irregulares realísticas diz respeito à avaliação da localização do vetor de velocidades. Assim, pôde-se determinar que a abordagem que amplia a acurácia dos resultados é aquela do Caso 11, que considera o vetor na parte superior de cada segmento da região de imposição da CC de velocidade prescrita durante a etapa de coleta dos dados transientes que compõe os perfis de velocidade.

Desse modo, após a investigação dos parâmetros supracitados, foi possível reproduzir adequadamente o estado de mar realístico abordado, com exceção de algumas cristas e cavas que não foram alcançadas, comportamento já observado em outros estudos que aplicaram a metodologia WaveMIMO, como Koch *et al.* (2022, p. 39), Maciel *et al.* (2023, p. 231), Mocellin *et al.* (2023, p. 35) e Paiva *et al.* (2023, p. 8). Ainda, destaca-se que comparando o melhor e o pior caso analisado, respectivamente, Caso 11 e Caso 3, foi possível reduzir as métricas em 6,58% (MAE) e 7,60% (RMSE), enquanto o tempo de processamento apresentou um aumento de 13,14%, justificado pelo maior refino empregado nas discretizações espacial e temporal.

Por fim, no que tange a estudos futuros, sugere-se que as investigações realizadas no presente trabalho sejam performadas considerando outros estados de mar realísticos, que possuam diferentes características de H_s , T_m e h . Desse modo, será possível buscar recomendações gerais para a aplicação da metodologia WaveMIMO na geração numérica de ondas irregulares realísticas.

7. REFERÊNCIAS

ADESANYA, A. *et al.* Prospects of ocean-based renewable energy for West Africa's sustainable energy future. **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 10 , n. 1, p. 37-50, 2020.

AWK, T., **TOMAWAC User Manual Version 7.2. 7.2.3.** 7. ed. The Telemac-Mascaret Consortium, 2017. Disponível em: http://wiki.opentelemac.org/doku.php?id=user_manual_tomawac. Acesso em: 2 set. 2023.



CARDOSO, S. D. *et al.* Levantamento batimétrico usando cartas náuticas. In: MOSTRA DE PRODUÇÃO UNIVERSITÁRIA, 13., 2014, Rio Grande. **Anais...** Rio Grande: Universidade Federal do Rio Grande, 2014. p.1-2.

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, n. 3, p. 1247-1250, 2014.

EPE. **Relatório Final do Balanço Energético Nacional**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 26 set. 2023.

ESPINDOLA, R. L.; ARAÚJO, A. M. Wave energy resource of Brazil: An analysis from 35 years of ERA-Interim reanalysis data. **PLoS One**, v. 12, n. 8, p. 1-28, 2017.

GOMES, M. N. *et al.* 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, n. 2, p. 173-190, 2018.

GONÇALVES, M.; MARTINHO, P.; SOARES, C. G. A 33-year hindcast on wave energy assessment in the western french coast. **Energy**, v. 165, p. 790-801, 2018.

HEMER, M. A. *et al.* A revised assessment of Australia's national wave energy resource. **Renewable Energy**, v. 114, p. 85-107, 2017.

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

KOCH, A. H. S. *et al.* Numerical evaluation of the hydropneumatic power of the oscillating water column wave energy converter submitted to regular and irregular waves. **Engineering Science & Technology**, v. 3, n. 1, p. 32-43, 2021.

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 and Diffusion Forum**, v. 372, p. 81-90, 2017.

MACHADO, B. N. *et al.* WaveMIMO methodology: numerical wave generation of a realistic sea state. **Journal of Applied and Computational Mechanics**, v. 7, n. 4, p. 2129-2148, 2021.

MACIEL, R. P. *et al.* Verification and validation of a methodology to numerically generate waves using transient discrete data as prescribed velocity boundary condition. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 8, 2021.

MACIEL, R. P. *et al.* Investigation of numerical irregular wave generation using transient discrete data as boundary conditions of prescribed velocity. **Defect and Diffusion Forum**, v. 427, p. 227-235, 2023.

MCCORMICK, M. E. **Ocean engineering mechanics**. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2010.



MOCELLIN, A. P. G. *et al.* 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.

NARULA, K. **The maritime dimension of sustainable energy security**. Singapura: Springer Nature Singapore, 2018.

OLEINIK, P. H. *et al.* Transformation of water wave spectra into time series of surface elevation. **Earth**, v. 2, n. 4, p. 997-1005, 2021.

OLEINIK, P. H. **O programa Spec2Wave**: manual do usuário. 2022.

PAIVA, M. da S. *et al.* Investigation on the Discretization of the Realistic Irregular Wave Generation Region through the WaveMIMO Methodology. **Revista de Engenharia Térmica**, v. 22, n. 1, p. 3-10, 2023.

RIBAL, A. *et al.* A high-resolution wave energy resource assessment of Indonesia. **Renewable Energy**, v. 160, p. 1349-1363, 2020.

ROMANOWSKI, A.; TEZDOGAN, T.; TURAN, O. Development of a CFD methodology for the numerical simulation of irregular sea-states. **Ocean Engineering**, v. 192, p. 1-24, 2019.

SRINIVASAN, V.; SALAZAR, A. J.; SAITO, K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. **Applied Mathematical Modelling**, v. 35, n. 8, p. 3710-3730, 2011.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics**: the finite volume method. Harlow: Pearson Education Limited, 2007.

Submetido em: **02/04/2024**

Aceito em: **02/08/2024**