



Análise do Efeito da Praia Numérica na Hidrodinâmica do Dispositivo Placa Horizontal Submersa Submetido às Ondas Irregulares de um Estado de Mar Realístico

Gabrielle Ücker Thum^{*1}; Rafael Pereira Maciel¹; Phelype Haron Oleinik¹; Luiz Alberto Oliveira Rocha¹; Elizaldo Domingues dos Santos¹; Flavio Medeiros Seibt²; Bianca Neves Machado³; Liércio André Isoldi¹

Resumo: O presente estudo analisa a influência da praia numérica (PN) na hidrodinâmica do dispositivo Placa Horizontal Submersa (PHS) sob a incidência de ondas irregulares que representam um estado de mar realístico. É proposta uma nova geometria do canal de ondas numérico com 1 comprimento de onda entre o dispositivo e a PN. São simulados 2 casos com diferentes comprimentos da PHS (L_p). A solução considera o método dos volumes finitos e modelo *volume of fluid*. O resultado da redução da altura significativa das ondas varia entre 2,67% no caso $1L_p$ e 0,37% para o caso $3L_p$. A velocidade axial máxima abaixo da PHS no caso $1L_p$ tem uma influência maior do que 5% devido à PN. Ao longo do tempo a velocidade axial tem resultados de, no máximo, 0,05 m/s.

Palavras-chave: Placa horizontal submersa; praia numérica; ondas irregulares; quebramar; conversor de energia das ondas.

^{*} gabrielletum@yahoo.com.br

¹ Universidade Federal do Rio Grande – FURG/Av. Itália, km 8, Rio Grande, RS, Brasil.

² Universidade Petrobras - Petróleo Brasileiro S.A./ Rua General Canabarro, 500, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS/ RS 030 km 92, Emboaba, Tramandaí RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A crise climática anunciada desde o século passado é hoje uma realidade. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas e a meta de descarbonização do Acordo de Paris aumentam o interesse no desenvolvimento de fontes renováveis de energia (González *et al.*, 2021; United Nations, 2015). Há associação desse estudo com os ODS, já que o dispositivo Placa Horizontal Submersa (PHS) pode ser utilizado como um conversor de energia das ondas (*Wave Energy Converter – WEC*) e como um quebra-mar.

A PHS foi proposta, originalmente, como um quebra-mar e no decorrer de estudos da sua hidrodinâmica, foi constatado que a PHS também pode ser utilizada como WEC. A figura 1 ilustra uma secção longitudinal da PHS que permite identificar a sua função como quebra-mar (devido à redução da altura de onda após a PHS) e a sua função como WEC (devido ao escoamento pulsante sob a PHS que pode acionar uma turbina hidráulica).

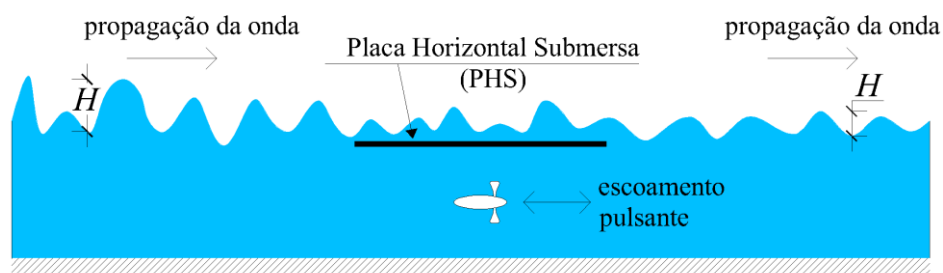


Figura 1: Dispositivo Placa Horizontal Submersa.

Considerando a necessidade de uma transição energética e a proteção costeira frente às mudanças climáticas, o estudo da PHS investiga novas soluções tecnológicas para esses desafios. Em particular, o trabalho publicado por Thum *et al.* (2024) amplia a produção científica a partir de um estudo numérico inédito do dispositivo PHS submetido às ondas regulares representativas e irregulares realísticas de um estado de mar que ocorreu na costa de Rio Grande, estado do Rio Grande do Sul, no sul do Brasil.

Os resultados dos autores destacam uma variação na altura significativa (H_s) da onda após a propagação sobre a PHS entre diferentes pontos para um mesmo caso. Esse resultado não garantiu que a análise da função de quebra-mar estava livre de distorções numéricas ou de erros no modelo. O presente estudo pretende aprofundar os resultados já publicados por meio de testes que avaliam a influência da condição de contorno (CC) da praia numérica (PN) na elevação da superfície livre após a PHS e na velocidade axial abaixo da PHS. Assim, será possível determinar se é necessário realizar alterações no modelo computacional proposto por Thum *et al.* (2024) para as aplicações da metodologia WaveMIMO com o dispositivo PHS.

1.1 Estado da Arte

O conceito da PHS como quebra-mar baseia-se na redução da energia das ondas após a propagação sobre o dispositivo, podendo mitigar a erosão costeira (Heins, 1950; Greene e Heins, 1953). Graw (1994) apresentou um estudo experimental sobre a variação da velocidade do escoamento de água abaixo da PHS e propôs a utilização como WEC através da inserção de uma turbina hidráulica abaixo da PHS. Orer e Ozdamar (2007) realizaram um ensaio experimental em um canal de ondas de laboratório. Demonstraram a existência do escoamento horizontal de água, em ambos os sentidos, abaixo da PHS e um aumento na eficiência do conversor de energia das ondas de 60%, superior à eficiência relatada na literatura até aquele momento, que era de 3%.

Seibt *et al.* (2023) realizaram um estudo numérico sobre a PHS na função de WEC aplicando o Design Construtal que é um método que busca o aprimoramento da forma e estrutura dos sistemas. A fundamentação está na Lei Construtal do Design e Evolução. O estudo considerou o Método dos Volumes Finitos (MVF) e o modelo *Volume of Fluid* (VOF). Como resultado, apresentaram uma geometria ótima em escala real para ondas regulares correspondentes à teoria de ondas de Stokes de 2ª ordem. O grau de liberdade otimizado no estudo foi a altura de instalação da placa (h_p).

Thum *et al.* (2024) analisaram numericamente o dispositivo PHS sujeito a ondas regulares e irregulares. O estudo considerou o MVF e VOF e a metodologia WaveMIMO foi aplicada para a geração e propagação de ondas irregulares que representam o estado de mar da costa de Rio Grande. As dimensões do canal numérico, coordenada de início da PHS e da PN são constantes para todos os casos. São analisados 5 casos variando o comprimento da PHS (L_p), variável essa determinada pela otimização de Seibt *et al.* (2023). A CC de PN tem dimensão de 2,5 comprimentos de onda (λ). As dimensões dependentes dos parâmetros da onda são determinadas a partir da onda regular representativa do estado de mar realístico determinado por Maciel *et al.* (2023) e descrita em Thum *et al.* (2023).

Os resultados de Thum *et al.* (2024) indicaram que considerar apenas ondas regulares em estudos numéricos é insuficiente para determinar com precisão o comportamento hidrodinâmico real. A eficiência da PHS como quebra-mar e WEC variou para ondas regulares e irregulares. Especificamente, a PHS demonstra sua maior eficiência de quebra-mar em $2,5L_p$ para ondas regulares e $3L_p$ para ondas irregulares. Como WEC, atinge a maior velocidade axial em $3L_p$ para ondas regulares e $2L_p$ para ondas irregulares. É mencionada a necessidade de compreender melhor o dispositivo PHS como quebra-mar e os efeitos do L_p na propagação da onda após o dispositivo, uma vez que houve variações na eficiência para os casos $2,5L_p$ e $3L_p$ entre as sondas localizadas 10 m a jusante do dispositivo e a sonda fixa a jusante, localizada 16,79 m e 15,05 m, respectivamente.

2 ESTADO DE MAR REALÍSTICO

A metodologia WaveMIMO, apresentada por Machado *et al.* (2021), permite a geração e a propagação de ondas irregulares que representam um estado de mar realístico no software ANSYS Fluent a partir do tratamento do espectro de onda para uma determinada região. A figura 2 expõe, de forma simplificada, o fluxograma com as etapas de tratamento dos dados através da metodologia WaveMIMO. Em seguida são apresentados o local de obtenção do estado de mar realístico e os dados aplicados no presente estudo.

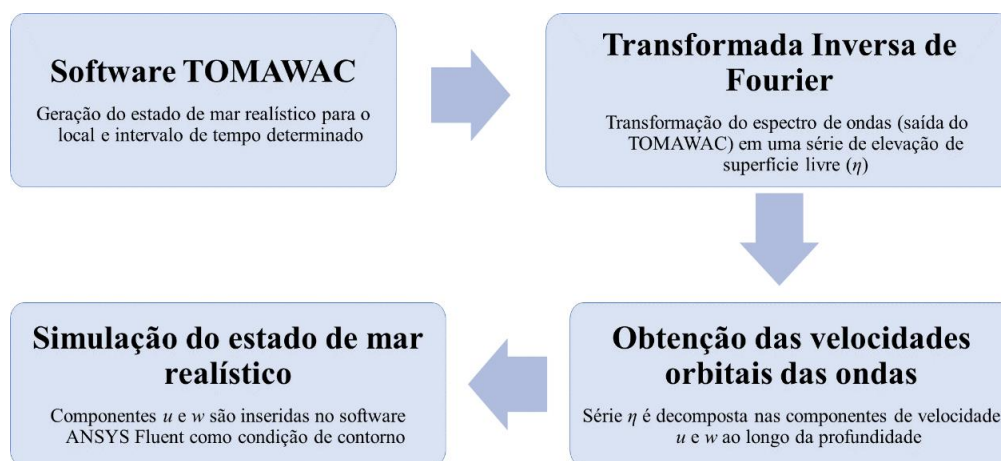


Figura 2: Fluxograma da metodologia WaveMIMO [Adaptado de Machado *et al.* (2021)].

No presente estudo, assim como Thum *et al.* (2024) e Maciel *et al.* (2023), a aplicação da metodologia WaveMIMO considera o estado de mar realístico que ocorreu no município do Rio Grande. O estado de mar realístico simulado no TOMAWAC é compreendido no período entre 01/01/2014 e 31/12/2014. O ponto de extração dos dados está localizado nas coordenadas $52^{\circ} 17' 47.25''$ O, $32^{\circ} 22' 30.95''$ S, à 2 km da costa e com profundidade de 9,52 m. Para o estado de mar considerado, o histograma das ondas para a série anual é apresentado na figura 3(a), onde as ondas mais frequentes apresentam $H_s = 0,66$ m e período médio de $T_m = 6,30$ s. Na figura 3(b) está o espectro de frequência obtido no dia 23/08/2014, que possui as características mais semelhantes aos valores frequentes da série anual apresentada na figura 3(a). As características de onda da figura 3(a) são definidas como as ondas regulares representativas do estado de mar do Rio Grande, também desses valores é determinado λ pela equação da dispersão.

Para aplicar a série η no software ANSYS Fluent, é necessário transformar os dados de elevação nas componentes da velocidade horizontal e vertical, u e w , respectivamente, ao longo do tempo. Essas componentes da velocidade serão impostas como CC de velocidade de entrada. Mais informações acerca da transformação de dados de η para u e w podem ser encontradas em Machado *et al.* (2021) e Oleinik *et al.* (2021).

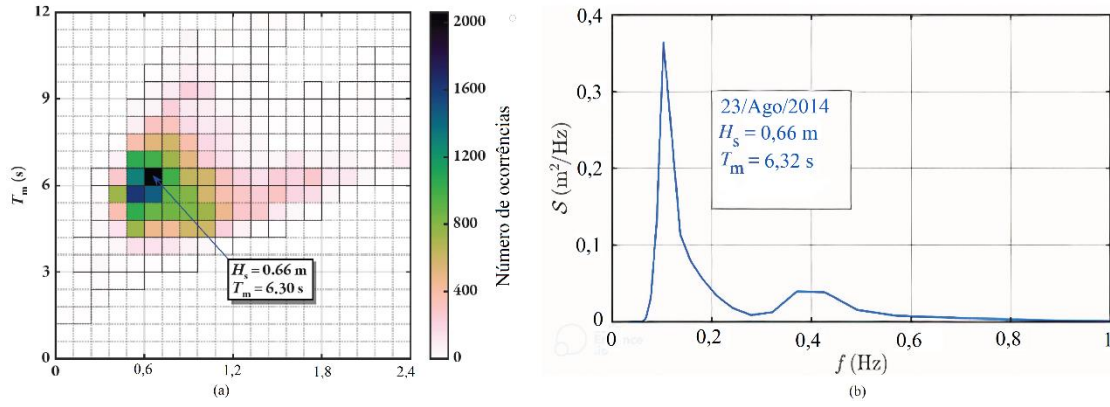


Figura 3: (a) Histograma com a H_s e período médio das ondas do estado de mar realístico; (b) Densidade espectral da frequência f do estado de mar realístico em 23 de agosto de 2014 às 00:00; [Adaptado de Maciel *et al.* (2023)].

3 METODOLOGIA

Na seção é apresentado o modelo computacional, a análise estatística dos resultados e a metodologia dos testes da influência da posição da PN em relação à PHS nos resultados publicados por Thum *et al.* (2024). Considerando os casos extremos publicados pelos autores, foi analisado o efeito da PN sobre os valores da H_s das ondas após a PHS e a velocidade axial abaixo da placa para os casos $1L_p$ e $3L_p$ sob a incidência de ondas irregulares.

3.1 Modelo Computacional

As simulações numéricas foram realizadas no software ANSYS Fluent, que é um pacote de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) baseado no MVF. O software soluciona as equações diferenciais do escoamento de conservação da massa, da quantidade de movimento e a equação do transporte de fração volumétrica. As hipóteses de simplificação para solução numérica do presente modelo são: escoamento isotérmico, laminar, incompressível, bidimensional e transiente. A equação da energia não é resolvida, visto que não há transferência de calor. Dessa forma, as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento, são definidas, respectivamente, como (Versteeg e Malalasekera, 1981):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\nabla \cdot \vec{v}) \vec{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad (2)$$

onde ρ é a massa específica do fluido [kg/m^3], \vec{v} é o vetor velocidade [m/s], p é a pressão [Pa], μ é a viscosidade dinâmica [$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$], $\vec{\tau}$ é o tensor de deformação [N/m^2], e \vec{S} é o termo sumidouro [N/m^3].

Para a interação entre a água e o ar foi adotado o modelo VOF proposto por Hirt e Nichols (1981). Esse tem a premissa que o volume de um fluido (q^0) não pode ocupar o volume de outro fluido, o que é representado em cada volume de controle do canal numérico pela fração volumétrica (α). O transporte da fração volumétrica é então considerado no modelo numérico (Srinivasan *et al.*, 2011):

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

Assim, para que as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento sejam resolvidas, valores médios para a massa específica e viscosidade são calculados da seguinte forma (Srinivasan *et al.*, 2011):

$$\rho = \alpha \rho_{\text{água}} + (1 - \alpha) \rho_{\text{ar}} \quad (4)$$

$$\mu = \alpha \mu_{\text{água}} + (1 - \alpha) \mu_{\text{ar}} \quad (5)$$

A figura 4 apresenta um esquema da geometria do canal numérico bidimensional com a PHS e as CC aplicadas ao modelo. Para o estudo de caso de Thum *et al.* (2024), assim como no presente estudo, as dimensões delimitadas na figura 4 são: altura do canal de ondas, $H_c = 12$ m; comprimento do canal de ondas, $L_c = 258$ m; profundidade do canal, $d = 9,52$ m; distância horizontal da entrada do canal até o início da PHS, $X_p = 2\lambda = 103,2$ m; comprimento da PHS, $1L_p = 3,45$ m e $3L_p = 10,37$ m; profundidade da PHS, $h_p = 0,9$ m; $d = 8,568$ m; espessura da PHS, $e_p = H_s/3 = 0,223$ m; comprimento da PN $L_{\text{praia}} = 2,5 \lambda = 129$ m.

Em relação às CC, para o fundo do canal e o contorno da PHS, na cor azul, é atribuída a condição de impermeabilidade, ou seja, não há transporte de massa através destas superfícies. A linha tracejada verde é uma saída de pressão. Na lateral direita do canal há uma saída de pressão, linha pontilhada preta, com profundidade constante, denominada perfil hidrostático.

O gerador de ondas numérico, localizado na lateral esquerda do canal, representado com hachura vermelha e branca, é considerado uma entrada de velocidade. Machado *et al.* (2021) explicam que para a metodologia WaveMIMO a inserção das velocidades como CC é através de perfis de velocidade prescritos com dados discretos para cada componente da velocidade, u e w , ao longo do tempo. No presente estudo são aplicadas 10 subdivisões na região de entrada do canal, conforme recomendação de Maciel *et al.* (2021).

A CC de PN, região hachurada em rosa na figura 4, permite o amortecimento das ondas, evitando a reflexão de ondas. O amortecimento das ondas é em uma região limitada de $2,5\lambda$ conforme recomendação de Machado *et al.* (2021). É no termo sumidouro (S) da equação (2) que a CC de PN é adicionada ao modelo, dado por (Zwart *et al.*, 2007; e Park *et al.*, 1999):

$$S = \left[C_1 \rho \vec{v} + \frac{1}{2} C_2 |\vec{v}| \vec{v} \right] \left(1 - \frac{z - z_\eta}{z_b - z_\eta} \right) \left(\frac{x - x_s}{x_e - x_s} \right)^2 \quad (6)$$

onde C_1 [s^{-1}] e C_2 [m^{-1}] são os coeficientes de amortecimento linear e quadrático, z_η e z_b são as posições verticais de η e do fundo, respectivamente, x_s e x_e são as posições horizontais do início e do fim da PN, respectivamente. Foram adotados valores de $C_1 = 20 \text{ s}^{-1}$ e $C_2 = 0 \text{ m}^{-1}$ conforme recomendado por Lisboa *et al.* (2016).

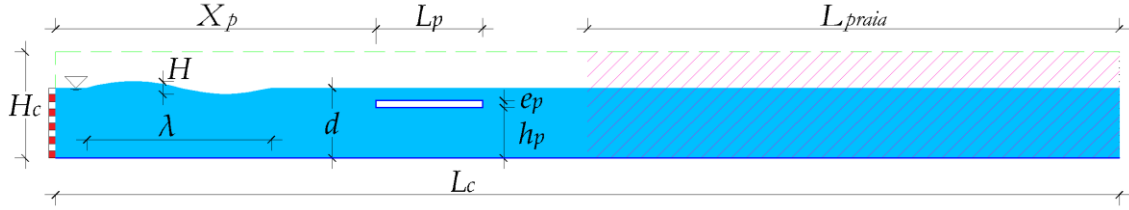


Figura 4: Geometria e condições de contorno do canal com Placa Horizontal Submersa.

A discretização espacial utilizou a metodologia de malha *stretched* assim como Gomes *et al.* (2018) e baseada em Mavriplis (1997), onde a discretização da malha é aumentada nas regiões de maior variação ou interesse de resultados, de forma a reduzir o esforço computacional. Para o presente estudo, a malha *stretched* é empregada em todo o canal e, na região da PHS, a discretização horizontal é dada através de elementos de 0,05 m, garantindo a captura do comportamento hidrodinâmico no entorno do dispositivo (Martins *et al.*, 2022).

O esquema *Upwind* de primeira ordem foi aplicado para a discretização das derivadas espaciais das equações de transporte e a formulação implícita de primeira ordem foi adotada para a discretização temporal (Maliska, 2017). Os fatores de sub-relaxação para a solução das equações de conservação da massa e da quantidade de movimento foram, respectivamente, 0,3 e 0,7. Foi utilizado o modelo VOF com formulação explícita e os fluxos nas células são interpolados com o esquema de reconstrução geométrica (*Geo-reconstruct*). Com o esquema *Pressure Staggering Option (PRESTO)*, interpolou-se a pressão nas arestas de cada célula. Para o acoplamento pressão-velocidade foi adotado o método *Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO)* (Gomes *et al.*, 2018; Maciel *et al.*, 2023; Seibt *et al.*, 2023).

O passo de tempo utilizado nas simulações foi de 0,01 s para o estudo de caso. O tempo computacional médio foi de 33,6 h considerando um computador com processador Intel Core i7-8700K 3.70 GHz e 32 GB de memória.

3.2 Análise Estatística

A exatidão do modelo computacional em relação aos dados de referência foi avaliada utilizando o Erro Médio Absoluto (*Mean Absolute Error* - MAE) e o Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error* - RMSE), permitindo a verificação deste (Chai e Draxler, 2014); já para a variação da H_s foi calculado o Erro Relativo Percentual (ERP) (Kar e Els, 2012), definidos, respectivamente, por:

$$\text{MAE} = \frac{\sum |O_i - R_i|}{n} \quad (7)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{(\sum |O_i - R_i|)^2}{n}} \quad (8)$$

$$\text{ERP} = 100 \frac{O_i - R_i}{R_i} \quad (9)$$

onde O_i e R_i são, respectivamente, os valores obtidos numericamente e os valores de referência.

A H_s é um parâmetro que caracteriza o estado de mar e significa a altura média do terço superior de uma série de alturas de ondas (Dean e Dalrymple, 1991). Para determinar a H_s dos resultados numéricos obtidos foi utilizado o software OCEANLYZ. Esse software possui ferramentas para analisar dados de séries temporais de ondas monitoradas através de boias ou em laboratório. O OCEANLYZ possui uma interface gráfica que permite a análise espectral e de ondas usando o método *zero crossing* para a identificação e caracterização de cada onda da série (Karimpour, 2024).

3.3 Validação e Verificações

Este estudo considera o mesmo modelo computacional validado e verificado por Thum *et al.* (2024). Os autores apresentaram a validação em escala de laboratório a partir do estudo de Orer e Ozdamar (2007); enquanto a verificação do canal em escala real foi realizada a partir do estudo numérico de Seibt *et al.* (2023); e, por fim, verifica-se a geração do estado de mar realístico e do software Oceanlyz através do cálculo da H_s .

O presente estudo limita-se à verificação da geração das ondas através da metodologia WaveMIMO para as simulações do canal numérico, com a PHS, para a nova geometria do teste da PN. A elevação da superfície livre na entrada do canal é comparada com a série η do TOMAWAC que originou os perfis de velocidade para condição de contorno.

3.4 Metodologia do Estudo de Caso

Conforme discutido em Thum *et al.* (2024), houve alterações na H_s após a PHS. A sonda localizada 10 m a jusante foi comparada com a sonda 10 m a montante da PHS

para análise da função de quebra-mar. A sonda com posição fixa em todos os casos, que é localizada após a PHS e as sondas do quebra-mar, foram avaliadas como a H_s das ondas que atingem a costa. No modelo publicado pelos autores a sonda fixa ($x = 128,63$ m) está muito próxima da PN que inicia em $x = 129$ m.

Portanto, o questionamento que conduziu à presente investigação é “como a H_s pode aumentar após a placa se não há fonte de energia durante a propagação?”. O interesse do presente estudo, portanto, se resume a determinar se há algum efeito do próprio modelo computacional distorcendo os resultados numéricos.

Como ponto de partida para a determinação das possíveis influências do modelo está a proximidade do início da PN com o dispositivo PHS, em especial no caso de maior comprimento, $3L_p$. Esse caso analisado pelos autores tem uma distância de 15,43 m entre o fim da PHS e o início da PN, o que é 31% a menos que a menor PHS avaliada, $1L_p$, que tem 22,343 m de distância da PHS até a PN. Em ambos os casos, a proximidade entre as sondas a jusante da PHS e a própria CC da PN é notável. Para avaliar a possível interferência entre a hidrodinâmica da PHS e a PN o presente estudo emprega um domínio computacional, baseado no apresentado em Thum *et al.* (2024), com a uma maior distância entre o fim da PHS e o início da PN, correspondente à 1λ .

As simulações mantiveram a solução numérica no ANSYS Fluent, com a nova geometria, onde foi considerado o mesmo estado de mar realístico (ondas irregulares), o mesmo passo de tempo e mesmos parâmetros de solução apresentados Thum *et al.* (2024). O monitoramento da elevação da superfície livre (10 m a jusante da PHS; em $x = 128,63$ m; e no início da PN) e da velocidade axial abaixo da PHS (na profundidade $z = 4,284$ m) foi realizado em pontos estratégicos, garantido a comparação com os resultados previamente publicados e a verificação do próprio estado de mar realístico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da verificação da geração das ondas irregulares com a geometria proposta no presente estudo e os resultados do teste propriamente ditos. Os resultados da H_s das ondas e a velocidade axial máxima abaixo da PHS são apresentados para os casos $1L_p$ e $3L_p$ e comparados com os obtidos por Thum *et al.* (2024).

4.1 Verificação da Geração da Onda

A figura 5 apresenta a elevação da superfície livre para os casos $1L_p$ e $3L_p$ da nova geometria e a elevação do TOMAWAC, que são os resultados de referência para ondas irregulares. Qualitativamente, as elevações da superfície livre obtidas através das simulações do presente teste são similares aos dados de referência. Quantitativamente, os resultados numéricos apresentaram, para o caso $1L_p$ uma diferença de $MAE = 0,107$ m e $RMSE = 0,136$ m em relação aos dados oriundos do TOMAWAC, enquanto o caso $3L_p$

obteve uma diferença de $MAE = 0,146$ m e $RMSE = 0,183$ m em relação aos dados do TOMAWAC. Os resultados estão consistentes com os encontrados por Maciel *et al.* (2023), Cisco *et al.* (2022) e Hubner *et al.* (2022).

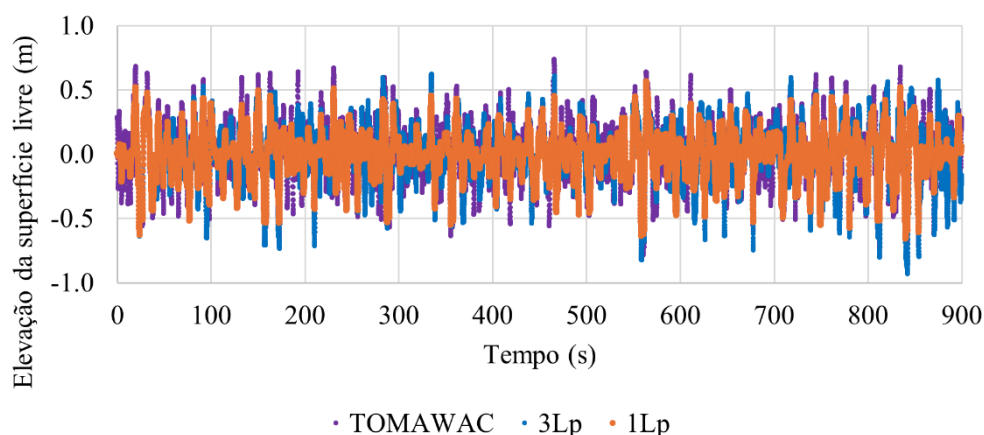


Figura 5: Verificação da elevação da superfície livre na entrada do canal.

Considera-se, a partir dos resultados qualitativos e quantitativos, que o modelo computacional está verificado. O modelo de referência, publicado por Thum *et al.* (2024), foi validado e verificado sem a presença da PHS, garantindo a não interferência do dispositivo na geração de ondas. Já no presente estudo, o aumento nos valores de MAE e RMSE está relacionado à presença da PHS na simulação considerada para o procedimento de verificação. Apesar da adição da PHS, avalia-se como importante esse processo de análise da geração da onda para observar a coerência do modelo com o estudo de referência.

4.2 Influência da PN na H_s

Em relação ao teste da influência da PN, a tabela 2 apresenta os resultados da H_s para a nova geometria e o comparativo com os resultados de Thum *et al.* (2024). Em todas as simulações houve um aumento do valor de H_s próximo ao início da PN, tanto no presente estudo (ver 5ª coluna) quanto nos resultados publicados já que a sonda fixa estava muito próxima da PN. A sonda no fim do canal (6ª coluna) mostra que a PN está atenuando as ondas da forma adequada. A H_s entre as sondas 10 m a jusante e a sonda fixa foi praticamente constante para o teste da PN, com uma diferença de 0,76% e 0,001% nos casos 1L_p e 3L_p, respectivamente. Já nos resultados publicados por Thum *et al.* (2024) os valores de H_s entre as mesmas sondas variava em 2,66% e 4,18%, respectivamente. Os resultados com “-” significam que não foram publicados no estudo de referência.

A tabela 3 apresenta a porcentagem de redução da H_s após a propagação sobre a PHS, para a simulação com ondas irregulares, tanto para os dados publicados por Thum *et al.* (2024) quanto para o presente teste da influência da PN. Analisando a PHS na função de quebra-mar, através da sonda a montante da PHS ($x = 93,2$ m) e a sonda

10 m a jusante, para ambos os casos do presente estudo, a porcentagem de redução de H_s é maior do que nos resultados publicados anteriormente.

O caso $1L_p$ teve um acréscimo de 2,62% na redução na H_s após a PHS, demonstrando uma melhoria na função de quebra-mar do dispositivo. Assim como o caso $3L_p$ teve um aumento de 0,39% na redução da H_s no ponto de monitoramento 10 m a jusante.

Tabela 2: Comparação dos resultados da H_s (m) para os casos $1L_p$ e $3L_p$ no presente estudo e em Thum *et al.* (2024), considerando ondas irregulares.

Caso	$x = 93,2$ m	$x = 10$ m a jusante	$x = 128,63$ m (sonda fixa)	$x = \text{início}$ da PN	$x = \text{fim do}$ canal
Teste PN $1L_p$	0,6687	0,6210	0,6163	0,6287	0,0039
$1L_p$ Thum <i>et al.</i> (2024)	0,6620	0,6321	0,6489	-	-
Teste PN $3L_p$	0,8120	0,5200	0,5200	0,5430	0,0040
$3L_p$ Thum <i>et al.</i> (2024)	0,8289	0,5339	0,5116	-	-

Tabela 3: Porcentagem da redução de H_s para os casos $1L_p$ e $3L_p$ no presente estudo e em Thum *et al.* (2024), considerando ondas irregulares.

Caso	$x = 93,2$ m	$x = 10$ m a jusante	$x = 128,63$ m (sonda fixa)	$x = \text{início da}$ PN	$x = \text{fim do}$ canal
Teste PN $1L_p$	-	-7,13	-7,84	-5,98	-
$1L_p$ Thum <i>et al.</i> (2024)	-	-4,52	-1,98	-	-
Teste PN $3L_p$	-	-35,96	-35,96	-33,04	-
$3L_p$ Thum <i>et al.</i> (2024)	-	-35,59	-38,28	-	-

As figuras 6 e 7 apresentam, as elevações da superfície livre a montante ($x = 93,2$ m) e 10 m a jusante da PHS para os casos avaliados no teste da PN, $1L_p$ e $3L_p$, respectivamente. Em ambas as figuras é visível que a sonda a montante tem elevações maiores do que sonda a jusante, o que está de acordo com o princípio físico da PHS como quebra-mar. A baixa eficiência do caso $1L_p$ na redução da energia das ondas permanece conforme Thum *et al.* (2024). Já o caso $3L_p$ apresenta uma redução mais significativa nas ondas assim como em Thum *et al.* (2024).

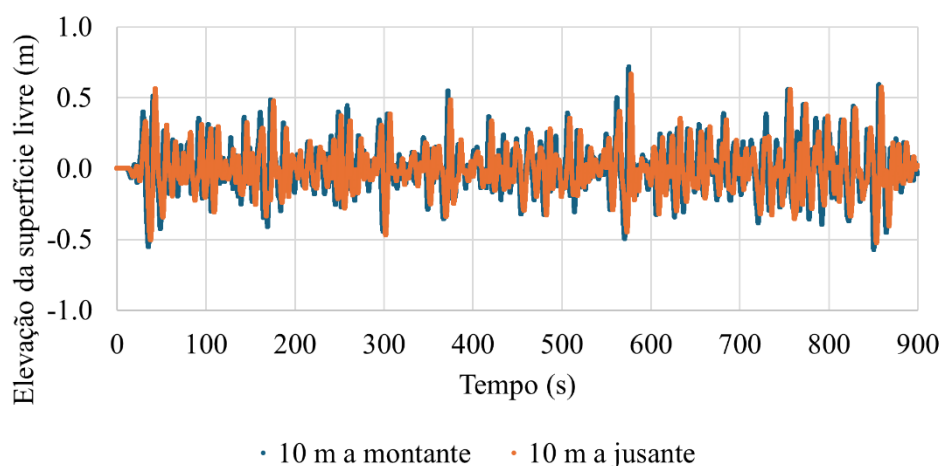


Figura 6: Elevação da superfície livre das sondas 10 m à montante e jusante para o caso $1L_p$.

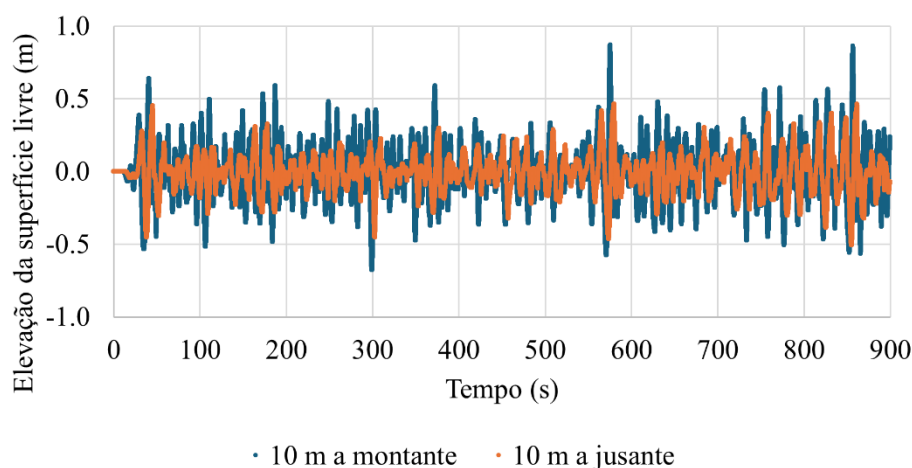


Figura 7: Elevação da superfície livre das sondas 10 m à montante e jusante para o caso $3L_p$.

4.3 Influência da PN na Velocidade Axial Abaixo da PHS

A velocidade axial máxima encontrada no presente estudo quando considerado o caso $1L_p$, no sentido contrário à propagação da onda, foi de 0,539 m/s. Esta variação representa um ERP = - 9,41% em relação ao valor apresentado por Thum *et al.* (2024), que foi de 0,595 m/s. Já, no caso $3L_p$, a velocidade axial máxima, no sentido contrário à propagação da onda, foi de 0,569 m/s. Esta variação representa um ERP = -3,19% em relação ao valor publicado por Thum *et al.* (2024), que foi de 0,588 m/s. Deste modo, o resultado encontrado para o caso $1L_p$ foi a alteração mais significativa entre as comparações que se referem a velocidade axial máxima, apesar de que, fisicamente, significa uma variação de 0,05 m/s.

Outra análise realizada é a comparação das velocidades axiais ao longo do tempo com os resultados de Thum *et al.* (2024), ou seja, os valores de MAE e RMSE consideram a

série completa de 900 s. Para o caso $1L_p$ o monitoramento do presente estudo obteve variações de $MAE = 0,04$ m/s e $RMSE = 0,05$ m/s. Já o caso $3L_p$ apresentou variações de $MAE = 0,02$ m/s e $RMSE = 0,03$ m/s.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo apresenta um teste sobre a influência da CC de PN na H_s e velocidade axial abaixo da PHS em relação ao estudo numérico de Thum *et al.* (2024). Foram comparados os casos $1L_p$ e $3L_p$. Em Thum *et al.* (2024) as maiores variações encontradas estão nos casos $2,5L_p$ e $3L_p$. O ponto de discussão foram as variações da H_s entre as duas sondas a jusante da PHS, pois os valores não decresciam linearmente em todos os casos.

Com relação às análises qualitativas e quantitativas, os resultados do presente estudo têm valores de H_s após a PHS mais constantes do que o referencial. Ou seja, há sim um efeito da PN sobre os resultados publicados por Thum *et al.* (2024). No entanto, esses valores não são significativos na perspectiva da estatística para engenharia, que usualmente considera margem de erro de 5%. A H_s na sonda localizada 10 m a jusante da PHS apresentou uma variação de 2,67%, quando caso $1L_p$, em comparação com o resultado de referência; e a mesma sonda apresentou uma variação de 0,37% para o caso $3L_p$. Ficou explícita a elevação da H_s próximo e no início da PN. Portanto, considerar os valores da sonda fixa ($x = 128,63$ m) de Thum *et al.* (2024) como a H_s das ondas que chegam à costa está equivocado pois tem o efeito da PN neste valor, ainda que seja inferior a 5%.

A análise da velocidade axial máxima no caso $1L_p$ publicada está com uma influência maior do que 5% devido à PN. Ao analisar a velocidade ao longo do tempo tem-se resultados de MAE e RMSE baixos, ou seja, a influência da PN foi de, no máximo, 0,05 m/s.

Portanto, para a análise pontual sobre a influência da PN nos resultados publicados considera-se que não há um efeito substancial. Todavia, a distorção da PN não está descartada, pois pode se acumular de forma negativa, somada a outras influências como: mudança repentina do refino da malha na região da placa; posição inicial da PHS; e baixa variação no comprimento relativo da PHS com a onda regular representativa. Serão necessários esses outros testes para garantir um modelo sem distorções numéricas.

AGRADECIMENTOS

G. Ü. Thum agradece à CAPES pela bolsa de mestrado (código de financiamento 001). L. A. O. Rocha, E. D. dos Santos, e L. A. Isoldi agradecem ao CNPq pelas bolsas de produtividade (processos: 307791/2019-0, 308396/2021-9, e 309648/2021-1, respectivamente). Os autores também agradecem ao CNPq (Chamada CNPq/MCTI N° 10/2023—Universal, Processo: 403408/2023-7), FAPERGS (Chamada Pública 07/2021—Programa Pesquisador Gaúcho—PqG, processo: 21/2551-0002231-0), e UFRGS (Edital PROPESQ/UFRGS 2019—Programa Institucional de Auxílio à Pesquisa de Docentes Recém-Contratados pela UFRGS) por seu suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- Chai, T. e R. R. Draxler (2014). “Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature”. Em: *Geosci. Model Dev.* 7, pp. 1247–1250.
- Cisco, L.A., R. P. Maciel, P. H. Oleinik, E. D. Dos Santos, M. N. Gomes, L. A. O. Rocha, L. A. Isoldi, e B. N. Machado (2022). “Numerical Analysis of the Available Power in an Overtopping Wave Energy Converter Subjected to a Sea State of the Coastal Region of Tramandaí, Brazil”. Em: *Fluids* 7, 359.
- Dean, R. G. e R. A. Dalrymple (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. v. 2. 353 p.
- Gomes, M. D. N., G. Lorenzini, L. A. O. Rocha, E. D. D. Santos e L. A. Isoldi (2018). “Constructal Design Applied to the Geometric Evaluation of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter Considering Different Real Scale Wave Periods”. Em: *Journal of Engineering Thermophysics* 27.2, pp. 173–190.
- González, A. T., P. Dunning, I. Howard, K. McKee e M. Wiercigroch (2021). “Is wave energy untapped potential?” Em: *International Journal of Mechanical Sciences* 205, 106544.
- Graw, K. (1994). “Is the submerged plate wave energy converter ready to act as a new coastal protection system?” Em: *Anais do XXIV Convegno Di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. XXIV Convegno Di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*. Napoli: Italy.
- Greene, T. R. e A. E. Heins (1953). “Water waves over a channel of infinite depth”. Em: *Applied Mathematics* XI.2, pp. 201–214.
- Heins, A. E. (1950). “Water waves over a channel of finite depth with a submerged plane barrier”. Em: *Canadian Journal of Mathematics* 2, pp. 210–222.
- Hirt, C. W. e B. D. Nichols (1981). “Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries”. Em: *Journal of Computational Physics* 39, pp. 201–225.
- Hubner, R.G., C. Fragassa, M. D. S. Paiva, P. H. Oleinik, M. D. N. Gomes, L. A. O. Rocha, E. D. D. Santos, B. N. Machado, e L. A. Isoldi (2022). “Numerical Analysis of an Overtopping Wave Energy Converter Subjected to the Incidence of Irregular and Regular Waves from Realistic Sea States”. Em: *J. Mar. Sci. Eng.* 10, 1084.
- Kar, C. J. e P. S. Els (2012). “Validation metric based on relative error”. Em: *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems* 18.5, pp. 487–520.
- Karimpour, A. ([s.d.]). “OCEANLYZ Software”. Disponível em: <https://sites.google.com/view/oceanlyz>.
- Machado, B. N., P. H. Oleinik, E. de P. Kirinus, E. D. D. Santos, L. A. O. Rocha, M. D. N. Gomes, J. M. P. Conde, e L. A. Isoldi (2021). “WaveMIMO Methodology: numerical wave generation of a realistic sea state”. Em: *Journal of Applied and Computational Mechanics* 7.4, pp. 2129–2148.

- Maciel, R. P., C. Fragassa, B. N. Machado, L. A. O. Rocha, E. D. D. Santos, M.D. N. Gomes, e L. A. Isoldi (2021). “Verification and validation of a methodology to numerically generate waves using transient discrete data as prescribed velocity boundary condition”. Em: *Journal of Marine Science and Engineering* 9.8, 896.
- Maciel, R. P., P. H. Oleinik, E. D. D. Santos, L. A. O. Rocha, B. N. Machado, M. D. N. Gomes, e L. A. Isoldi (2023). “Constructal design applied to an oscillating water column wave energy converter device under realistic sea state conditions”. Em: *Journal of Marine Science and Engineering* 11.11, 2174.
- Maliska, C. R. (2017). *Transferência de Calor e Mecânica dos Flúidos Computacional*. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC. 438 p.
- Martins, J.C., C. Fragassa, C., M. M. Goulart, E. D. dos Santos, L. A. Isoldi, M. das Neves Gomes, e L. A. O. Rocha (2022). “Constructal Design of an Overtopping Wave Energy Converter Incorporated in a Breakwater”. Em: *J. Mar. Sci. Eng.* 10, 471.
- Mavriplis, D. J. (1997). “Unstructured Grid Techniques”. Em: *Annual Reviews Fluid Mechanics* 29, pp. 473–514.
- Oleinik, P. H., G. P. Tavares, B. N. Machado, e L. A. Isoldi (2021). “Transformation of Water Wave Spectra into Time Series of Surface Elevation”. Em: *Earth* 2.4, pp. 997–1005.
- Orer, G. e A. Ozdamar (2007). “An experimental study on the efficiency of the submerged plate wave energy converter”. Em: *Renewable Energy* 32.8, pp. 1317–1327.
- Park, J. C., M. H. Kim, e H. Mitaya (1999). “Fully non-linear free surface simulation by a 3D viscous numerical wave tank”. Em: *International Journal for Numerical Method in Fluids* 29, pp. 685–703.
- Seibt, F. M., E. D. D. Santos, L. A. Isoldi, e L. A. O. Rocha (2023). “Constructal Design on full-scale numerical model of a submerged horizontal plate-type wave energy converter”. Em: *Marine Systems & Ocean Technology* 18.1–2, pp. 1–13.
- Srinivasan, V., A. J. Salazar, e K. Saito (2011). “Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology”. Em: *Applied Mathematical Modelling* 35, pp. 3710–3730.
- Thum, G. Ü., R. P. Maciel, P. H. Oleinik, L. A. O. Rocha, E. D. D. Santos, F. M. Seibt, B. N. Machado, e L. A. Isoldi (2024). “Numerical analysis of the submerged horizontal plate device subjected to representative regular and realistic irregular waves of a sea state”. Em: *Fluids* 9.8, 188.
- United Nations (2015). *Agenda 2030 for Sustainable Development Goals*. Resolution 70/1, AG Index: A/RES/70/1. United Nation General Assembly, 35.
- Versteeg, H. K., e W. Malalasekera (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics—The Finite Volume Method*. Londres: Pearson Education Limited.
- Zwart, P. J., P. G. Godin, J. Penrose, e S. H. Rhee (2007). “Ship hull simulations with a coupled solution algorithm”. Em: *10th International Symposium on Practical Designs of Ships and Other Floating Structures*, Houston: USA.