Universidade Federal do Rio Grande
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Análise numérica do dispositivo Placa Horizontal Submersa sujeito a ondas regulares representativas e irregulares realísticas de um estado de mar

Dissertação de:
Gabrielle Ücker Thum

Orientador:
Liércio André Isoldi

Coorientadora:
Bianca Neves Machado

Maio de 2025

Dissertação - PPGEO – FURG

Gabrielle Ücker Thum
Mestre em Engenharia Oceânica

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

gov.br Documento assinado digitalmente
ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS
Data: 04/06/2025 16:33:29-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Elizaldo Domingues dos Santos
Coordenador do PPGEO

Banca examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
LIERCIO ANDRE ISOLDI
Data: 05/06/2025 09:14:07-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Orientador — PPGEO/FURG

gov.br Documento assinado digitalmente
BIANCA NEVES MACHADO
Data: 05/06/2025 20:25:19-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.ª Dr.ª Bianca Neves Machado
Coorientadora — PPGEO/UFRGS

gov.br Documento assinado digitalmente
ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS
Data: 04/06/2025 16:32:29-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Membro Interno — PPGEO/FURG

gov.br Documento assinado digitalmente
ANDRE LUIS RAZERA
Data: 03/06/2025 09:52:29-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Andre Luis Razera
Membro Interno — PPGEO/FURG

gov.br Documento assinado digitalmente
FLAVIO MEDEIROS SEIBT
Data: 01/06/2025 19:10:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Flavio Medeiros Seibt
Membro Externo — Petrobras

Rio Grande, 28 de maio de 2025

Ficha Catalográfica

T534a Thum, Gabrielle Ücker
Análise numérica do dispositivo Placa Horizontal Submersa sujeito a ondas regulares representativas e irregulares realísticas de um estado de mar / Gabrielle Ücker Thum. – 2025.
118 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio Grande/RS, 2025.
Orientador: Dr. Liércio André Isoldi.
Coorientadora: Dra. Bianca Neves Machado.

1. Dinâmica dos Fluidos Computacional 2. Quebra-mar 3. Conversor de energia das ondas 4. Placa Horizontal Submersa 5. Metodologia WaveMIMO I. Isoldi, Liércio André II. Machado, Bianca Neves III. Título.

CDU 551.46

Catalogação na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

A Terra está falando, ela nos diz que não temos mais tempo.

Txai Suruí

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela bolsa de mestrado e pelo apoio através do Código de Financiamento 001.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Liércio André Isoldi, pela paciência, confiança, inúmeras contribuições e direcionamento durante todo o processo da pesquisa. Além das contribuições e exemplo de escrita e discussão nas análises de dados, se um dia eu chegar à metade da organização e qualidade dos teus textos, venci na vida.

À minha coorientadora, Prof.ª Dr.ª Bianca Neves Machado, pelo olhar atento nas revisões e apoio nas simulações. Agradeço o empenho com a metodologia WaveMIMO e dedicação para aprimorar a modelagem desta inovação.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica pelos importantes ensinamentos.

Aos meus colegas pela parceria e importantes trocas de experiências durante as disciplinas e execução das simulações do presente estudo.

Às minhas amigas por dividir a vida há tantos anos, trazerem a diversão na minha vida e compreensão nas ausências.

Ao meu irmão Guilherme, minha mãe Márcia e meu pai Carmo, por todo o suporte, carinho e incentivo pela minha evolução nesta jornada. Obrigada aos meus pais, em especial, por terem trabalhado tanto que hoje eu pude chegar até aqui de forma mais fácil e rápida. Eu amo vocês.

Resumo

Gabrielle Ücker Thum

ANÁLISE NUMÉRICA DO DISPOSITIVO PLACA HORIZONTAL SUBMERSA SUJEITO A ONDAS REGULARES REPRESENTATIVAS E IRREGULARES REALÍSTICAS DE UM ESTADO DE MAR

Este estudo contribui para o estado da arte já que a literatura carece de estudos sobre dispositivos PHS sob a incidência de ondas irregulares realísticas. O estudo analisa numericamente um dispositivo de Placa Horizontal Submersa (PHS) sujeito a ondas regulares representativas e irregulares realísticas de um estado de mar. Este dispositivo pode ser utilizado como um quebra-mar (QM) e/ou como um conversor de energia das ondas (CEO). A metodologia WaveMIMO foi aplicada para a geração numérica e propagação de ondas do estado do mar da costa de Rio Grande (RS), município no sul do Brasil. O Método de Volumes Finitos foi empregado para resolver as equações de conservação da massa, da quantidade de movimento e do transporte da fração volumétrica. O modelo multifásico *Volume of Fluid* foi empregado para lidar com a mistura água-ar. A análise dos efeitos do comprimento da PHS (L_p) na hidrodinâmica do dispositivo foram realizados em cinco casos. Os resultados indicam que considerar apenas ondas regulares em estudos numéricos é insuficiente para determinar com precisão o comportamento hidrodinâmico real. A PHS demonstrou sua maior eficiência de QM na redução da altura significativa da onda em $3L_p$ para ondas regulares e irregulares realísticas. Como CEO, atingiu a maior velocidade axial em $3L_p$ para ondas regulares e $1{,}5L_p$ e $2L_p$ para ondas irregulares realísticas. A melhor eficiência da PHS na análise conjunta como QM e CEO foi o caso $3L_p$ para ondas regulares e $2{,}5L_p$ para ondas irregulares realísticas.

Palavras-chave: Dinâmica dos Fluidos Computacional; Quebra-mar; Conversor de energia das ondas; Placa Horizontal Submersa; Metodologia WaveMIMO.

Abstract

Gabrielle Ücker Thum

NUMERICAL ANALYSIS OF THE SUBMERGED HORIZONTAL PLATE DEVICE SUBJECTED TO REGULAR REPRESENTATIVE AND IRREGULAR REALISTIC WAVES OF A SEA STATE

This study contributes to the state of the art since literature lacks studies on SHP devices under the incidence of realistic irregular waves. The study numerically analyzes a Submerged Horizontal Plate (SHP) device subjected to regular and realistic irregular waves of a sea state. This device can be used either as a breakwater (BW) and/or as a wave energy converter (WEC). The WaveMIMO methodology was applied to the numerical generation and wave propagation of the sea state of the coast of Rio Grande (RS), a municipality in southern Brazil. The Finite Volume Method (FVM) was applied to solve the transport equations for volume fraction, momentum, and mass. The Volume of Fluid (VOF) multiphase model was employed to represent the interaction between water and air. The analysis of the effects of the length of the SHP (L_p) on the device hydrodynamics was performed in five different lengths. Results indicate that relying solely on regular waves in numerical studies is insufficient for accurately determining the real hydrodynamic behavior. The SHP demonstrates its highest BW efficiency in reducing the significant wave height at $3L_p$ for regular waves and realistic irregular waves. As a WEC, it achieves its highest axial velocity at $3L_p$ for regular waves and $1{,}5L_p$ and $2L_p$ for realistic irregular waves. The efficiency of the SHP as BW together with WEC is the biggest at $3L_p$ for regular waves and $2{,}5L_p$ for realistic irregular waves.

Keywords: Computational Fluid Dynamics; Breakwater; Wave Energy Converter; Submerged Horizontal Plate; WaveMIMO methodology.

Sumário

Página

Lista de Figuras **XII**

Lista de Tabelas **XV**

Lista de Símbolos **XVIII**

Lista de Siglas **XX**

1| Introdução **1**
1.1 Princípio hidrodinâmico da PHS 3
1.2 Objetivo geral do estudo 14
1.2.1 Objetivos específicos do estudo 14

2| Fundamentação teórica **15**
2.1 Ondas marítimas 15
2.1.1 Ondas Lineares - Onda de Airy 17
2.1.2 Ondas Regulares – Teoria de Stokes de 2ª ordem 18
2.1.3 Ondas Irregulares 20
2.2 Dispositivos conversores da energia das ondas (CEO) 23
2.3 Estado da arte da Placa Horizontal Submersa 5
2.3.1 Principais referências para o presente estudo 6
2.3.2 PHS na função de QM 7
2.3.3 PHS na função de CEO 8
2.3.4 PHS como QM e CEO 10
2.3.5 PHS sob incidência de ondas de alta ordem ou irregulares 12

3| Modelagem matemática e numérica **26**
3.1 Estado de mar realístico (metodologia WaveMIMO) 26
3.2 Modelo computacional 30
3.3 Análises estatísticas 33

4| Verificações e validação **35**
4.1 Verificação da metodologia WaveMIMO 35
4.2 Verificação do software OCEANLYZ 39
4.3 Validação do modelo computacional em escala de laboratório com a PHS 39
4.4 Verificação do modelo computacional em escala real com a PHS 42

5| Estudo de caso **45**
5.1 Primeira formulação (1ªF) do domínio computacional _____ 45
5.1.1 Discussão dos resultados da 1ªF _____ 49
5.2 Segunda formulação (2ªF) do domínio computacional _____ 51
5.2.1 Teste da influência da PN na hidrodinâmica do dispositivo PHS _____ 53
5.2.2 Segunda formulação (2ªF) - Ondas regulares representativas do estado de mar _____ 57
5.2.3 Segunda formulação (2ªF) - Ondas irregulares realísticas do estado de mar _____ 64
5.3 Análise integral dos resultados da 2ªF _____ 73
5.3.1 Ondas regulares representativas _____ 73
5.3.2 Ondas irregulares realísticas _____ 76

6| Conclusões **78**

Referências **81**

Apêndice A - Resultados da 1ª Formulação do Domínio Computacional **87**

Lista de Figuras

Figura 1.1: Distribuição da potência média anual por metro de frente de onda ao longo da costa brasileira. 2

Figura 1.2: Dispositivo Placa Horizontal Submersa. 5

Figura 2.1: Características das ondas regulares. 16

Figura 2.2: Diagrama de validade das principais teorias de ondas. 19

Figura 2.3: Somatório de ondas harmônicas (monocromáticas) com amplitude e fase constantes, porém aleatórias, criam a superfície irregular do mar. 20

Figura 2.4: Elevação da superfície livre observada e seus respectivos espectros da amplitude e fase. 21

Figura 2.5: Característica das ondas (ir)regulares para três diferentes amplitudes do espectro. 22

Figura 2.6: Funcionamento dos dispositivos conversores de energia das ondas. 25

Figura 2.7: geometria do canal numérico de Seibt *et al.* (2014) 9

Figura 2.8: Coeficiente de transmissão versus profundidade relativa. 11

Figura 2.9: Eficiência do conversor de energia das ondas do tipo placa submersa para diferentes alturas de placa. 11

Figura 3.1: Diagrama da metodologia WaveMIMO. 27

Figura 3.2: Localização do ponto de extração do estado realístico de mar. 27

Figura 3.3: Histograma bivariado da série temporal da altura significativa e período médio das ondas do estado de mar de Rio Grande (RS) no ano de 2014. Fonte: Adaptado de Maciel *et al.* (2023). 28

Figura 3.4: Densidade espectral da frequência *f* do estado de mar realístico em 23 de agosto de 2014 às 00:00. Fonte: Adaptado de Maciel *et al.* (2023). 28

Figura 3.5: Elevação da superfície livre (η) das ondas regulares representativas do estado de mar propagado. 29

Figura 3.6: Elevação da superfície livre (η) das ondas irregulares realísticas do estado de mar propagado. 29

Figura 3.7: Geometria com a PHS. 31

Figura 4.1: Elevação da superfície livre das ondas regulares representativas do estado de mar de Rio Grande (RS) considerando: (a) 0 s ≤ t ≤ 100 s; (b) 100 s ≤ t ≤ 200 s; e (c) 200 s ≤ t ≤ 300 s. 37

Figura 4.2: Elevação da superfície livre das ondas irregulares realísticas do estado de mar de Rio Grande, considerando: (a) 0 s ≤ t ≤ 300 s; (b) 300 s ≤ t ≤ 600 s; e (c) 600 s ≤ t ≤ 900 s. 38

Figura 4.3: Discretização espacial do domínio computacional para a validação, detalhamento da região no entorno da PHS. 40

Figura 4.4: Discretização espacial do domínio computacional para a verificação por Seibt *et al.* (2023), detalhamento da região no entorno da PHS. 43

Figura 4.5: Elevação da superfície livre em x = 104,688 m. 44

Figura 4.6: Velocidade axial abaixo da PHS em x = 141.911 m; z = 5.616 m. 44

Figura 5.1: Posição das sondas numéricas de elevação da superfície livre para a análise da PHS na função de QM para cada caso: (a) 1L_p em escala; (b) 1L_p; (c) 1,5L_p; (d) 2L_p; (e) 2,5L_p; (f) 3L_p. 48

Figura 5.2: Posição vertical das sondas numéricas para a função de CEO. 49

Figura 5.3: Diferença entre o domínio computacional da 1ªF e 2ªF. 51

Figura 5.4: Análise da PHS como QM sob a incidência de ondas regulares representativas: (a) 1L_p; (b) 1,5L_p; (c) 2L_p; (d) 2,5L_p; (e) 3L_p. 59

Figura 5.5: Destaque do monitoramento para 400 s < t < 450 s para cada caso: (a) 1L_p; (b) 1,5L_p; (c) 2L_p; (d) 2,5L_p; (e) 3L_p. 60

Figura 5.6: Perfil das velocidades axiais máximas abaixo da PHS para as ondas regulares representativas em diferentes instantes de tempo para o monitoramento em z = 4,284 m. 61

Figura 5.7: Perfil das velocidades axiais máximas abaixo da PHS para as ondas regulares representativas em diferentes instantes de tempo para o monitoramento em z = 5,236 m. 62

Figura 5.8: Análise da PHS como QM sob a incidência de ondas irregulares realísticas: (a) 1L_p; (b) 1,5L_p; (c) 2L_p; (d) 2,5L_p; (e) 3L_p. 67

Figura 5.9: Destaque do monitoramento para 400 s < t < 450 s para cada caso: (a) 1L_p; (b) 1,5L_p; (c) 2L_p; (d) 2,5L_p; (e) 3L_p. 68

Figura 5.10: Perfil das velocidades axiais máximas abaixo da PHS para as ondas irregulares realísticas em diferentes instantes de tempo para o monitoramento em z = 4,284 m. 69

Figura 5.11: Perfil das velocidades axiais máximas abaixo da PHS para as ondas irregulares realísticas em diferentes instantes de tempo para o monitoramento em z = 5,236 m..... 69

Figura 5.12: Curva das elevações em módulo para a sonda 10 m a montante da PHS sob ondas regulares representativas..... 74

Figura 5.13: Elevação da superfície livre 10 m a montante da PHS ao longo do tempo para o caso $3L_p$ sob ondas regulares representativas. 75

Figura 5.14: Curvas das velocidades axiais em módulo ao longo do tempo para ondas regulares representativas. 76

Figura 5.15: Curvas das velocidades axiais em módulo ao longo do tempo para ondas irregulares. 77

Figura A. 1: Análise da PHS como QM sob a incidência de ondas regulares representativas (1ªF): (a) $1L_p$; (b) 1,5Lp; (c) $2L_p$; (d) $2{,}5L_p$; (e) $3L_p$. 88

Figura A. 2: Perfis de velocidade axial máxima ao longo da profundidade para todos os casos sob ondas regulares representativas (1ªF). 90

Figura A. 3: Velocidade axial em z = 4,284 m ao longo do tempo para todos os casos sob ondas regulares representativas (1ªF). 92

Figura A. 4: Análise da PHS como QM sob a incidência de ondas irregulares realísticas (1ªF): (a) $1L_p$; (b) $1{,}5L_p$; (c) $2L_p$; (d) $2{,}5L_p$; (e) $3L_p$. 95

Figura A. 5: Perfis de velocidades axiais máximas ao longo da profundidade para todos os casos sob ondas irregulares realísticas (1ªF). 97

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Profundidade relativa da onda e assíntotas das funções hiperbólicas. 18

Tabela 2.2: Síntese dos estudos de outros autores relacionados à PHS na função de QM, CEO e sob diferentes ondas incidentes. 6

Tabela 4.1: Características da onda regular para validação. 39

Tabela 4.2: Resultado da validação do modelo computacional. 41

Tabela 4.3: Característica das ondas regulares para verificação. 42

Tabela 5.1: Dimensões de L_p para os diferentes casos de estudo e coordenadas horizontais das sondas numéricas para a elevação da superfície livre (QM) e velocidade axial (CEO). 47

Tabela 5.2: Posição do início da PN e L_c para cada caso na 2ªF. 52

Tabela 5.3: Valores da H_s [m] monitoradas nos mesmos pontos para a 1ªF e 2ªF para as ondas regulares representativas. 54

Tabela 5.4: Comparação da eficiência da PHS-QM para 1ªF e 2ªF através da porcentagem de redução da H_s [m] entre as sondas a jusante em relação à sonda 10 m a montante da PHS para as ondas regulares representativas. 55

Tabela 5.5: Comparação dos valores da H_s [m] monitoradas nos mesmos pontos para a 1ªF e 2ªF considerando as ondas irregulares realísticas. 56

Tabela 5.6: Eficiência da PHS-QM: Porcentagem de redução da H_s [m] entre as sondas a jusante em relação à sonda 10 m a montante da PHS da 1ªF e 2ªF para a ondas irregulares realísticas. 57

Tabela 5.7: Valores da H_s [m] para cada caso submetido a ondas regulares representativas do estado de mar realístico. 58

Tabela 5.8: Eficiência da PHS-QM: Porcentagem de redução da H_s [m] para as sondas a jusante em relação à sonda 10 m a montante da PHS submetida a ondas regulares representativas do estado de mar realístico. 61

Tabela 5.9: Velocidade axial máxima negativa ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas regulares representativas. 62

Tabela 5.10: Velocidade axial máxima positiva ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas regulares representativas. 63

Tabela 5.11: Velocidade axial máxima negativa ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas regulares representativas. 64

Tabela 5.12: Velocidade axial máxima positiva ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas regulares representativas. 64

Tabela 5.13: Valores da H_s [m] para a PHS submetida às ondas irregulares realísticas do estado de mar. 65

Tabela 5.14: Eficiência da PHS-QM: Porcentagem de redução da H_s [m] entre as sondas a jusante em relação à sonda 10 m a montante da PHS submetida às ondas irregulares realísticas do estado de mar. 66

Tabela 5.15: Velocidade axial máxima negativa ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas irregulares realísticas. 70

Tabela 5.16: Velocidade axial máxima positiva ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas irregulares realísticas..... 71

Tabela 5.17: Velocidade axial máxima negativa ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas irregulares realísticas. 71

Tabela 5.18: Velocidade axial máxima positiva ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas irregulares realísticas..... 72

Tabela 5.19: Área das integrais e relação entre os resultados a 10 m a montante e 10 m a jusante para cada caso da PHS sob a incidência de ondas regulares representativas do estado de mar. 74

Tabela 5.20: Área e proporção da área de cada caso em comparação com o caso 1L_p de referência, para o monitoramento da velocidade axial abaixo da PHS em z = 4,284 m. 75

Tabela 5.21: Área das integrais e relação entre os resultados a 10 m a montante e 10 m a jusante para cada caso da PHS sob a incidência de ondas irregulares realísticas do estado de mar. 77

Tabela 5.22: Área e proporção da área de cada caso em comparação com o caso 1L_p de referência, para o monitoramento da velocidade axial abaixo da PHS em z = 4,284 m para ondas irregulares realísticas. 77

Tabela A. 1: H_s calculada 10 m a montante e a jusante da PHS para todos os casos sob ondas regulares representativas (1ªF). 89

Tabela A. 2: H_s calculada 10 m a montante da PHS e na sonda fixa, localizada em x = 128,63 m para todos os casos sob ondas regulares representativas (1ªF). 89

Tabela A. 3: Velocidade axial máxima na posição z = 4,284 m e instante de ocorrência para todos os casos sob ondas regulares representativas (1ªF)..... 91

Tabela A. 4: H_s calculada para as sondas a 10 m a montante e jusante da PHS para todos os casos sob ondas irregulares realísticas (1ªF). 93

Tabela A. 5: H_s considerando a sonda localizada a 10 m a montante da PHS e a sonda fixa em x = 128,63 m para todos os casos sob ondas irregulares realísticas (1ªF). 94

Tabela A. 6: Velocidade Axial Máxima na posição z = 4,284 m e instante de ocorrência para todos os casos sob ondas irregulares realísticas (1ªF). 97

Lista de Símbolos

Símbolos Romanos

C	Celeridade da onda [m/s]
C_r	Coeficiente de reflexão do quebra-mar [adimensional]
C_t	Coeficiente de transmissão do quebra-mar [adimensional]
C_1	Coeficiente de amortecimento linear [s^{-1}]
C_2	Coeficiente de amortecimento quadrático [m^{-1}]
d	Profundidade do canal [m]
e_p	Espessura da Placa Horizontal Submersa [m]
g	Aceleração da gravidade [m/s^2]
H	Altura da onda [m]
H_c	Altura do canal de ondas [m]
H_s	Altura significativa [m]
h_p	Profundidade de instalação da Placa Horizontal Submersa [m]
k	Número de onda [m^{-1}]
L_c	Comprimento do canal de ondas [m]
L_p	Comprimento da Placa Horizontal Submersa [m]
L_{praia}	Comprimento da praia numérica [m]
n	Tamanho da amostra considerada
O_i	Resultado obtido
p	Pressão [Pa]
R_i	Valor de referência
$\vec{S}$	Forças de campo externas [N/m^3]
T	Período da onda [s]
T_m	Período médio das ondas [s]
t	Tempo [s]
u	Componente horizontal da velocidade de propagação da onda [m/s]
$\vec{v}$	Vetor velocidade [m/s]
X_p	Distância horizontal da entrada do canal até o início da Placa Horizontal Submersa [m]
x	Coordenada do eixo horizontal [m]
x_s	Posição horizontal do início da praia numérica [m]
x_e	Posição horizontal do fim da praia numérica [m]
w	Componente vertical da velocidade de propagação da onda [m/s]
z	Coordenada do eixo vertical [m]
z_n	Posição vertical de η [m]

z_b	Posição do fundo [m]

Símbolos Gregos

α	Fração volumétrica [adimensional]
ρ	Massa específica do fluido [kg/m^3]
λ	Comprimento da onda [m]
η	Elevação da superfície livre [m]
σ	Frequência angular da onda [s^{-1}]
$\bar{\bar{\tau}}$	Tensor de deformação [N/m^2]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido [N·s/m^2]

Lista de Siglas

CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
CC	Condições de Contorno
CEO	Conversor de Energia das Ondas
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*)
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
ERP	Erro Relativo Percentual (*Percentage Relative Error*)
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
FVM	*Finite Volume Method*
GN	Equações de Green-Naghdi
HOBEM	Método *Higher-order Boundary Element*
MAE	Erro Médio Absoluto (*Mean Absolute Error*)
MEF	Método de Elementos Finitos
MPS	Método *Moving Particle Semi-implicit*
MVF	Método de Volumes Finitos
NMA	Nível Médio da Água
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
OWC	Dispositivo CEO do tipo Coluna de Água Oscilante (*Oscillating Water Column*)
PHS	Dispositivo Placa Horizontal Submersa
PISO	Método *Pressure-Implicit with Splitting of Operators*
PRESTO	Esquema *PREssure STaggering Option*
PTO	Sistema de transmissão da energia (*Power Take Off*)
RMSE	Erro Médio Quadrático (*Root Mean Squared Error*)
SHP	*Submerged Horizontal Plate*
VOF	Modelo *Volume of Fluid*
WCSPH	Método *Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics*
WEC	*Wave Energy Converter*

1 Introdução

A crise climática, anunciada desde o século passado, é hoje uma realidade. O Acordo de Paris de 2015 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas destacam a importância de ações concretas para transformar os processos de produção e desenvolvimento (ONU, 2015a; ONU, 2015b). Os combustíveis fósseis ainda são a maior fonte da matriz energética mundial. No entanto, a busca pela descarbonização e pelo objetivo *Net Zero* do Acordo de Paris estão aumentando o interesse no desenvolvimento de fontes renováveis de energia (González *et al.*, 2021).

Os ODS buscam estabelecer um plano global para a construção de um futuro mais justo e sustentável até 2030. Dentre eles, o ODS 7 (Energias renováveis e acessíveis) e o ODS 13 (Ação climática) estão diretamente relacionados com o presente estudo já que o dispositivo Placa Horizontal Submersa (PHS) pode ser utilizado como um conversor de energia das ondas (CEO) e como um quebra-mar (QM). O estudo apresenta, ao campo político e econômico, avanços científicos no potencial de produção de energia renovável, especialmente pela modelagem com ondas irregulares. A PHS como um QM atua na proteção costeira, essa função, indiretamente, atinge os ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), além de agregar conhecimento científico aplicado à inovação integrando ao ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura). Outra mobilização pertinente, com qual o presente estudo tem correlação direta, é a Década das Nações Unidas da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021 a 2030) (ONU, 2015b; UNESCO, 2019).

O relatório estatístico sobre a energia global do Energy Institute (2023) apresentou uma expansão recorde no uso de fontes eólica e solar, baseado nos dados de 2022. No entanto, a predominância dos combustíveis fósseis se manteve praticamente inalterada, correspondendo a 82% do total da matriz energética global. No Brasil, houve um aumento de 7,2% no consumo de fontes renováveis de energia e de 11,9% na produção, a segunda com ênfase na energia solar. Em 2022, a geração de energias renováveis ficou atrás apenas da hidroelétrica na matriz brasileira (Energy Institute, 2023). Apesar dos dados promissores, ainda não é possível notificar uma produção significativa da energia das ondas do mar dentre as fontes de energia renovável.

González *et al.* (2021) apresentaram que, dentre os recursos de energia renovável disponíveis, a energia dos oceanos é um grande potencial e seu desenvolvimento está em crescimento desde a década de 2010. Os autores afirmam que a energia das ondas "é uma fonte confiável, uma vez que as ondas podem fornecer um abastecimento de energia constante, o que é uma vantagem em comparação com as fontes de energia eólica e solar,

que são intermitentes; a variabilidade temporal do abastecimento de energia pode ser prevista com muito mais precisão" (González *et al.*, 2021, p. 11).

Wahyudie *et al.* (2017) indicam a estimativa de 32 TW de energia disponível nos oceanos. Desse potencial, 2 TW correspondem à energia das ondas do mar. No entanto, desafios com a eficiência de conversão e restrições no sistema *Power Take-Off* (PTO) para a rede elétrica conduzem a uma disponibilidade real de 0,5 TW para exploração. Mais especificamente, na costa sul-sudeste do Brasil, os valores de energia potencial estão entre 6 e 22 kW/m de frente de onda (Espíndola e Araújo, 2017). A medida de energia por metro de frente de onda é utilizada uma vez que o potencial energético de uma onda é proporcional à sua altura (Dean e Dalrymple, 1991). A Figura **1.1** mostra uma referência da potência média anual da energia das ondas para a costa brasileira.

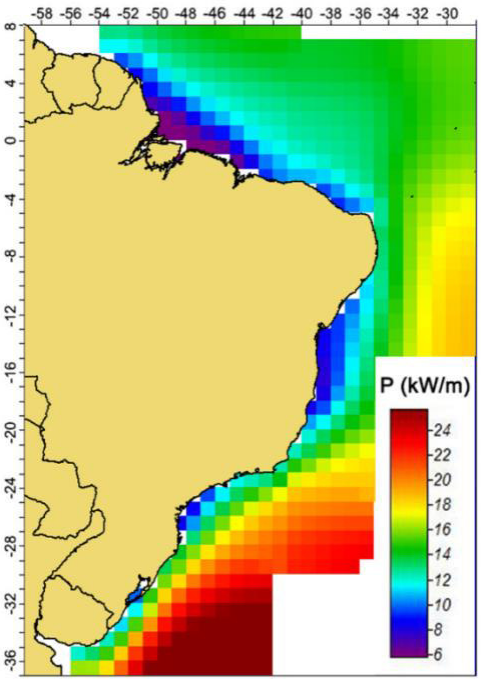


Figura 1.1: Distribuição da potência média anual por metro de frente de onda ao longo da costa brasileira.
Fonte: Espíndola e Araújo (2017).

Tavakoli *et al.* (2023) explicaram que, com o avanço de métodos computacionais e experimentais para a análise de estruturas, há a expectativa de maiores impactos no setor das energias renováveis do oceano. Os autores também salientaram que "a investigação no campo da engenharia oceânica está em consonância com exigências gerais como a sustentabilidade ambiental, a energia limpa e acessível" (Tavakoli *et al.*, 2023, p. 20).

Opoku *et al.* (2023) explicaram que a investigação sobre dispositivos CEO tem utilizado a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) como principal forma de abordagem. Neste sentido, a modelagem numérica é amplamente utilizada para a

propagação de ondas regulares na análise de CEO, todavia não é tão usual analisar dispositivos CEO sujeitos a ondas irregulares. Os estudos de ondas irregulares, no geral, envolvem a utilização de espectros de ondas e não um estado de mar que exista de fato (Machado *et al.*, 2021). Posto o desafio, o presente estudo aplica a metodologia WaveMIMO desenvolvida por Machado *et al.* (2021), a qual propõe uma nova forma de geração numérica das ondas, permitindo a propagação de um estado de mar realístico baseado em uma localização real.

Complementar ao objetivo de reduzir as emissões de carbono através da transição energética para fontes de energia renováveis está a necessidade de proteger, adaptar e mitigar os efeitos causados por fenômenos extremos gerados pela emergência climática. Os fenômenos climáticos extremos no oceano são definidos como "ventos e ondas fortes, aumento do nível do mar e/ou perda de extensões de gelo" (Tavakoli *et al.*, 2023, p. 2). Muehe (2006) estimou que 40% da costa brasileira está sob erosão severa. Os processos de erosão, bem como os danos às construções nos municípios costeiros, podem ser intensificados à medida que a severidade e a frequência dos eventos climáticos aumentam. Isso evidencia a necessidade de se desenvolver tecnologias de proteção costeira contra a erosão (Trombetta *et al.*, 2019).

Considerando a necessidade de uma transição energética e a proteção costeira frente às mudanças climáticas, este trabalho amplia a pesquisa científica nesse tema a partir de um estudo numérico inédito do dispositivo PHS submetido às ondas regulares representativas e irregulares realísticas de um estado de mar ocorrido na costa de Rio Grande (RS), município no sul do Brasil. É interessante mencionar que a PHS foi proposta, originalmente, como um QM e no decorrer de outros estudos, analisando suas características hidrodinâmicas, foi constatado que a PHS também pode ser utilizada como CEO.

Portanto, o presente estudo tem dois pontos de interesse: (i) identificar as possíveis diferenças que a análise simplificada, com ondas regulares, pode conduzir na hidrodinâmica do escoamento e potência disponível; (ii) determinar recomendações para o dispositivo PHS como QM, como CEO e na análise conjunta como QM e CEO, considerando os resultados das simulações para os cinco casos diferentes alterando o comprimento da PHS.

1.1 Princípio hidrodinâmico da PHS

O conceito da PHS como QM baseia-se na observação de que a energia das ondas é reduzida após a sua propagação sobre o dispositivo. Os primeiros estudos de atenuação de ondas num QM flutuante datam dos anos 50, por Heins (1950) e Greene e Heins (1953); enquanto os estudos sobre a função CEO surgiram quase 20 anos mais tarde, quando Dick e Brebner (1968) observaram o efeito pulsante na velocidade axial do

escoamento sob a placa. Graw (1994) demonstrou a variação da velocidade do escoamento de água abaixo da PHS através de um estudo experimental, propondo a aplicação do dispositivo PHS como CEO através da inserção de uma turbina hidráulica, com giro em ambos os sentidos, abaixo da placa.

Analisando a PHS sob o viés da função de QM, a mitigação da erosão costeira decorre da redução da energia das ondas e, consequentemente, da altura das ondas após se propagarem sobre o dispositivo. Ainda, a bibliografia apresenta considerações como:

- há uma menor dependência e influência em relação à geomorfologia local e condições de transporte de sedimentos quando comparado com quebra-mares tradicionais. Isso ocorre pois não há uma redução completa do clima de ondas que atinge a costa (Karmakar e Soares, 2015);
- é indicada para situações em que a proteção completa das ondas na zona abrigada não é necessária, nem desejada (Karmakar e Soares, 2015);
- sua estrutura de fixação permite o transporte de massa, reduzindo preocupações em relação à qualidade da água na zona abrigada (Dick e Brebner, 1968).

Além disso, Yu (2002) explicou que, escolhendo corretamente o comprimento da placa, é possível criar uma condição em que o escoamento sobre a placa fique fora de fase na extremidade a jusante da placa. Este escoamento gera um movimento em forma de U por baixo da placa e, como resultado, a quantidade de energia da onda que será transmitida após a propagação através da placa será consideravelmente reduzida. A placa é, portanto, obstrutiva às ondas incidentes e pode ser utilizada para o controle das ondas.

A PHS depende tanto da interação fluido-estrutura como da interação fluido-fluido para refletir as ondas e reduzir a altura das ondas transmitidas (Yu, 2022; Hayatdavoodi *et al.*, 2017). A estrutura em si serve principalmente para alterar o curso do escoamento, diferente do que acontece com um QM convencional que resiste passivamente à ação das ondas. A PHS é menos dependente das condições geotécnicas do fundo do mar onde a estrutura será instalada (Karmakar e Soares, 2015); o seu desempenho, em termos de custo, é elevado em águas relativamente profundas; não tem efeitos negativos na paisagem marinha e não cria uma zona de águas paradas, onde normalmente são necessários grandes esforços para manter a qualidade da água (Yu, 2002).

Já a PHS como CEO é uma consequência de análises experimentais do próprio dispositivo por diferentes autores. Notou-se que a velocidade axial sob a PHS ora está no sentido de propagação da onda, ora no sentido contrário, gerando um efeito pulsante da velocidade axial sob a estrutura. Esse escoamento pulsante abaixo da placa é gerado pela propagação das ondas sobre a PHS e, a partir da inserção de uma turbina sob a placa, é

possível gerar energia elétrica. Dessa forma, é acrescentada a função de CEO à PHS, para além da função de QM já conhecida (Graw, 1994; Orer e Ozdamar, 2007; Seibt *et al.*, 2023).

A Figura **1.2** ilustra uma secção longitudinal da estrutura da PHS que permite identificar a sua função como QM (devido à redução da altura de onda após a PHS) e a sua função como CEO (devido ao escoamento pulsante sob a PHS que pode acionar uma turbina hidráulica).

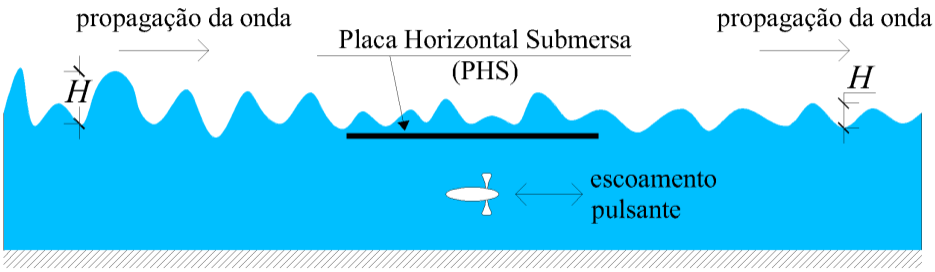


Figura 1.2: Dispositivo Placa Horizontal Submersa.

1.2 Estado da arte da Placa Horizontal Submersa

A PHS surge como uma das geometrias estudadas para estruturas do tipo QM submerso, sem obstrução total do escoamento. Com o avanço das investigações são analisadas as características como profundidade, comprimento, inclinação, porosidade, agrupamento de placas, entre outras.

Sendo assim, esta seção está subdivida em cinco abordagens distintas: as principais referências da PHS como QM e CEO para o presente estudo; literatura sobre a PHS na função de QM; PHS na função de CEO; PHS como QM e CEO; PHS sob incidência de ondas de alta ordem ou irregulares. Logo, serão apresentadas literaturas sobre os diferentes usos e pontos de análise da PHS. Seus resultados da hidrodinâmica, sejam numéricos ou experimentais, são úteis para a compreensão dos resultados apresentados neste estudo.

Para facilitar a compreensão os estudos levantados foram categorizados na Tabela **1.1**. Essa tabela sintetiza os autores apresentados no Estado da Arte em quatro categorias, conforme a hidrodinâmica do dispositivo. Através da Tabela **1.1** fica explícita a diferença quantitativa na produção das funções da PHS e a variação cronológica dos estudos para as diferentes funções e ondas incidentes. Destaca-se que, dado o início dos estudos sobre a PHS como QM no fim da década de 1960, somente nos últimos dez anos o interesse do dispositivo sob incidência de ondas regulares e irregulares foi ampliado. Neste intervalo de tempo, os estudos estiveram mais focados na PHS como CEO e no análise conjunta QM e CEO, sob a incidência de ondas regulares.

O presente estudo numérico considera o dispositivo PHS impermeável, em escala real e com altura fixa inserido em um canal de ondas. São avaliados cinco casos com diferentes comprimentos da PHS. As simulações têm como objetivo compreender a hidrodinâmica do dispositivo sob ondas regulares e irregulares, além de avaliar as funções de QM e CEO.

Tabela 1.1: Síntese dos estudos de outros autores relacionados à PHS na função de QM, CEO e sob diferentes ondas incidentes.

PHS - QM	**PHS - CEO**
Dick e Brebner (1968)	Orer e Ozdamar (2007)
Wang e Shen (1999)	Seibt (2011)
Yu (2002)	Seibt *et al*. (2012)
Karmakar e Soares (2015)	Seibt *et al*. (2014)
	Seibt *et al*. (2017a)
	Seibt *et al*. (2017b)
	Seibt *et al*. (2023)
PHS - QM e CEO	**PHS sob incidência de ondas de alta ordem ou irregulares**
Graw (1994)	Siew e Hurley (1977)
Seibt *et al*. (2012)	Aghili *et al*. (2014)
He *et al*. (2019)	Cheng *et al*. (2017)
Thum *et al.* (2024)[1]	Fang *et al*. (2019)
Motta *et al.* (2025)	Xu *et al*. (2019)
	Zheng *et al*. (2023)

1.2.1 Principais referências para o presente estudo

A abordagem da PHS enquanto QM ocorre a partir da observação da redução da energia das ondas após se propagarem sobre o dispositivo. Após alguns autores apresentarem diferentes estudos, Graw (1994) realizou um trabalho experimental sobre a velocidade abaixo do dispositivo, com foco na PHS como CEO. O autor indica que é possível utilizar a PHS na função de CEO por meio da inserção de uma turbina abaixo da placa, com giro em ambos os sentidos.

Esse estudo é ampliado e aprofundado compreendido, posteriormente, por Orer e Ozdamar (2007), os quais realizaram um ensaio experimental com a PHS em um canal

[1] Publicado com resultados parciais do presente estudo.

de ondas de laboratório, monitorando a velocidade axial sob o dispositivo. Seus resultados evidenciaram a existência do escoamento horizontal de água, em ambos os sentidos, abaixo da PHS. Além disso, a eficiência do conversor de energia das ondas do experimento foi de 60 %, muito superior à eficiência relatada na literatura até aquele momento, que era de 3 %.

Seibt (2011) obteve numericamente os perfis de velocidade sob o centro da PHS para diferentes alturas do dispositivo em relação ao fundo do canal. O autor identificou a coerência do comportamento hidrodinâmico apresentado no estudo experimental de Orer e Ozdamar (2007). Dentre seus resultados está que a altura da placa tem influência direta na magnitude da velocidade do escoamento sob a placa, resultando em maiores velocidades quanto menor a distância em relação ao fundo. Os valores máximos da velocidade são obtidos no sentido contrário à propagação das ondas no canal numérico em escala de laboratório. Outro parâmetro de análise é a vazão mássica (kg/s) sob a placa que auxilia na avaliação da eficiência da turbina sob a PHS para a implementação do dispositivo na função de CEO.

Outros estudos envolvendo a PHS foram desenvolvidos entre 2011 e 2023 e serão apresentados nas subseções a seguir conforme as funções da PHS.

Já Seibt *et al.* (2023) realizaram um estudo numérico sobre a PHS na função de CEO aplicando o *Design Construtal*, que é um método que busca o aprimoramento da forma e estrutura dos sistemas de fluxo/escoamento. Sua fundamentação está na Lei Construtal do Design e Evolução. Os autores apresentaram uma geometria ótima em escala real através do mecanismo de busca exaustiva e definida a partir da incidência de 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). Esse modelo otimizado será de profundo interesse para o presente estudo, servindo como ponto de partida para as dimensões da PHS no domínio computacional a ser simulado numericamente com ondas irregulares.

1.2.2 PHS na função de QM

Conforme mencionado, Dick e Brebner (1968) foram os primeiros a observar o efeito pulsante da velocidade axial abaixo da PHS, no entanto, o objetivo do seu estudo foi desenvolver uma relação empírica e teórica para o coeficiente de reflexão (C_r) e para o coeficiente de transmissão (C_t) através de um número de espectro de onda. As estruturas analisadas consistiam em um QM retangular junto ao fundo (tipo degrau) e uma placa horizontal submersa permeável. Os resultados obtidos indicaram que o QM submerso permeável, para profundidades de submersão maiores do que 5% da profundidade total, transmitem menos energia do que um QM sólido sob determinado intervalo de frequência. O autor também menciona que a maioria das aplicações da PHS estão

relacionadas a projetos pontuais, devido à falta de embasamento teórico e estudos experimentais na época.

Wang e Shen (1999) avançaram nas discussões das soluções analíticas ao investigar os coeficientes C_r e C_t para um grupo de placas horizontais submersas em diferentes profundidades sob a coluna d'água. Concluiu-se que o grupo de placas pode ser compreendido como um grupo de tubos ou placas horizontais apoiadas por estacas. Foram obtidos os coeficientes para a avaliação da performance das múltiplas placas como um QM e dos efeitos causados pelo espaçamento entre as placas.

Yu (2002) explica que, escolhendo adequadamente o comprimento da placa, é possível criar uma situação em que a propagação das ondas sobre a placa gere um movimento em forma de U por baixo da placa. Como consequência, a quantidade de energia da onda transmitida após a propagação pela placa será consideravelmente reduzida. A placa é, portanto, obstrutiva para ondas incidentes e pode ser usada para controle de ondas. Diferente de um QM convencional, a placa submersa se baseia na interação fluido-fluido para bloquear as ondas. A estrutura em si serve principalmente para alterar o escoamento ao invés de resistir passivamente às ações das ondas, como faz um QM convencional. O autor ainda apresenta os efeitos hidrodinâmicos em relação à geometria e características da PHS, são eles: comprimento da placa; mínima transmissão e máxima reflexão; profundidade de instalação; inclinação da placa; porosidade da placa; vibração da placa; presença de corrente; efeitos tridimensionais; efeitos da irregularidade no espalhamento de ondas sobre a placa submersa; ondas não lineares; viscosidade do fluido; e critérios para a quebra da onda.

Karmakar e Soares (2015) estudaram a interação de ondas com uma placa submersa flutuante inclinável em uma profundidade de água finita. A investigação numérica se deu pelos coeficientes de reflexão, de transmissão, deflexões verticais e força vertical na placa. O problema bidimensional é formulado com base na teoria linearizada das ondas. Como resultados os autores detalham que para valores mais altos do número de onda, a reflexão da onda diminui com o aumento da profundidade submersa. A elevação da onda na região transmitida é menor em comparação com a região da onda incidente, o que sugere que, devido à inclinação da placa submersa, a maior parte da energia é absorvida.

1.2.3 PHS na função de CEO

Para além dos estudos de autores já apresentados como base teórica para o presente estudo, os quais são primordiais para a compreensão do dispositivo em estudo e seus avanços técnicos ao longo do tempo, nessa subseção são exploradas outras literaturas que também acrescentam resultados e considerações para o estado da arte da PHS como CEO.

Seibt *et al.* (2014) investigaram numericamente o efeito da altura da placa sobre o desempenho do dispositivo PHS como CEO, tema até então inexplorado na literatura, segundo os autores. A Figura **1.3** apresenta as características do canal numérico: altura da placa (H_p); comprimento do canal (L_c); comprimento da onda (λ); profundidade da água (d); submersão da PHS (d_p). Em cada caso, as velocidades foram medidas em vários pontos igualmente distribuídos em uma linha imaginária no centro da placa até o fundo do canal. Nos resultados dessa investigação pode-se observar um escoamento pulsante em todos os casos simulados. O comportamento pulsante do escoamento revela que a magnitude da velocidade é maior na direção oposta à da propagação das ondas. Esse comportamento está de acordo com as descobertas anteriores na literatura (Carter, 2005; Orer e Ozdamar, 2007). Com relação à investigação do efeito da H_p no desempenho da PHS como CEO, os resultados levaram a uma recomendação teórica sobre o melhor posicionamento da placa. Para medir esse desempenho, a eficiência foi calculada. Como esperado, quanto maior o aumento da H_p, maior o escoamento de massa abaixo da placa. A diferença entre os casos que H_p = 0,46 m e 0,53 m para a velocidade média na direção contrária ao escoamento é de quase 10%. Sendo que a melhor eficiência do dispositivo ocorreu no caso H_p = 0,53 m (88,0% da profundidade) com o valor de 64,0%.

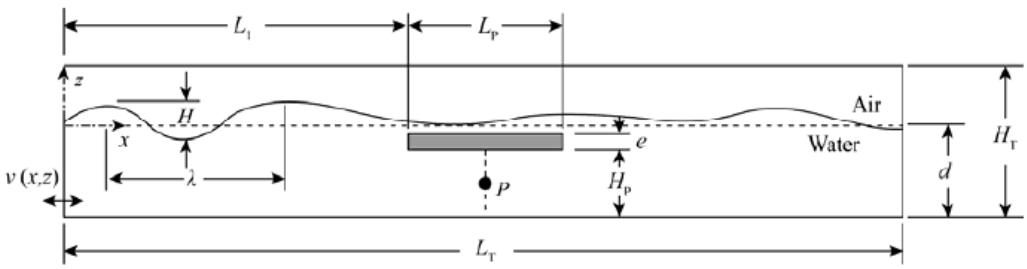


Figura 1.3: geometria do canal numérico de Seibt *et al.* (2014)

Seibt *et al.* (2017a) apresentam o estudo numérico do dispositivo PHS avaliando a similaridade dos resultados de um domínio computacional em escala real com um em escala de laboratório. As dimensões do modelo foram definidas por um fator de escala segundo o critério de similaridade de Froude. A comparação entre os resultados das duas escalas mostrou-se concordante, de modo que diferença média entre as eficiências obtidas foi de 2 %, considerando os casos estudados. Os autores ainda destacaram que as velocidades do modelo em escala de laboratório correspondem a aproximadamente 30 % do valor das velocidades do modelo em escala real. Essas simulações numéricas consideraram a incidência de ondas regulares de Stokes de 2ª ordem.

Seibt *et al.* (2017b) analisaram numericamente a variação conjunta dos parâmetros comprimento (L_p) e H_p para a PHS em escala de laboratório com a incidência de ondas regulares da teoria de Stokes de 2ª ordem. Foi considerada uma onda regular de período T = 3,00 s e altura H = 0,06 m. Os resultados mostraram, para as configurações analisadas, que uma redução de 75 % no comprimento da placa proporcionou um

acréscimo de até 20 % na eficiência, dependendo da altura da placa considerada; por sua vez, um acréscimo de 11,6 % na altura da placa levou a um ganho de até 18 % na eficiência dependendo do comprimento de placa considerado. Dessa forma, os autores concluíram que a configuração da placa com menor comprimento e maior altura relativa pode levar a uma eficiência do equipamento aproximadamente três vezes maior que a configuração com maior comprimento e menor altura relativa, chegando a aproximadamente 42 %, entre os casos estudados.

1.2.4 PHS como QM e CEO

Seibt *et al.* (2012) pesquisaram a PHS com duplo propósito QM e CEO. Os autores investigaram, na função de QM, a dependência do C_t em relação à H_p. Seibt *et al.* (2012) destacam que o uso de QM isolados (mais comuns)

> "trazem dois inconvenientes importantes: o primeiro é a redução da troca de água entre a área protegida e o mar aberto; e o segundo é a obstrução da vista do mar aberto. A redução da troca de água tem como consequências a deterioração da qualidade da água da área protegida e um desvio do transporte de sedimentos entre as duas áreas".

A PHS apresenta-se como uma solução para esses inconvenientes apesar de ter uma menor eficiência em comparação com os QMs isolados (Seibt *et al.*, 2012). São descritos diferentes estudos que demonstram a forte dependência do coeficiente de transmissão com o comprimento relativo da placa.

A Figura **1.4** apresenta os resultados para C_t em função da razão entre a H_p e a profundidade do canal, simbolizada pelos autores pela variável "h". Os valores baixos de C_t significam uma maior redução das ondas que chegam à costa, objetivo da PHS como QM. Para a PHS na função de CEO, a Figura **1.5** apresenta os resultados para a eficiência do conversor em função da razão entre a altura da placa e a profundidade do canal.

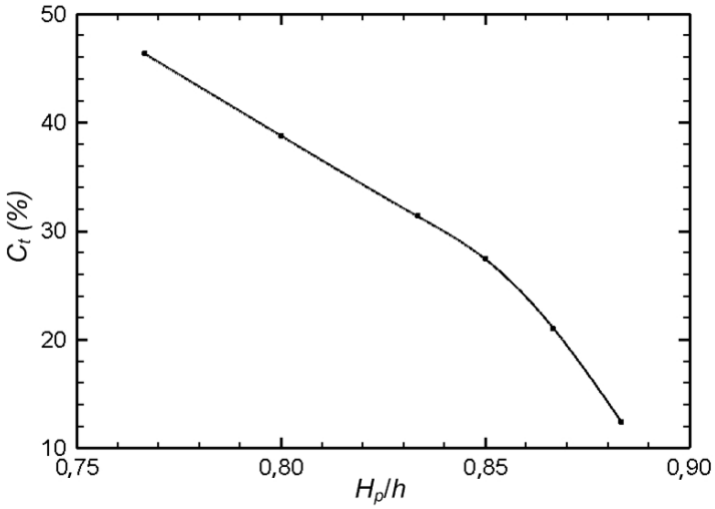


Figura 1.4: Coeficiente de transmissão versus profundidade relativa.
Fonte: Adaptado de Seibt *et al.*, 2012.

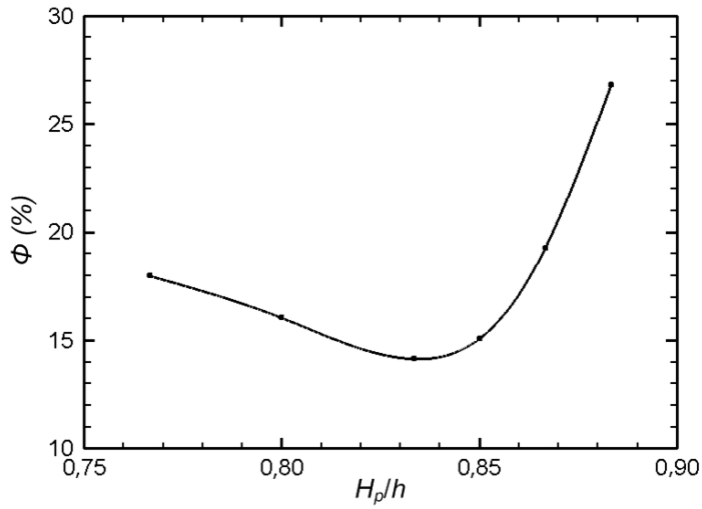


Figura 1.5: Eficiência do conversor de energia das ondas do tipo placa submersa para diferentes profundidades relativas.
Fonte: Adaptado de Seibt *et al.*, 2012.

Assim, é possível afirmar que, para um modelo numérico em escala de laboratório com a propagação de ondas regulares da teoria de Stokes de 2ª ordem, "as alturas de placa que correspondem às eficiências mais elevadas também correspondem aos coeficientes de transmissão mais baixos" (p. 11, Seibt *et al.*, 2012). Os autores constatam ainda que quanto maior a altura relativa, maior é a eficiência do QM, ou seja, a submersão da placa deve ser pequena. Para a PHS na função de CEO, analisaram a eficiência do dispositivo pela razão entre a potência disponível sob a placa e a potência da onda. Os resultados demonstraram que a eficiência da PHS como CEO aumenta junto à redução do C_t.

He *et al.* (2019) analisaram a PHS através de um estudo numérico bidimensional usando o método numérico *Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics* (WCSPH) e ondas regulares. Os autores destacam que, embora a PHS atenue as ondas e, enquanto isso, auxilie na aquisição de energia, pouco esforço foi feito para combinar essas duas funcionalidades. Os resultados indicam que, com L_p/λ nas faixas de 0,38 a 0,85 e d_p/d de 0,05 a 0,11, a PHS tem o coeficiente de transmissão entre 0,06 e 0,27, dependendo da altura da onda incidente. Portanto, ela pode ser considerada um QM eficiente. Por outro lado, uma PHS projetada mista como QM e CEO mantém uma eficiência máxima de conversão entre 2,3% e 7,8%. As faixas correspondentes de L_p/λ e d_p/d são 0,24 a 0,25 e 0,13 a 0,17, respectivamente. Embora essa eficiência pareça pouco atraente, espera-se que uma PHS de 1 km de largura forneça eletricidade para 500 pessoas em países moderadamente desenvolvidos.

1.2.5 PHS sob incidência de ondas de alta ordem ou irregulares

Siew e Hurley (1977) investigaram o efeito de ondas longas sobre uma PHS com o objetivo de projetar QMs flutuantes e de natureza menos permanentes. Os autores apresentam soluções para os C_r e C_t da onda em quatro diferentes regiões delimitadas no entorno da placa.

Aghili *et al.* (2014) estudaram numericamente, a partir do método WCSPH, a interação de ondas solitárias com uma PHS em quatro posições verticais diferentes. Os resultados numéricos indicaram que, à medida que a distância da PHS em relação à superfície livre diminui, a energia das ondas propagadas após a placa se reduz significativamente. Por outro lado, com o aumento da distância da PHS do fundo do mar, o componente vertical da força da onda e seu componente de pressão diminuem substancialmente.

Cheng *et al.* (2017) investigaram a transformação não linear e a dispersão de ondas incidentes sobre uma PHS na presença de uma corrente uniforme. É utilizado um canal de ondas numérico totalmente não linear, no domínio do tempo é considerado o *Higher-Order Boundary Element Method* (HOBEM) para as soluções numéricas com a teoria de potencial bidimensional e da técnica mista Euleriana-Lagrangiana. A análise espectral revelou que a dissipação de energia ocorre principalmente nas ondas fundamentais quando as ondas focadas se propagam sobre a placa. A corrente tem uma influência mais forte sobre as forças da onda do que sobre a elevação da superfície da onda. Além disso, o fenômeno do "ciclo de carga secundário" também é observado na série temporal das forças da onda para uma corrente contínua.

Em Hayatdavoodi *et al.* (2017) foi apresentado um estudo numérico sobre a transformação da onda solitária e cnoidal sobre uma PHS utilizando as equações não lineares de Green-Naghdi (GN) Nível I para águas rasas. Os resultados demonstraram

que, em águas profundas e intermediárias, a dispersão das ondas varia não linearmente tanto pelo comprimento de onda sobre a relação do comprimento da placa quanto pela profundidade de submersão. Em águas rasas, no entanto, e para ondas longas, apenas a profundidade de submersão parece desempenhar um papel significativo na dispersão de ondas.

Fang *et al.* (2019) utilizaram um modelo analítico com base na teoria do escoamento potencial. Os autores apresentam uma solução geral para a pressão hidrodinâmica e as forças das ondas exercidas em placas submersas por um grupo de ondas focalizadas do tipo NewWave. Constataram, então, que os coeficientes de reflexão e as forças das ondas são sensíveis à frequência de pico do grupo de ondas focalizadas e ao comprimento da placa. Além disso, o comprimento da placa altera significativamente o desempenho hidrodinâmico, enquanto a altura da placa tem pouca influência.

Xu *et al.* (2019) estudaram a interação entre a onda solitária e a PHS com o próprio código de CFD MLParticle-SJTU. Fez uso também do método *Moving Particle Semi-implicit* (MPS) que consiste em uma malha livre baseada no movimento semi-implícito das partículas. Os resultados indicaram que o efeito da placa difere sob diferentes alturas de ondas. Quando a altura da onda foi pequena, a distribuição da velocidade e a diferença de pressão sob e acima da placa não foi óbvia. Os autores indicaram a realização uma pesquisa adicional para analisar a influência de diferentes fatores, incluindo a altura da onda, a profundidade de submersão e a espessura da placa nas interações entre a onda e a placa.

Zheng *et al.* (2023) apresentaram novas soluções experimentais em laboratório para analisar o efeito de dissipação de ondas e as características do campo de velocidades na base da PHS tanto sólida quanto permeável. São realizadas combinações de configurações parâmetros da PHS como, por exemplo, permeabilidade, comprimento relativo, profundidade relativa e diferentes alturas significativas das ondas. Como conclusão, confirmam, assim como outras referências para a PHS sobre ondas regulares, que a atenuação do período da onda é mais significativa quando a profundidade submersa é pequena. Além disso, criar uma taxa adequada de abertura (buracos) transversais na placa pode otimizar a atenuação do período da onda. Os autores demonstraram ainda que a velocidade máxima do escoamento na placa sólida diminui com o aumento dos comprimentos relativos das placas e das alturas significativas das ondas. A variação na profundidade relativa da PHS sólida não tem efeito significativo sobre a velocidade do escoamento. Importante mencionar que, para o intervalo de experimentos realizados, com ondas irregulares, a correlação entre o coeficiente de transmissão da placa sólida e a velocidade máxima na parte inferior da placa não é tão forte, em comparação com a da placa perfurada.

1.3 Objetivo geral do estudo

O presente estudo tem como objetivo analisar numericamente o dispositivo PHS, avaliado como QM e como CEO, sujeito às ondas regulares representativas e irregulares realísticas de um estado de mar ocorrido na costa de Rio Grande (RS), Brasil. São simulados cinco casos diferentes alterando o comprimento da PHS e comparando os resultados para ondas regulares e irregulares.

1.3.1 Objetivos específicos do estudo

São objetivos específicos deste estudo:

- Validar e verificar o modelo computacional de um canal bidimensional com o dispositivo PHS e região de praia numérica (PN) com a metodologia WaveMIMO;
- Verificar a metodologia WaveMIMO para a propagação de ondas regulares representativas e irregulares realísticas de um estado de mar;
- Realizar estudos de caso considerando ondas regulares representativas e ondas irregulares realísticas que representam o estado de mar que ocorreu em Rio Grande (RS), Brasil, considerando alterações no comprimento da PHS;
- Avaliar o comportamento do dispositivo PHS sob a incidência de ondas regulares representativas e irregulares realísticas do estado de mar, identificando as possíveis diferenças que a análise simplificada, com ondas regulares, pode conduzir na hidrodinâmica do escoamento e potência disponível;
- A partir dos resultados estatísticos dos estudos de caso, obter recomendações para os comprimentos adequados da PHS nas situações: PHS apenas como QM; PHS apenas como CEO; PHS como QM e CEO.

2| Fundamentação teórica

Neste capítulo são expostas diversas literaturas correlacionadas ao presente estudo. Expõe-se de forma breve a formação e teoria das ondas do mar, e seus parâmetros de caracterização. É apresentada a definição e alguns tipos de conversores de energia das ondas. Na sequência, há uma exploração das diferentes abordagens da literatura sobre o dispositivo PHS, suas variadas aplicações e aspectos construtivos.

2.1 Ondas marítimas

As ondas podem ser formadas por diferentes forças e suas combinações. Todavia, os CEOs trabalham, no geral, com a extração da energia das ondas de gravidade. O atrito do vento com a superfície oceânica gera ondas de gravidade e, enquanto o vento está atuando sobre a superfície há um crescimento na altura das ondas até que ela atinja um ponto limite no qual a onda está plenamente desenvolvida. Quando o vento para de soprar ou a onda atinge sua altura limite, ela continua a se propagar pelo oceano e é chamada de *swell* (Pecher e Kofoed, 2017).

As ondas marítimas são irregulares e suas características variam no espaço e tempo. Para descrever adequadamente a superfície oceânica é necessário medir as ondas através de equipamentos *in situ* ou por sensoriamento remoto (Holthuijsen, 2007). Esses procedimentos raramente estão disponíveis, conduzindo à, atualmente, dois métodos de aproximação considerados válidos para a representação da superfície do oceano: (a) espectros de ondas; (b) aplicação de teorias analíticas de ondas regulares. Machado *et al.* (2021) explica que essa simplificação é válida já que fornece informações importantes sobre a hidrodinâmica dos dispositivos CEO, apesar de que os resultados de potência energética disponível não refletem adequadamente a realidade.

As teorias de ondas regulares são soluções analíticas idealizadas, muito úteis para representação das ondas em águas profundas e no dimensionamento de estruturas navais e oceânicas. Por isso, inúmeros estudos numéricos para CEO fazem uso de uma análise com ondas regulares, apesar da superfície oceânica ser irregular (Chakrabarti, 2005). A Figura **2.1** apresenta a representação de ondas regulares e suas características, enquanto as respectivas nomenclaturas são apresentadas na sequência.

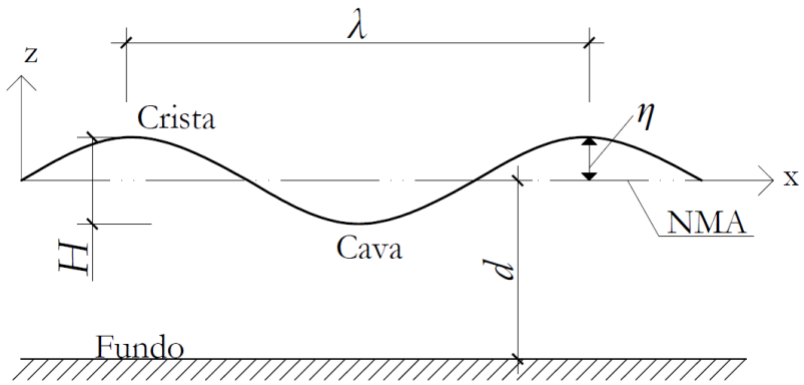


Figura 2.1: Características das ondas regulares.

Considerando a Figura **2.1**, as principais características das ondas regulares são (Dean e Dalrymple, 1991):

Crista: é o ponto mais alto atingido pela elevação da superfície livre (η) da água comparado com o plano do nível médio da água (NMA);

Cava: é o ponto mais baixo atingido pela η da água comparado com o plano do NMA;

Comprimento da onda (λ) [m]: é a distância entre duas cristas ou cavas, sucessivas;

Altura da onda (H) [m]: é a distância vertical entre a crista e a cava das ondas;

Profundidade (d) [m]: é a distância do fundo do mar até o NMA;

Elevação da superfície livre (η) [m]: é a distância instantânea em relação ao NMA em repouso;

Período da onda (T) [s]: é o tempo que duas cristas ou cavas sucessivas levam para passar por um mesmo ponto;

Celeridade (C) [m/s]: representa a velocidade de propagação das ondas.

Thorpe (1999) explica que as características apresentadas acima referem-se às ondas monocromáticas. A superfície do oceano é formada por ondas aleatórias em termos de altura, período e direção. Delimitando um período fixo, é possível caracterizar alguns parâmetros estatísticos para descrever o que é denominado de "estado de mar".

O segundo método de descrição analítica/estatística da superfície irregular do oceano a serem apresentados são os espectros de ondas. O fundamento de um espectro de ondas está em sobrepor muitas ondas monocromáticas (regulares) com diferentes frequências e alturas, por exemplo, através de uma série de Fourier. Isso pode ser feito matematicamente de diferentes maneiras e, portanto, existem diferentes modelos espectrais que são indicados para diferentes condições de aplicação (Holthuijsen, 2007; Pecher e Kofoed, 2017).

Apesar da extensa pesquisa de QM e CEO com ondas regulares, o presente estudo busca aprimorar os resultados da hidrodinâmica do dispositivo PHS sob a incidência de ondas irregulares de um estado de mar realístico. Para tal é aplicada a Metodologia WaveMIMO apresentada por Machado *et al.* (2021) que tem o objetivo de oferecer uma alternativa econômica às medições de ondas *in situ* e, ao mesmo tempo, permitir a representação de um estado de mar realístico em um estudo numérico das ondas do mar. Os autores da metodologia ainda explicam que "com essa abordagem, será possível avaliar numericamente o comportamento hidrodinâmico dos CEOs quando submetidos a um estado de mar realístico relacionado ao local de instalação pretendido" (Machado *et al.*, 2021, p. 2131).

Destaca-se aqui o parâmetro de análise estatística da altura significativa (H_s) que representa a altura média do terço superior de uma série de alturas de ondas (H). A determinação de H_s é essencial no presente estudo, tanto para a determinação da onda regular representativa do estado de mar realístico quanto nos resultados do estudo de casos e análise do dispositivo na função de QM (Dean e Dalrymple, 1991).

2.1.1 Ondas Lineares - Onda de Airy

A Teoria Linear é a mais simples descrição de uma onda, considera-se que a cava e a crista da onda têm as mesmas dimensões (Dean e Dalrymple, 1991) e a altura é considerada pequena em relação ao comprimento da onda. Algumas simplificações também são aplicadas: os efeitos da turbulência; da viscosidade e a tensão superficial são desconsiderados, além de ser um escoamento bidimensional e irrotacional. Essas restrições são chamadas de condições de contorno (CC) e são descritas em Dean e Dalrymple (1991) de forma mais aprofundada.

A onda linear de Airy é definida pela equação da dispersão (Dean e Dalrymple, 1991):

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \tag{2.1}$$

onde g é a aceleração da gravidade [m/s^2], k é o número de onda [m^{-1}], definido como:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{2.2}$$

e σ é a frequência angular da onda [s^{-1}], dada por:

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \tag{2.3}$$

A partir da Eq. (2.1) e considerando as Eq. (2.2) e Eq. (2.3), obtém-se a equação do comprimento da onda:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}\tanh(kd) \tag{2.4}$$

A determinação do comprimento da onda é realizada através de um processo iterativo. Visando simplificar a solução, a Teoria Linear classifica a profundidade relativa da onda (d/λ). Essa classificação é apresentada na Tabela **2.1**.

Tabela 2.1: Profundidade relativa da onda e assíntotas das funções hiperbólicas.
Fonte: Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991.

Classificação	Profundidade relativa	Valor a ser adotado para $\tanh(kd)$
Águas rasas	$d/\lambda \leq 0{,}05$	$\approx kd$
Águas intermediárias	$0{,}05 < d/\lambda < 0{,}50$	$\tanh(kd)$
Águas profundas	$d/\lambda \geq 0{,}50$	≈ 1

A equação da elevação da superfície livre (η), componente horizontal (u) e a componente vertical (w) da velocidade de propagação da onda linear progressiva, são dadas, respectivamente, por (Dean e Dalrymple, 1991):

$$\eta = \frac{H}{2}\cos(kx - \omega t) \tag{2.5}$$

$$u = \frac{H}{2}\sigma\frac{\cosh k(d+z)}{\operatorname{senh}(kd)}\cos(kx - \sigma t) \tag{2.6}$$

$$w = \frac{H}{2}\sigma\frac{\operatorname{senh} k(d+z)}{\operatorname{senh}(kd)}\operatorname{sen}(kx - \sigma t) \tag{2.7}$$

onde x é a coordenada horizontal [m], z é a coordenada vertical [m] e t é o tempo [s].

2.1.2 Ondas Regulares – Teoria de Stokes de 2ª ordem

A teoria de ondas de Stokes de 2ª ordem é aplicável em águas profundas e sua série de perturbações adicionada às equações da Teoria Linear melhora a descrição analítica da relação entre a velocidade do escoamento e a altura da onda. Os perfis de onda são

combinados para fornecer uma crista mais íngreme e uma cava mais rasa. Essa abordagem fornece uma elevação η e velocidade da onda mais precisa. É uma solução analítica frequentemente considerada no projeto de estruturas costeiras e *offshore* (Chakrabarti, 2005; Dean e Dalrymple, 1991; Holthuijsen, 2007).

A equação da elevação da superfície livre (η), das componentes horizontal (u) e vertical (w) da velocidade da onda na teoria de Stokes de 2ª ordem são dadas, respectivamente, por (Dean e Dalrymple, 1991):

$$\eta = \frac{H}{2}\cos(kx-\sigma t) + \frac{H^2 k}{16}\frac{\cosh(kd)}{\operatorname{senh}^3(kd)}(2+\cosh 2kd)\cos 2(kx-\sigma t) \qquad (2.8)$$

$$u = \frac{H}{2}\frac{gk}{\sigma}\frac{\cosh k(d+z)}{\cosh(kd)}\cos(kx-\sigma t) + \frac{3}{16}\frac{H^2\sigma k\cosh 2k(d+z)}{\operatorname{senh}^4(kd)}\cos 2(kx-\sigma t) \qquad (2.9)$$

$$w = \frac{H}{2}\frac{gk}{\sigma}\frac{\operatorname{senh} k(d+z)}{\cosh(kd)}\operatorname{sen}(kx-\sigma t) + \frac{3}{16}\frac{H^2\sigma k\ \operatorname{senh} 2k(d+z)}{\operatorname{senh}^4(kd)}\operatorname{sen} 2(kx-\sigma t) \qquad (2.10)$$

Para determinar a solução analítica que melhor representa as ondas regulares em análise, considerando os limites de aplicação de cada teoria, é utilizado o gráfico apresentado na Figura **2.2**.

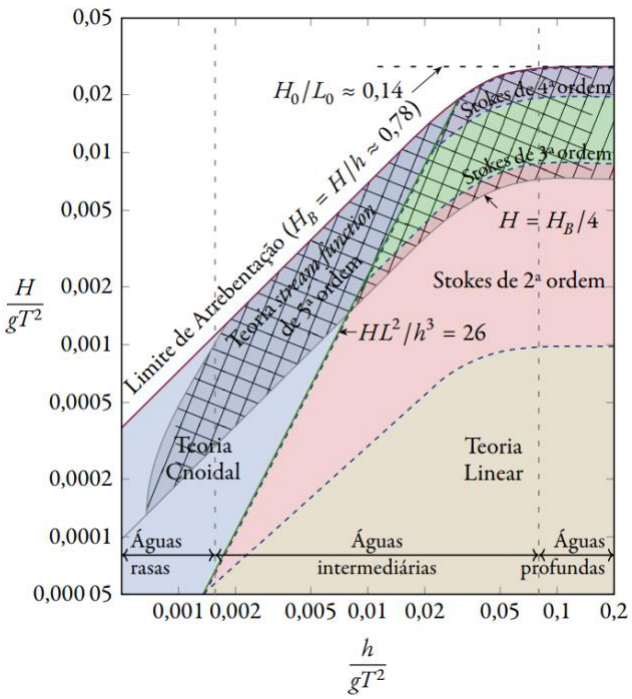


Figura 2.2: Diagrama de validade das principais teorias de ondas.
Fonte: Modificado de Kraaiennest (2012) apud Oleinik (2021).

2.1.3 Ondas Irregulares

A subseção de "Ondas Irregulares" tem o objetivo de introduzir os métodos espectrais mais comuns para descrição de um estado de mar, alguns softwares de geração de ondas e, por fim, destacar suas diferenças em relação à metodologia WaveMIMO aplicada no presente estudo. Para uma compreensão mais aprofundada das restrições de aplicação de cada metodologia e suas formulações, recomenda-se a leitura dos autores mencionados ao longo desta seção.

Dean e Dalrymple (1991) explicam que a superfície do mar é irregular, composta com uma variedade de ondas sobrepostas em diferentes frequências, fases e amplitudes, conforme apresentado na Figura **2.3**. As teorias de ondas monocromáticas não são suficientes para descrever integralmente a elevação e a energia disponível no mar, por isso a abordagem espectral tem sido uma solução mais aproximada para a reprodução de um estado de mar com tempo e localização determinada.

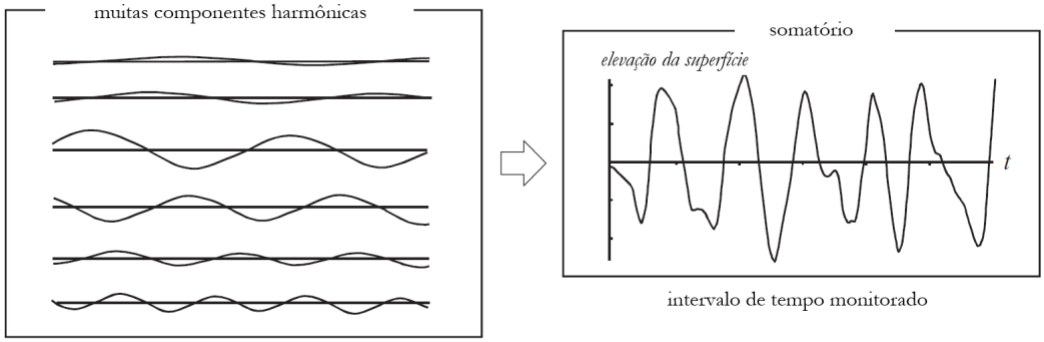


Figura 2.3: Somatório de ondas harmônicas (monocromáticas) com amplitude e fase constantes, porém aleatórias, criam a superfície irregular do mar.
Fonte: adaptado de Holthuijsen (2007).

A medição das ondas irregulares no mar através de boias resulta em dados de elevação η ao longo do intervalo de tempo. Esses dados podem ser aplicados à análise espectral através da Transformação Rápida de Fourier (Dean e Dalrymple, 1991, p. 194). A Figura **2.4** ilustra a transformação da série η para a modelagem espectral na frequência da amplitude e da fase das ondas monitoradas.

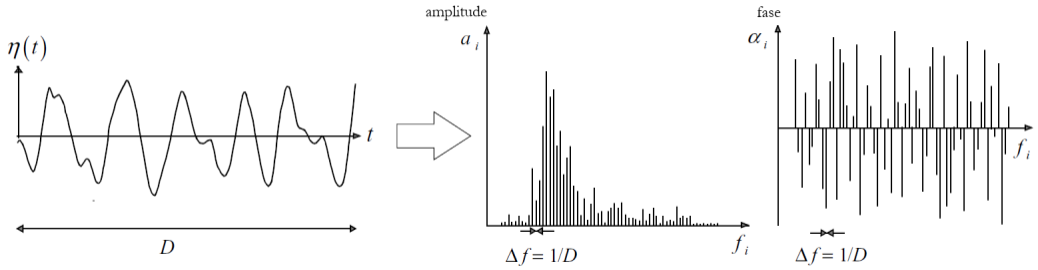


Figura 2.4: Elevação da superfície livre observada e seus respectivos espectros da amplitude e fase.
Fonte: adaptado de Holthuijsen (2007).

Os estados de mar irregulares de curto prazo e estacionário podem ser descritos por um espetro de ondas, ou seja, a função de densidade espectral de energia do deslocamento vertical da superfície do mar. Os espectros de onda podem ser apresentados sob a forma de tabela, como espectros medidos, ou através de uma fórmula analítica parametrizada. O espetro de ondas mais adequado depende da zona geográfica com a batimetria local e a severidade do estado do mar. O objetivo de descrever as ondas oceânicas com um espetro não é tanto descrever em detalhe uma observação da superfície do mar (i.e., um registo temporal), mas sim descrever a superfície do mar com todas as possíveis agitações naquelas condições de observação (USA Army, 1984).

Os espectros de agitação do mar (elevação) mais simples são distribuições unidirecionais, envolvendo o período e altura das ondas. O modelo básico é o de Pierson-Moskowitz (PM), desta deriva o espectro *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP) e seus modelos com aplicação geográfica restrita *Texel–Marsen–Arsloe* (TMA) e *Det Norske Veritas* (DVN). Todavia, uma aproximação mais adequada da superfície do mar deve considerar um espectro bidirecional, com distribuição na frequência e na direção da onda (USA Army, 1984).

O espectro PM foi originalmente proposto para mares totalmente desenvolvidos. O espectro JONSWAP amplia o PM para incluir mares com área (*fetch*) limitado, descrevendo estados de mar em desenvolvimento (Hasselmann *et al.*, 1976; Pierson e Moskowitz, 1964). Ambos os espectros descrevem condições de mar com vento que ocorrem com frequência nos estados de mar mais severos (USA Army, 1984). Os estados de mar moderado e baixo em áreas de mar aberto geralmente são compostos de mar de *sea* e *swell*. Um espectro de dois picos pode ser usado para levar em conta tanto o mar de *sea* quanto *swell*.

A Figura **2.5** ilustra um exemplo de espectro para cada característica de elevação da superfície livre. É interessante destacar que, na modelagem espectral, a área abaixo da curva é calculada como a energia total do intervalo monitorado e as ondas são descritas, principalmente, pelo valor da altura significativa da série (Samad *et al.*, 2022).

Essa breve conceituação das ondas irregulares no mar exemplifica os métodos disponíveis para tratamento dos dados de um estado de mar. Para além da modelagem espectral analítica e o monitoramento com boias no mar, é importante mencionar que há softwares de geração de estados de mar como o WAVEWATCH III e o TOMAWAC.

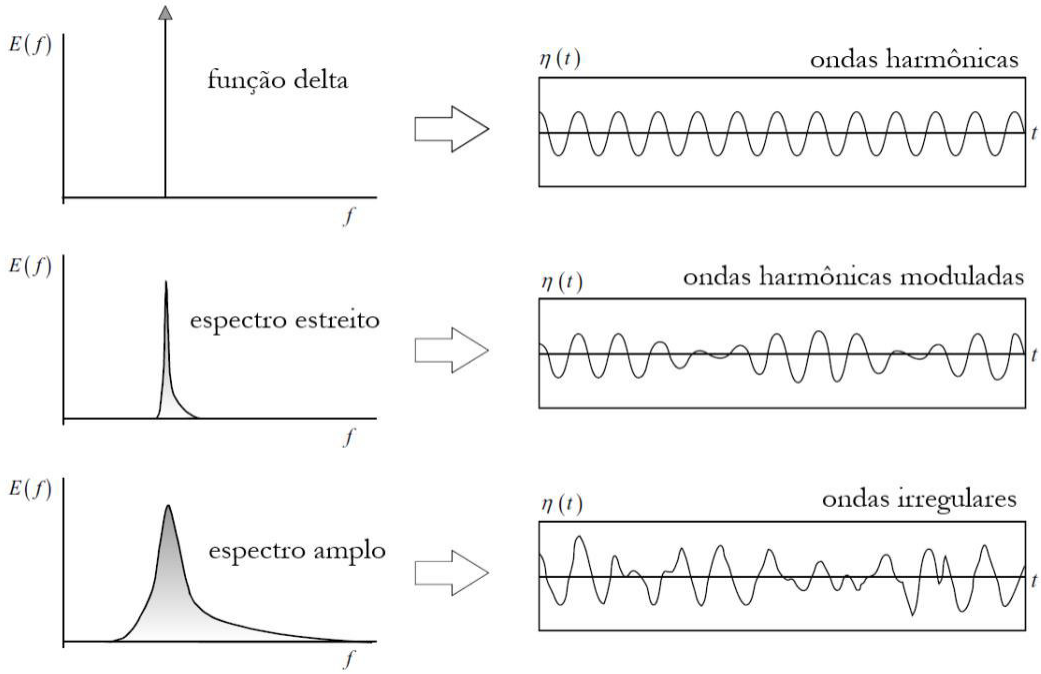


Figura 2.5: Característica das ondas (ir)regulares para três diferentes amplitudes do espectro.
Fonte: adaptado de Holthuijsen (2007).

O WAVEWATCH III[2] consiste no modelo de ondas de terceira geração WAVEWATCH III (*WAVE-height, WATer depth* e *Current Hindcasting*), desenvolvido pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA/NCEP - USA) que resolve a equação para a densidade do espectro angular (direção) da ação das ondas aleatórias.

O TOMAWAC[3] (TELEMAC-*Based Operational Model Addressing Wave Action Computation*) é um software utilizado para modelar a propagação de ondas em zonas costeiras. Através do Método de Elementos Finitos (MEF), resolve uma equação simplificada para a densidade espetro-angular da ação das ondas. Isto é feito para condições de estado estacionário (isto é, com uma profundidade de água fixa durante

[2] National Weather Service (USA), disponível em: www.weather.gov/sti/coastalact_ww3

[3] Sistema de modelagem TELEMAC-MASCARET, disponível em: www.opentelemac.org/index.php/presentation?id=20

toda a simulação). O software compõe o sistema de modelagem numérica da TELEMAC-MASCARET.

Por fim, a metodologia WaveMIMO (Machado *et al*., 2021) a ser apresentada posteriormente, propõe um novo procedimento para tratamento dos dados de ondas irregulares para a modelagem computacional de conversores de energia das ondas. A metodologia transforma tanto elevações medidas com boias no mar quando estados de mar gerados por softwares em condições de contorno para simulações numéricas de CFD.

Maciel *et al.* (2023) destaca que:

> "a aplicação da metodologia WaveMIMO possibilita a investigação de diferentes configurações geométricas de um CEO sob a incidência da mesma sequência de ondas irregulares. Esse aspecto promove um estudo de otimização geométrica com uma comparação de desempenho mais justa. Outras abordagens, por exemplo, o espectro JONSWAP ou o espectro Pierson-Moskowitz, não podem gerar a mesma sequência de ondas irregulares em diferentes simulações." (tradução livre, p. 7)

Os autores ainda explicam que a metodologia WaveMIMO pode ser aplicada tendo apenas uma série η. Porém, uma limitação é que as ondas de alta frequência (período curto) não são completamente propagadas ao longo do canal. O que, no presente estudo, não irá trazer grandes impactos para a análise da PHS na função de QM e CEO.

2.2 Dispositivos conversores da energia das ondas (CEO)

Um dispositivo CEO, converte a energia cinética contida na onda do mar em energia elétrica por meio de diferentes processos. Suas vantagens são apresentadas em Samad *et al.* (2022) e resumidas abaixo:

- O consumo de energia gerado pela conversão reduz o efeito das ondas que atingem a linha de costa;
- Acoplando um dispositivo CEO a um QM, o custo dessa inclusão pode ser facilmente absorvido, devido a sua dupla função;
- Dispositivos CEO com absorção pontual podem ser utilizados como boias;
- De certa forma, alguns dispositivos não afetam a estética da costa e permitem o crescimento da flora e fauna marinhas.

Dispositivos CEO podem ser classificados de diferentes formas, conforme apresentado a seguir (Samad *et al.*, 2022):

A. Em relação ao seu tamanho horizontal e orientação para onda incidente

Se o comprimento do dispositivo for menor que o da onda incidente, é classificado como *point absorber*; se a dimensão do dispositivo for próxima ou maior, é classificado como *line absorber*. No primeiro caso, para que haja uma produção significativa de energia é necessário centenas de dispositivos. A segunda subclassificação pode se desdobrar em *terminator* e *attenuator*, conforme o alinhamento do dispositivo em relação à crista da onda incidente. Um dispositivo *line absorber* age como *terminator* quando está alinhado à direção de propagação da onda, já o *attenuator* está perpendicular à crista da onda.

B. Pela posição em relação à distância da costa

A localização do CEO pode ser na costa (*onshore*), em zonas próximas à costa (*nearshore*) ou afastado da costa (*offshore*). Considera-se os limites de águas rasas e intermediárias para dispositivos próximos à costa e, sistemas afastados da costa ocorrem em águas profundas.

A definição entre águas rasas, intermediárias e profundas é apresentada na Tabela **2.1**. A proporção entre a profundidade e o comprimento da onda incidente é determinante para compreender os efeitos da força das ondas no fundo do mar. Isso significa que, para um mesmo ponto geográfico, com diferentes valores de T e H e, consequentemente, diferentes comprimentos de ondas, tem-se diferentes profundidades relativas.

Os dispositivos *onshore* apresentam como vantagem o fácil acesso para construção e manutenção, além da redução dos sistemas de transmissão e distribuição da energia. Porém, apresentam a desvantagem de que as ondas que atingem a costa, geralmente, possuem menor energia. Os dispositivos *nearshore* surgem como uma situação ponderada entre as facilidades da instalação sobre a costa e a energia das ondas com menor perda devido à interação com o fundo. Dispositivos *offshore* exploram as ondas de maior energia, no entanto há dificuldades quanto à manutenção e à transmissão da energia gerada para a rede elétrica no continente.

C. Pela posição em relação ao nível médio da água

A localização do dispositivo CEO em relação à superfície livre pode ser: submerso ou parcialmente submerso. Além de poder ser um dispositivo flutuante livre ou preso junto ao fundo.

D. Pelo seu princípio de funcionamento.

Aqui são brevemente apresentados os modelos de operação dos CEO. Com o aumento da pesquisa na área de fontes renováveis de energia do mar, é evidente que os dispositivos apresentados aqui não são definitivos e únicos. A Figura 2.6 ilustra alguns tipos de dispositivos CEO, esses são classificados como Coluna de Água Oscilante (OWC - *Oscillating Water Column*), corpos oscilantes que podem ser tanto *point* como *line absorbers,* ou Galgamento (*overtopping devices*).

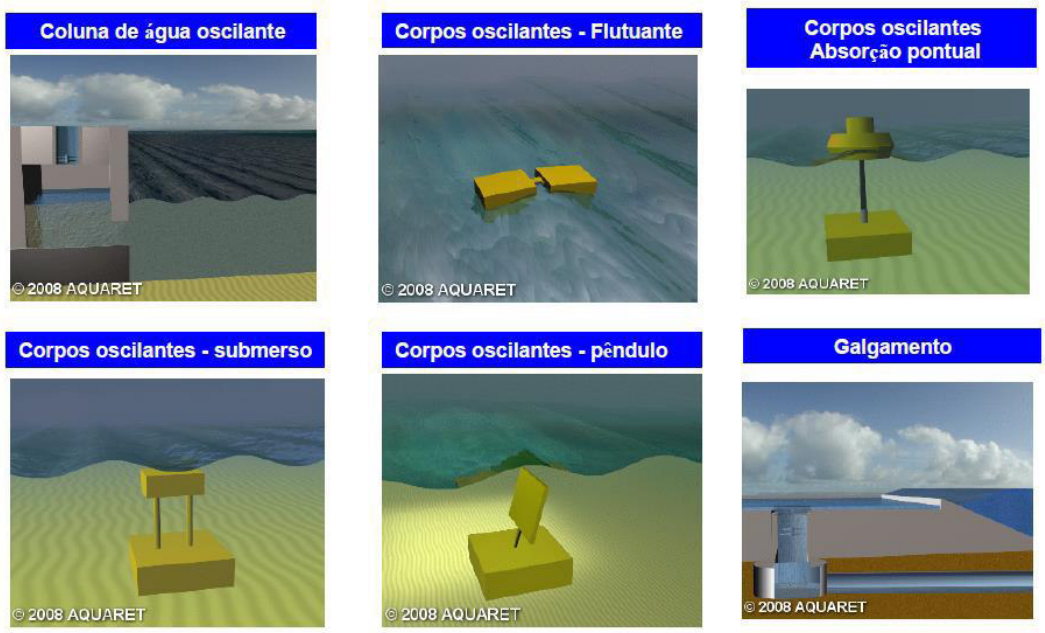


Figura 2.6: Funcionamento dos dispositivos conversores de energia das ondas[4].

O dispositivo de interesse do presente estudo, a PHS, não é apresentada por determinados autores como um dispositivo CEO. Dentre as possíveis motivações para tal, supõe-se a origem da PHS com objetivo de proteção costeira e operações em alto mar. A proposta de utilização da PHS como conversor de energia das ondas, surgiu apenas na década de 1990 sendo uma adição à função de QM já existente da estrutura. Contudo, o princípio físico de funcionamento da PHS baseia-se em uma estrutura submersa fixa, que depende da diferença de pressão (escoamento gerado pela propagação da onda) para acionar uma turbina funcional em ambos os sentidos que transformará esse movimento mecânico em energia elétrica, ou seja, é um dispositivo CEO.

[4] Disponível em: www.aquaret.com, acesso em 10/05/2025.

3 Modelagem matemática e numérica

O presente capítulo descreve a metodologia WaveMIMO, utilizada para obtenção do estado de mar realístico, e sua aplicação nas simulações numéricas. O modelo numérico e domínio computacional são apresentados, assim como os parâmetros estatísticos de avaliação dos resultados. As descrições neste capítulo se aplicam tanto para a incidência de ondas regulares representativas quanto ondas irregulares realísticas do estado de mar ocorrido na costa da cidade de Rio Grande (RS).

3.1 Estado de mar realístico (metodologia WaveMIMO)

A metodologia WaveMIMO, apresentada por Machado *et al.* (2021), permite a propagação de um estado de mar realístico no software ANSYS Fluent a partir do tratamento do espectro de onda para uma determinada região. No presente estudo, o espectro de ondas aplicado resulta de uma simulação numérica realizada no software TOMAWAC, para um local e intervalo de tempo delimitado.

Na Figura 3.1 é apresentado o diagrama que representa de forma simplificada as etapas de tratamento dos dados através da metodologia WaveMIMO. Será apresentado de forma breve o processo para obtenção das velocidades orbitais (condições de contorno) aplicadas no presente estudo. A obtenção destas não faz parte do presente estudo, apenas a sua aplicação no software ANSYS Fluent.

Para obter o estado de mar realístico em outros pontos da costa é necessário executar todo o procedimento apresentado por Machado *et al.* (2021). Esse processo não é escopo do presente estudo, pois para as presentes simulações foram utilizados diretamente os dados de velocidade orbital das ondas para condição de contorno na velocidade de entrada do canal numérico.

No presente estudo, assim como Maciel *et al.* (2023), a aplicação da metodologia WaveMIMO considera o estado de mar realístico para a região do município do Rio Grande (RS), Brasil. O estado de mar realístico gerado no TOMAWAC é compreendido no período entre 01/01/2014 e 31/12/2014, o ponto no qual foram extraídos os dados para o presente trabalho está localizado nas coordenadas geográficas 52° 17′ 47.25″ O, 32° 22′ 30.95″ S, conforme Figura 3.2, em uma distância de 2 km da costa e apresenta uma profundidade de 9,52 m.

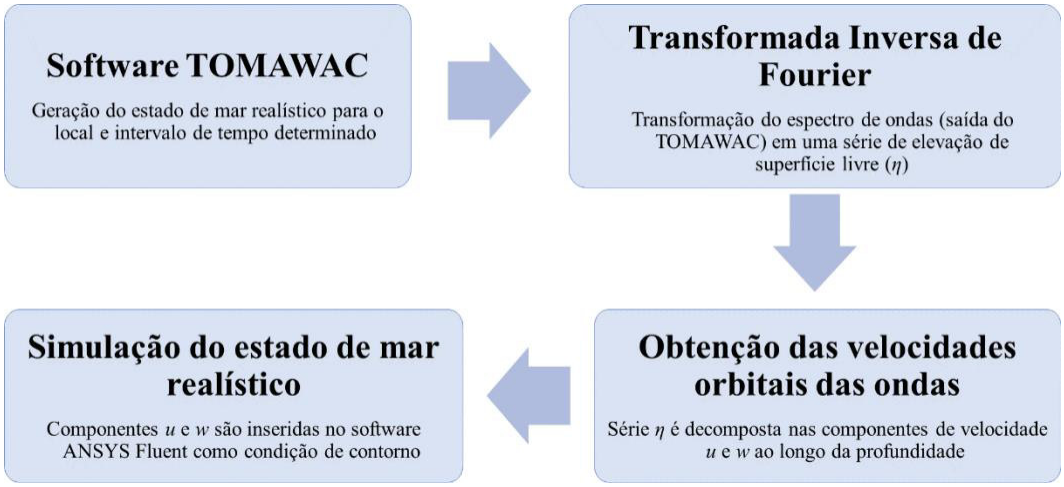


Figura 3.1: Diagrama da metodologia WaveMIMO.
Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2021)

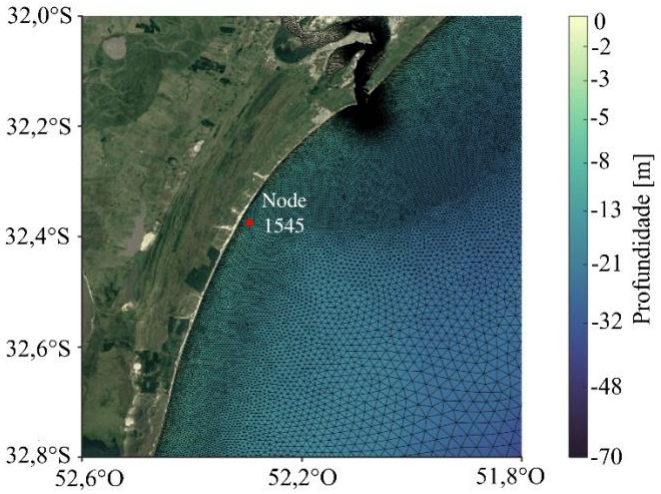


Figura 3.2: Localização do ponto de extração do estado realístico de mar.
Fonte**:** Adaptado de Maciel *et al.* (2023).

Executada a transformação do espectro de ondas em uma série temporal de elevação da superfície livre, é realizada a análise estatística desta série por meio de um histograma de pares de H_s e períodos médios das ondas (T_m). Para o estado de mar considerado, o histograma das ondas é apresentado na Figura 3.3, onde as ondas mais frequentes apresentam $H_s = 0{,}66$ m e $T_m = 6{,}30$ s. Considerando os valores característicos da onda regular representativa, o comprimento desta onda é determinado através da equação da dispersão (Eq. 2.1), resultando em $\lambda = 51{,}6$ m.

A Figura **3.4** apresenta o espectro de frequência de um dia com as características mais semelhantes em relação aos valores mais frequentes da série anual apresentada na Figura **3.3**. As características de onda da Figura **3.3** são definidas como as ondas regulares representativas do estado do mar de Rio Grande (RS). Essa definição será um parâmetro importante para a discretização de malha e a verificação da metodologia WaveMIMO.

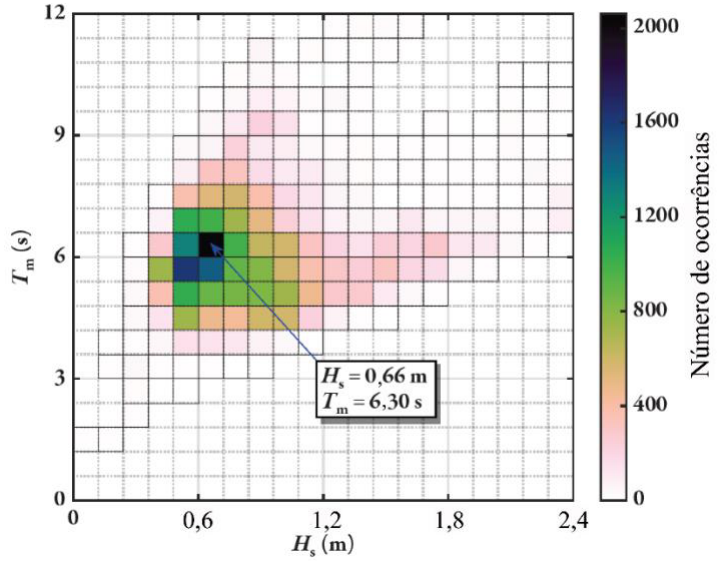


Figura 3.3: Histograma bivariado da série temporal da altura significativa e período médio das ondas do estado de mar de Rio Grande (RS) no ano de 2014.
Fonte: Adaptado de Maciel *et al.* (2023).

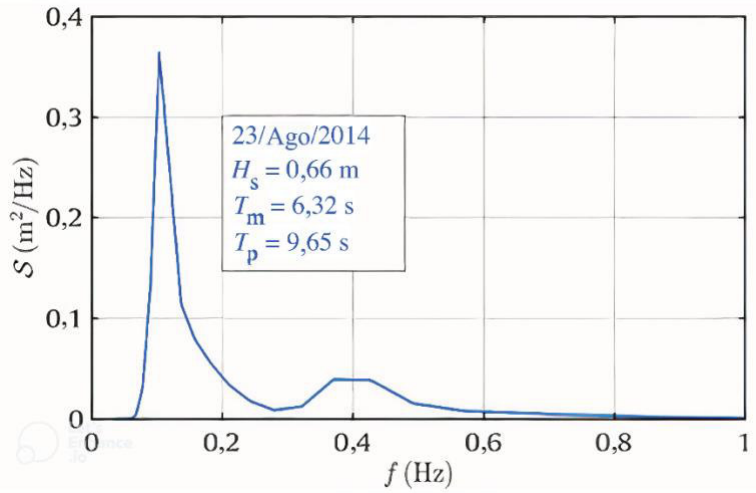


Figura 3.4: Densidade espectral da frequência *f* do estado de mar realístico em 23 de agosto de 2014 às 00:00.
Fonte: Adaptado de Maciel *et al.* (2023).

Por fim, as Figura **3.5** e Figura **3.6** e apresentam as ondas regulares representativas e irregulares realísticas do estado de mar, respectivamente, que serão propagadas nas simulações numéricas do canal bidimensional, obtidas do espectro da Figura **3.4**.

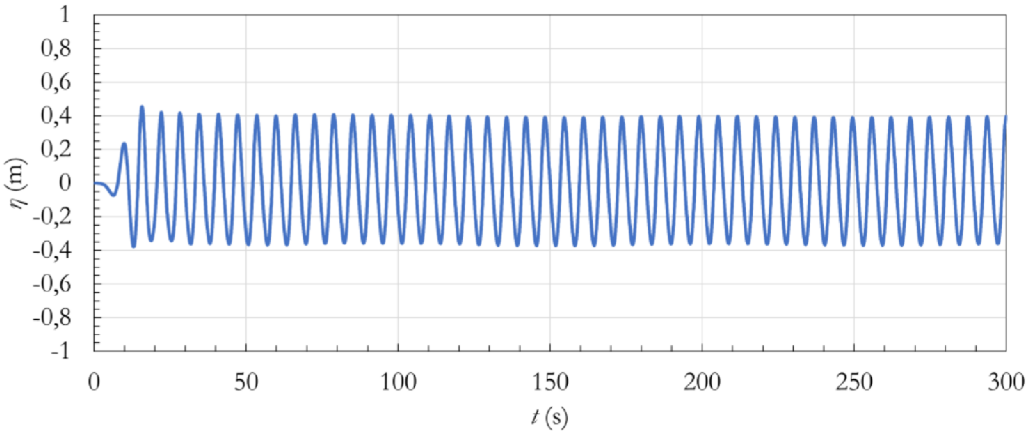


Figura 3.5: Elevação da superfície livre (η) das ondas regulares representativas do estado de mar propagado.

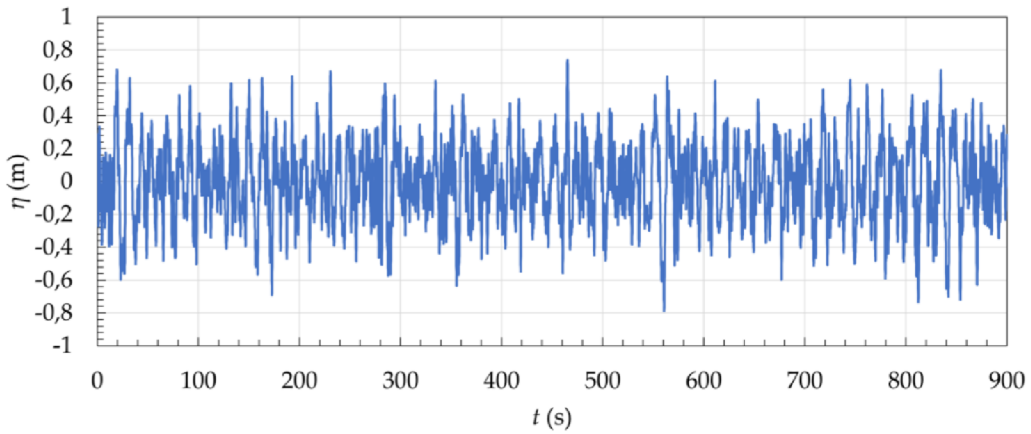


Figura 3.6: Elevação da superfície livre (η) das ondas irregulares realísticas do estado de mar propagado.

A metodologia WaveMIMO é aplicada para o estudo de caso. A geometria do canal adota a recomendação de Gomes *et al.* (2018) para o comprimento do canal de ondas, ou seja, é 5 vezes o comprimento da onda regular representativa do estado de mar que tem o valor de λ = 51,6 m, obtido através de H_s e T_m e a Equação da Dispersão (Eq. 2.1). Resultando em um comprimento do canal de ondas de 258 m. A altura do canal de ondas é 12 m e profundidade deste é de 9,52 m, assim como em Maciel *et al.* (2023).

Para aplicar a série η na simulação com o canal numérico no software ANSYS Fluent, é necessário transformar os dados de elevação da Figura **3.5** para ondas regulares representativas e Figura **3.6** para ondas irregulares realísticas nas componentes da velocidade u e w ao longo do tempo. Esses dados serão impostos como condição de contorno (CC) de velocidade prescrita. Mais informações sobre essa transformação de dados de η para u e w podem ser encontradas em Machado *et al.* (2021) e Oleinik *et al.* (2021).

Já em Maciel *et al.* (2021), além da validação da metodologia WaveMIMO para a geração de ondas regulares, foi investigado o número de subdivisões da região de imposição da velocidade de entrada com o objetivo de obter a máxima aproximação entre as ondas geradas no modelo numérico e as ondas na série de elevação da qual as velocidades foram extraídas. O resultado obtido por Maciel *et al.* (2021) indica que a região de entrada da velocidade (ver Figura 3.5) deve ser subdividida em 10 segmentos. Para cada um deles, as componentes u e w são determinados ao longo do tempo com uma profundidade fixa na base do segmento. Assim, cada um dos 10 segmentos terá seus próprios perfis de velocidade ao longo do tempo, o que permite a geração de ondas regulares representativas e ondas irregulares realísticas do estado do mar.

3.2 Modelo computacional

O modelo computacional envolve o dispositivo PHS sob a incidência de ondas regulares representativas e ondas irregulares realísticas do estado de mar. As simulações numéricas foram realizadas no software ANSYS Fluent, o qual é um pacote de CFD baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). O software soluciona as equações diferenciais do escoamento para conservação da massa, quantidade de movimento e a equação do transporte de fração de volume de água. Neste estudo, aplicam-se hipóteses simplificativas para a solução numérica do escoamento, são elas: 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 da conservação de massa e quantidade de movimento para a mistura de água e ar são, respectivamente (Versteeg e Malalasekera, 1981):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{3.1}$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\nabla \cdot \vec{v})\vec{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} - \rho \vec{g} + \vec{S} \tag{3.2}$$

onde ρ é a massa específica do fluido [kg/m^3], $\vec{v}$ é o vetor velocidade [m/s], p é a pressão [Pa], $\bar{\bar{\tau}}$ é o tensor de deformação [N/m^2], e $\vec{S}$ é o termo sumidouro que representa a dissipação de energia quando uma praia numérica é implementada [N/m^3].

Para reproduzir numericamente a interação entre água e ar foi adotado o modelo *Volume of Fluid* (VOF) proposto por Hirt e Nichols (1981). Este tem a premissa que o volume de um fluido não pode ocupar o volume de outro fluido, isso é representado em cada volume de controle do canal numérico pela fração volumétrica (α). A equação de transporte da fração volumétrica é adicionada ao modelo, como (Srinivasan *et al.*, 2011):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \tag{3.3}$$

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

$$\rho = \alpha \rho_{água} + (1 - \alpha) \rho_{ar} \tag{3.4}$$

$$\mu = \alpha \mu_{água} + (1 - \alpha) \mu_{ar} \tag{3.5}$$

Conforme Srinivasan *et al.* (2011), ao tratar as fronteiras da fase como uma interface incorporada e adicionar os termos de fonte apropriados às leis de conservação, esse modelo permite, consequentemente, a identificação da elevação da superfície livre. O modelo considera $\alpha = 1$ quando a fração volumétrica contém apenas água, $\alpha = 0$ quando contém apenas ar e valores de $0 < \alpha < 1$ indicam a interface do fluido contida na fração volumétrica.

A Figura **3.7** apresenta um esquema da geometria do canal numérico bidimensional com a PHS e as CC aplicadas ao modelo. As dimensões delimitadas na Figura **3.7** são: altura do canal de ondas (H_c); comprimento do canal de ondas (L_c); profundidade do canal (d); distância horizontal da entrada do canal até o início da PHS (X_p); comprimento da PHS (L_p); profundidade da PHS (h_p); espessura da PHS (e_p); comprimento da PN (L_{praia}). As dimensões para os processos de verificação, validação e o estudo de casos são apresentadas separadamente nas suas respectivas seções.

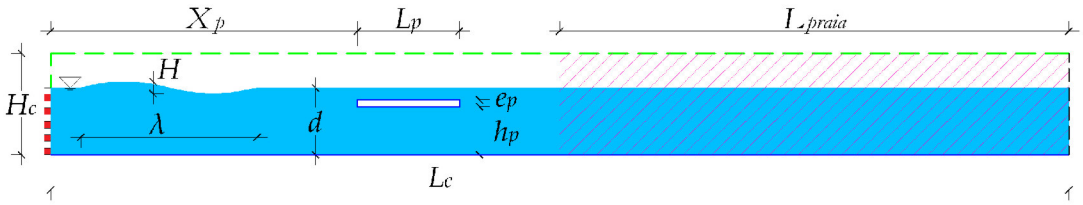


Figura 3.7: Geometria com a PHS.

Em relação às CC, na Figura **3.7**, para o fundo do canal e o contorno da PHS, linha na cor azul, é atribuída a condição de impermeabilidade, parede fixa, ou seja, não há transporte de massa através das arestas. A linha tracejada verde é uma saída de pressão. Na lateral direita do canal há uma saída de pressão, linha tracejada preta, com profundidade constante, denominada perfil hidrostático.

O gerador de ondas numérico localizado na lateral esquerda do canal, com 10 segmentos e hachura em vermelho e branco, é considerado uma entrada de velocidade. Para gerar ondas regulares, a metodologia convencional consiste em impor as

componentes da velocidade a partir das equações analíticas para ondas regulares, ou seja, Eqs. (2.5) e (2.6) ou Eqs. (2.8) e (2.9) (Seibt *et al.*, 2023; Seibt *et al.*, 2014; Gomes *et al.*, 2018). Devido à metodologia WaveMIMO aplicada no presente estudo, o procedimento para inserção da velocidade como CC é através de perfis de velocidade prescritos com dados discretos para cada componente da velocidade *u* e *w* ao longo do tempo em cada uma das 10 subdivisões da região de entrada do canal. Essa forma diferenciada de aplicar as componentes da velocidade é utilizada em todas as simulações numéricas do presente estudo visto que a metodologia WaveMIMO permite não apenas a geração de ondas regulares representativas, mas especialmente a geração de ondas irregulares realísticas de um estado de mar. Cabe destacar que a metodologia WaveMIMO tem sido aplicada em recentes publicações sobre energia das ondas, como em Thum *et al.* (2024), Paiva *et al.* (2025) e Oleinik *et al.* (2025).

A CC de PN, região hachurada em rosa na Figura **3.7**, permite a redução do domínio computacional e evita a interferência das ondas refletidas nos resultados. O amortecimento das ondas é realizado em uma região limitada por 2,5λ na extremidade oposta do canal em relação à região de geração das ondas, seguindo a recomendação de Machado *et al.* (2021) e regida pela equação do termo sumidouro conforme Zwart *et al.* (2007) e Park *et al.* (1999):

$$S = \left[\left(C_1 \rho V + \frac{1}{2} C_2 |V| V \right) \left(1 - \frac{z - z_\eta}{z_b - z_\eta} \right) \left(\frac{x - x_s}{x_e - x_s} \right)^2 \right] \tag{3.6}$$

onde C_1 (s^{-1}) e C_2 (m^{-1}) são os coeficientes de amortecimento linear e quadrático, $\vec{V}$ é a velocidade (m/s), 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 $C_1 = 20$ s^{-1} e $C_2 = 0$ m^{-1} conforme recomendado por Lisboa *et al.* (2016).

A discretização espacial utilizou a metodologia de malha *stretched* assim como Gomes *et al.* (2018) e baseada em Mavriplis (1997), onde o refino da malha é aumentado apenas nas regiões de maior variação ou interesse no resultado, de forma a reduzir o esforço computacional. Essa estratégia de geração de malha é amplamente usada em simulações numéricas de geração e propagação de ondas e, consequentemente, é amplamente adotada na modelagem computacional aplicada aos CEOs. Para o presente estudo, a malha *stretched* é empregada nas regiões antes e depois da região em que a PHS está localizada, enquanto na região da PHS é empregada uma malha mais refinada para capturar o comportamento hidrodinâmico no entorno do dispositivo.

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, 2004). Os fatores de sub-

relaxação para a solução das equações de conservação da massa e quantidade de movimento foram, respectivamente, 0,3 e 0,7. Foi utilizado o modelo VOF com formulação explícita, desta forma os fluxos nas células são interpolados com o esquema de reconstrução geométrica (*Geo-reconstruct*). Com o esquema PRESTO (*PREssure STaggering Option*), interpolou-se a pressão nas arestas de cada célula. Para o acoplamento pressão-velocidade foi adotado o método PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) (Gomes *et al.*, 2018; Maciel *et al.*, 2023; Seibt *et al.*, 2023).

O passo de tempo utilizado nas simulações foram 0,05 s para os procedimentos de verificação conforme estudo de Machado *et al.* (2021), 0,001 s para validação e de 0,01 s para o estudo de casos. O tempo computacional médio foi de 44 h em um computador com processador Intel Core i7-8700K 3.70 GHz e 32 GB de memória de trabalho.

3.3 Análises estatísticas

A exatidão do modelo computacional em relação aos dados de referência foi avaliada utilizando as equações do Erro Médio Absoluto (MAE) e do Erro Médio Quadrático (RMSE), permitindo a verificação deste (Chai e Draxler, 2014). Para a validação foi calculado o Erro Relativo Percentual (ERP) (Kar e Els, 2012). O MAE, RMSE e ERP são definidos, respectivamente, por:

$$\mathrm{MAE} = \frac{\sum |O_i - R_i|}{n} \tag{3.7}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\left(\sum |O_i - R_i|\right)^2}{n}} \tag{3.8}$$

$$\mathrm{ERP} = 100\,\frac{O_i - R_i}{R_i} \tag{3.9}$$

onde O_i é o resultado obtido no presente estudo, R_i é o valor de referência para comparação, e n é o tamanho da amostra de dados considerada.

Para determinar a H_s a partir dos resultados numéricos obtidos nas simulações com ondas regulares representativas e irregulares realísticas do estado de mar, foi utilizado o software OCEANLYZ. Esse software é uma caixa de ferramentas para analisar dados de séries temporais de ondas coletadas por boias ou em um laboratório. O software tem 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).

Em tempo, para a PHS na função de QM e CEO da segunda formulação do domínio computacional é adicionada a análise através da integração das séries de elevação

da superfície livre e velocidade axial para cada caso, como feito em Motta *et al*. (2024). Essa metodologia adiciona à discussão dos resultados uma nova interpretação quanto à reflexão e transmissão das ondas e para a função de CEO. Sabe-se que a integração de uma curva resulta no valor da área entre a curva e o eixo de plotagem. Assim, é possível determinar a eficiência da PHS como QM e CEO sob uma nova perspectiva em relação ao caso de referência $1L_p$.

Nesta metodologia, é calculada a integral para cada série monitorada em cada caso: elevação – 10 m a montante e a jusante; velocidade axial abaixo da PHS. O resultado das integrais de elevação da superfície livre (I), em unidade de área, é considerado para calcular a relação/proporção entre os valores à montante e jusante para a PHS na função de QM em cada caso, conforme a equação:

$$\frac{I_{10\,m\ jusante}}{I_{10\,m\ montante}} = \text{relação de redução da área [adimensional]} \tag{3.10}$$

E para PHS na função de CEO é feita a relação/proporção das integrais da velocidade axial de cada caso (V_i), sendo que i varia do caso $1{,}5L_p$ até $3L_p$, em relação ao caso de referência (V_{1Lp}):

$$\frac{\left|V_i\right|}{\left|V_{1L_p}\right|} = \text{relação de redução da área [adimensional]} \tag{3.11}$$

4 Verificações e validação

Neste estudo foram realizadas verificações e validação do modelo computacional considerando a geração de ondas regulares e irregulares. Inicialmente, é verificada a metodologia WaveMIMO para gerar ondas regulares representativas e ondas irregulares realísticas do estado de mar que são as ondas propagadas para o estudo de caso. Também é realizada a verificação do software OCEANLYZ para a determinação de H_s. Por último, com a presença da PHS no canal, são desenvolvidas a validação e a verificação do modelo computacional que adota a metodologia WaveMIMO para a geração das ondas.

4.1 Verificação da metodologia WaveMIMO

A verificação da metodologia WaveMIMO considera o estado de mar que ocorreu na costa do município de Rio Grande (RS), Brasil, no dia 23 de agosto de 2014 às 00:00 para duas situações: simulação numérica com as ondas regulares representativas do estado de mar (ver Figura **3.5**); simulação com ondas irregulares realísticas do estado de mar (ver Figura **3.6**). Para ondas regulares representativas foi simulado 300 s de geração e propagação das ondas mesmo que o estado de mar considerado no presente estudo tenha uma duração de 900 s. Essa escolha está baseada na repetição das ondas regulares, não sendo necessário um esforço computacional tão alto já que as elevações são as mesmas durante todo o tempo. Assim, 300 s já se considerou suficiente para verificar a geração das ondas regulares. Isso não se pode dizer das ondas irregulares realísticas que não há um padrão de repetição capaz de limitar um período menor de simulação. Portanto, para a verificação das ondas irregulares realísticas foi considerado 900 s de simulação.

O modelo numérico é constituído por um canal de ondas bidimensional sem a PHS. Para o processo de verificação do modelo computacional, conforme dados de Maciel *et al.* (2023), as dimensões do canal numérico são (ver Figura **3.7**): H_c = 12 m; L_c = 258 m; d = 9,52 m. Utilizou-se a metodologia de malha *stretched* em todo o canal com a discretização espacial como recomendado por Gomes *et al.* (2018) e baseada em Mavriplis (1997). A região com apenas água é dividida verticalmente em 60 células computacionais; a região de interação entre ar e água tem 40 células computacionais; a região de apenas ar tem 20 células computacionais. Ao longo do canal a malha tem a discretização horizontal de $\lambda/50$.

A verificação da geração numérica de ondas regulares representativas se dá pela comparação entre os resultados numéricos encontrados no presente estudo e a solução

analítica obtida através da teoria de Stokes de 2ª ordem, conforme Eq. (2.8), para a posição da superfície livre na coordenada x = 50 m. Enquanto a verificação da geração numérica de ondas irregulares realísticas é realizada por meio de comparação dos resultados numéricos obtidos pelo presente estudo, na entrada do canal (x = 0 m), e os dados da série de elevações da superfície livre obtida a partir do espectro de ondas do TOMAWAC. Ou seja, com a própria série temporal de η da qual foram geradas as velocidades orbitais impostas como CC no software ANSYS Fluent.

A Figura 5.1 mostra o resultado da elevação da superfície livre obtido numericamente em x = 50 m com a metodologia WaveMIMO, para as ondas regulares representativas da costa de Rio Grande, confrontado com a solução analítica dada pela Eq. (2.8). Para facilitar a visualização, o tempo total de simulação de 300 s foi subdividido a cada 100 s, como pode ser observado na Figura 4.1 (a) - (c).

Em termos qualitativos, pode-se observar que a metodologia WaveMIMO reproduz adequadamente as ondas regulares representativas. Deve-se notar que as maiores diferenças ocorrem para $t < 20$ s devido à condição inicial de inércia do fluido, que está em repouso no início da simulação numérica. Assim, quantitativamente, a análise dos resultados considera o intervalo de tempo 20 s $\leq t \leq$ 300 s, alcançando MAE de 0,090 m e RMSE de 0,116 m. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Machado *et al.* (2021), Maciel *et al.* (2023), Maciel *et al.* (2021) e Cisco *et al.* (2022).

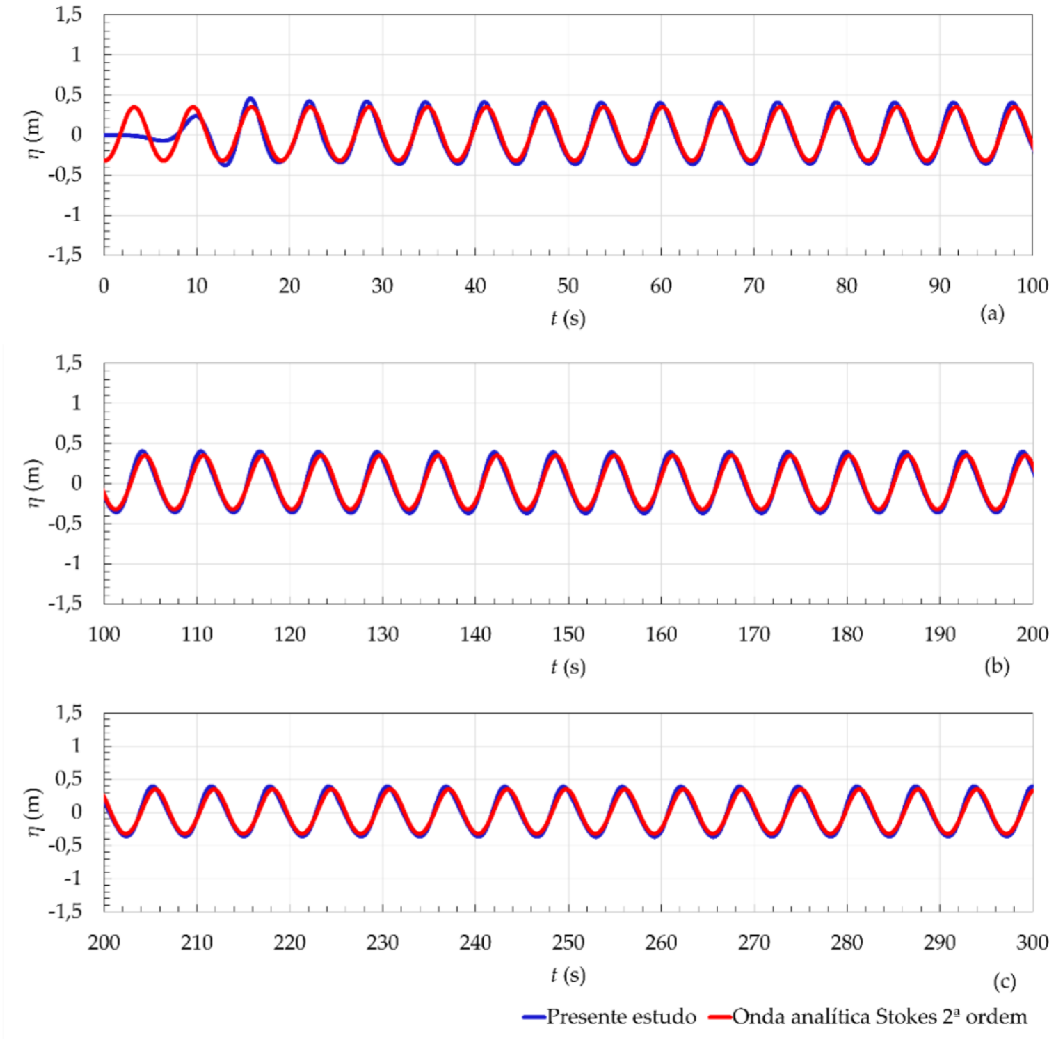


Figura 4.1: Elevação da superfície livre das ondas regulares representativas do estado de mar de Rio Grande (RS) considerando: (a) 0 s ≤ t ≤ 100 s; (b) 100 s ≤ t ≤ 200 s; e (c) 200 s ≤ t ≤ 300 s.

Na sequência, um procedimento análogo é adotado para verificar a geração de ondas irregulares realísticas. A Figura 5.2 (a)-(c) apresenta a elevação da superfície livre da água para as ondas irregulares realísticas do estado de mar de Rio Grande em x = 0 m (região de entrada) em comparação com os resultados do TOMAWAC, respectivamente em intervalos de 300 s.

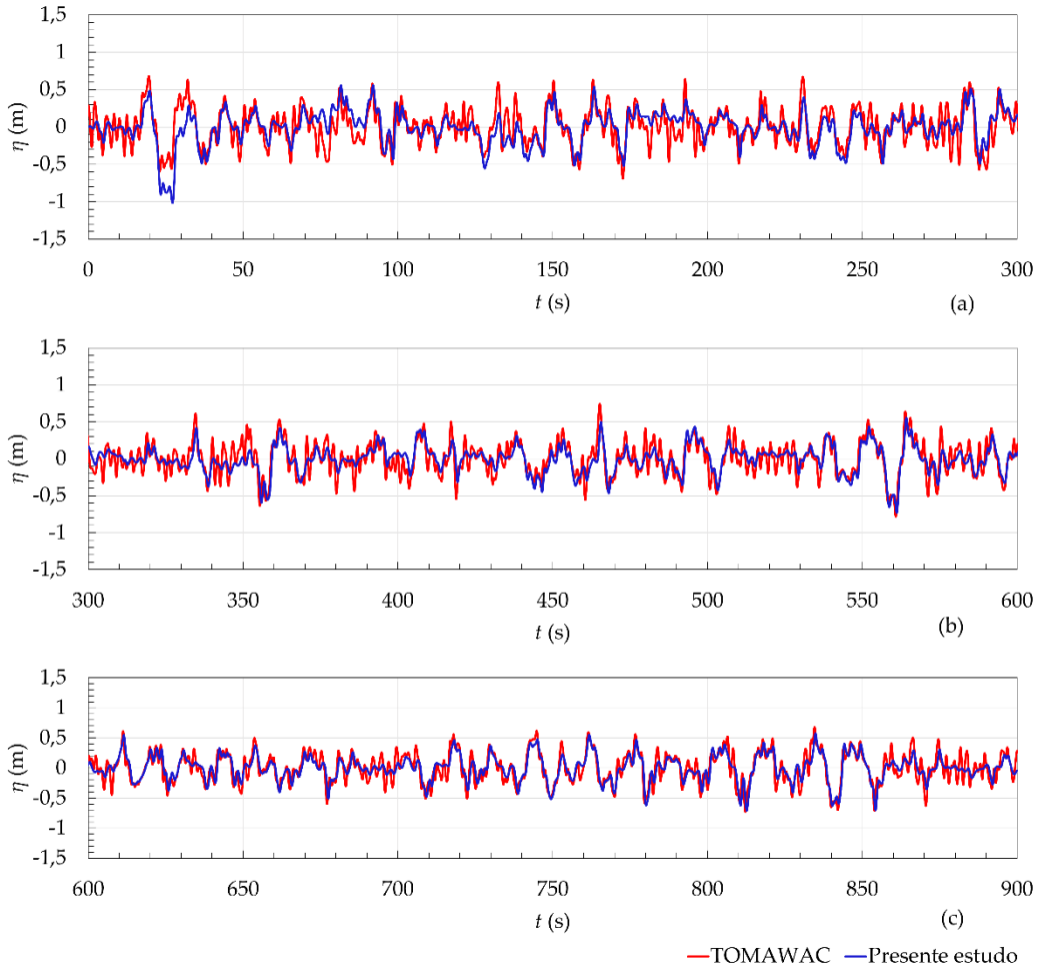


Figura 4.2: Elevação da superfície livre das ondas irregulares realísticas do estado de mar de Rio Grande, considerando: (a) 0 s ≤ t ≤ 300 s; (b) 300 s ≤ t ≤ 600 s; e (c) 600 s ≤ t ≤ 900 s.

Pode-se observar que, qualitativamente, os resultados da Figura 4.2 representam satisfatoriamente a elevação da superfície livre das ondas. Durante os 900 s levados em conta nesta análise, foram encontrados MAE de 0,117 m e RMSE de 0,152 m. Vale ressaltar que os resultados qualitativos e quantitativos são consistentes com os encontrados por Maciel *et al.* (2023), Mocellin *et al.* (2023), Hubner *et al.* (2022) e Paiva *et al.* (2023).

Com base nos resultados das Figuras 4.1 e 4.2 e na avaliação qualitativa e quantitativa realizada, é possível inferir que o modelo computacional empregando a metodologia WaveMIMO foi verificado para a geração numérica de ondas regulares e irregulares a partir de um estado de mar. Vale informar ainda que mais detalhes sobre a verificação e validação da metodologia WaveMIMO podem ser encontrados em Machado *et al.* (2021) e Maciel *et al.* (2023).

4.2 Verificação do software OCEANLYZ

A verificação do software OCEANLYZ tem o objetivo de mostrar a aplicabilidade deste no cálculo de H_s das ondas. Para garantir que o modelo matemático usado pelo software OCEANLYZ é preciso, a verificação do software envolveu o cálculo de H_s para uma série de η com um valor conhecido. Para isso, a série de elevação foi gerada analiticamente usando a teoria de ondas de Stokes de 2ª ordem, conforme descrito na Eq. (2.8). Foram aplicadas as características das ondas regulares representativas do estado de mar de Rio Grande utilizado no estudo de casos, ou seja, ondas H_s = 0,66 m e T_m=6,32 s, conforme Figura **3.4**.

O resultado obtido pelo software OCEANLYZ foi H_s = 0,65999 m, que, em comparação com o H_s = 0,66 m, tem um ERP = 0,002%. Portanto, entende-se que o software OCEANLYZ é verificado e determina adequadamente o valor da altura significativa para a série de dados deste estudo.

4.3 Validação do modelo computacional em escala de laboratório com a PHS

O modelo computacional foi validado com o estudo experimental de Orer e Ozdamar (2007). Os autores analisaram a eficiência da PHS como CEO em um canal de ondas de laboratório com um gerador de ondas unidirecional do tipo pistão. As características das ondas regulares geradas experimentalmente e reproduzidas numericamente neste trabalho são mostradas na Tabela **4.1**, onde d/λ é a profundidade relativa.

Tabela 4.1: Características da onda regular para validação.

T (s)	λ (m)	H (m)	d (m)	d/λ
1,87	5,37	0,06	0,6	0,11

O modelo numérico é constituído por um canal de ondas bidimensional com a PHS. Para o processo de validação do modelo computacional, conforme dados de Orer e Ozdamar (2007), as dimensões do canal numérico são (ver Figura **3.7**): H_c = 1 m; L_c = 40 m; d = 0,6 m; L_p = 1 m; e_p = 0,02 m; X_p = 19,5 m. A metodologia WaveMIMO é aplicada, portanto, a região da CC de velocidade de entrada é dividida em 10 segmentos e os perfis de velocidade são inseridos para cada um destes considerando a teoria de ondas de Stokes de 2ª ordem.

Utilizou-se a metodologia de malha *stretched* com a discretização espacial nas regiões a montante e a jusante da PHS como recomendado por Gomes *et al.* (2018) e baseada em Mavriplis (1997). Essa discretização horizontal e vertical do canal é idêntica

à apresentada na seção 4.1 para verificação da metodologia WaveMIMO. A Figura 4.3 apresenta a malha no entorno da PHS, com 100 divisões horizontais e a mesma discretização vertical da malha *stretched* já descrita. Malhas mais grosseiras no entorno da PHS foram simuladas durante o estudo e não obtiveram resultados satisfatórios, por isso é apresentada a discretização acima. Essa alteração é essencial para a análise da hidrodinâmica da PHS devido ao alto gradiente de velocidade, diferente de outros dispositivos CEO. A Figura 4.3 retrata em detalhe a malha gerada na região da PHS e é possível observar a malha *stretched* gerada antes e após a PHS.

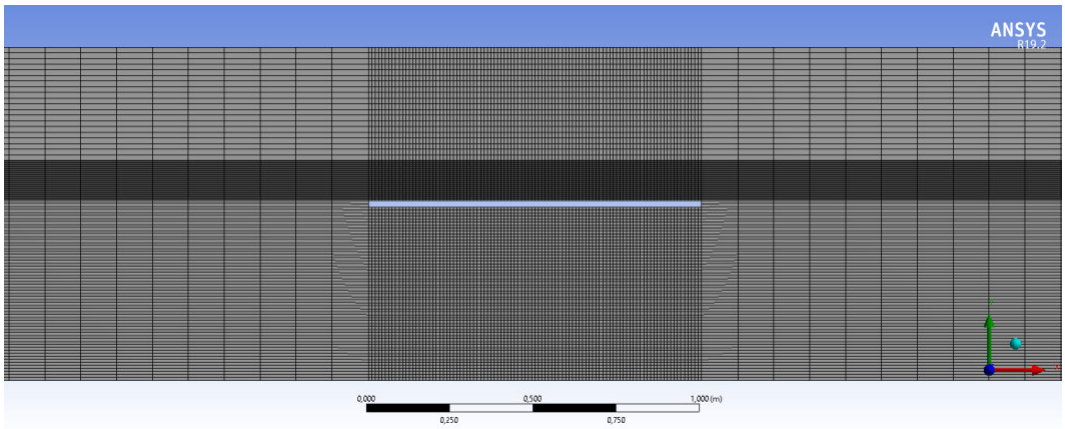


Figura 4.3: Discretização espacial do domínio computacional para a validação, detalhamento da região no entorno da PHS.

O parâmetro utilizado para validação é a velocidade axial do escoamento da água no ponto médio entre o fundo do canal e a PHS. O caso correspondente à PHS sem quaisquer restrições entre a placa e o fundo do canal de ondas de Orer e Ozdamar (2007) foi considerado; nesse caso a altura de instalação da placa (h_p) é de 0,52 m. A sonda numérica é pontual (x = 20 m; z = 0,26 m), ver Figura 4.4, para monitorar a velocidade axial abaixo da PHS e, então, comparar com os valores publicados por Orer e Ozdamar (2007).

No software ANSYS Fluent, a simulação foi realizada com um passo de tempo de 0,001 s, tal como em Seibt *et al.* (2023). Os autores do estudo em laboratório não mencionam a duração do experimento. Com um intervalo de tempo de 25 s de simulação já foi possível obter os resultados encontrados por Orer e Ozdamar e, portanto, concluída a simulação numérica de validação do modelo computacional.

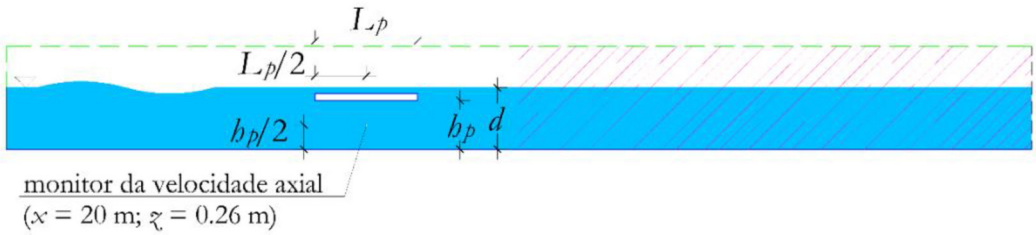


Figura 4.4: Posição da sonda numérica para validação.

Assim como observado nos estudos de Dick e Brebner (1968), Graw (1994) e Orer e Ozdamar (2007), a Figura 4.5 mostra o efeito pulsante da velocidade axial abaixo da PHS obtida no presente estudo durante a propagação das ondas. Esse efeito, já observado por estudos anteriores, motivou um aumento das pesquisas sobre a PHS como um CEO. Na Figura 4.5 a velocidade é aproximadamente zero até t = 10 s, isso se deve ao tempo que a primeira onda leva para se propagar da zona de geração até o centro da PHS, já que a condição inicial do fluido é de repouso.

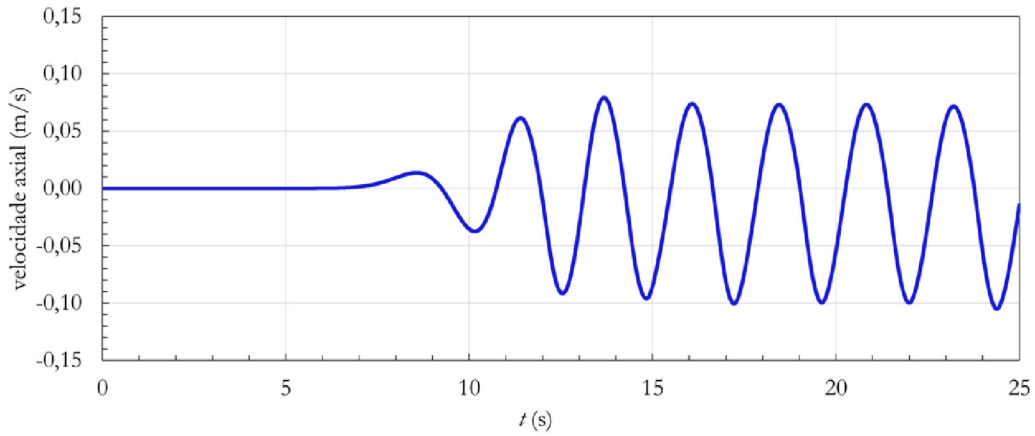


Figura 4.5: Efeito pulsante da velocidade axial sob a PHS.

A Tabela 4.2 apresenta uma comparação da velocidade axial máxima encontrada no presente estudo, por meio da metodologia WaveMIMO e demonstrada na Figura 4.5, com a encontrada no estudo experimental de Orer e Ozdamar (2007). De acordo com os resultados apresentados na literatura (Seibt *et al.*, 2023; Orer e Ozdamar, 2007; He *et al.*, 2019), o escoamento pulsante abaixo da PHS tem seus valores máximos na direção oposta à propagação, por isso os resultados são apresentados com um valor negativo.

Tabela 4.2: Resultado da validação do modelo computacional.

Velocidade Axial Experimental de Orer e Ozdamar (2007) (m/s)	Velocidade Axial Numérica do presente estudo (m/s)	Erro (m/s)
-0,11385	-0,10505	-0,0088

Considerando o ERP, Eq. (3.9), a diferença entre os resultados numéricos obtidos neste estudo e os resultados experimentais de Orer e Ozdamar (2007) é de 7,73% e correspondem a uma diferença de -0,0088 m/s. Portanto, considera-se que o modelo computacional foi devidamente validado.

4.4 Verificação do modelo computacional em escala real com a PHS

Essa verificação foi baseada na comparação entre os resultados numéricos de Seibt *et al.* (2023) e os resultados numéricos obtidos no presente estudo. Enquanto o trabalho de referência empregou a metodologia convencional para a geração de ondas regulares, ou seja, aplicou as Eqs. (2.8) e (2.9), o presente estudo aplicou a metodologia WaveMIMO. Seibt *et al.* (2023) indicaram a dimensão otimizada da PHS em escala real para a função de CEO sob ondas regulares com as características mostradas na Tabela 4.3. As dimensões do canal numérico são (ver Figura 3.5): L_p = 4,653 m; X_p =2λ = 139,584 m; $L_c = X_p + L_p$ + 1 m + L_{praia} = 284,82 m; H_c = 16 m; h_p = 8,64 m; e e_p = 0,32 m.

Tabela 4.3: Característica das ondas regulares para verificação.

T (s)	λ (m)	H (m)	d (m)	d/λ
8,0	69,79	0,96	9,60	0,14

Outra diferença entre o estudo de Seibt *et al.* (2023) e o presente estudo está na discretização espacial. Seibt *et al.* (2023) utilizaram uma malha não homogênea onde a discretização horizontal foi definida em função do comprimento da onda equivalente à terceira harmônica (λ_3) e a discretização vertical foi definida em função da altura da onda incidente – apresentada pelos autores pela letra grega épsilon (ε) - como pode ser observado na Figura 4.6. Maiores detalhes podem ser encontrados em Seibt *et al.* (2023).

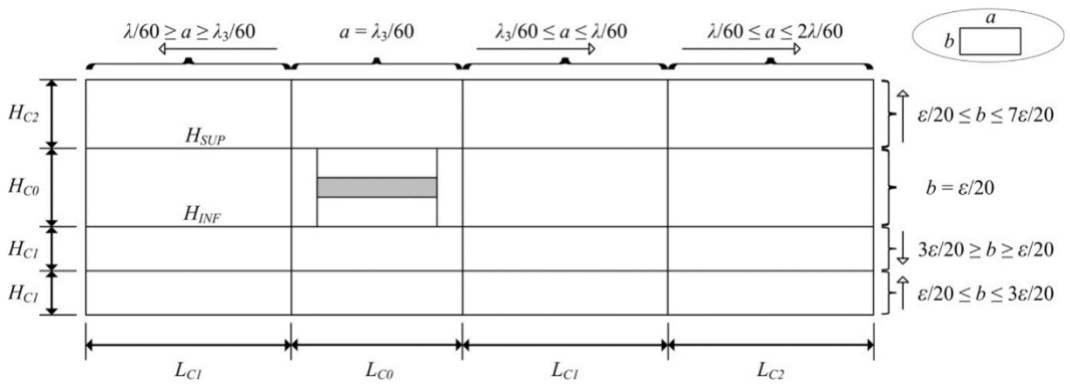


Figura 4.6: Malha utilizada no trabalho de Seibt *et al.* (2023).
Fonte: Seibt *et al.* (2023).

No entanto, o presente estudo adota a metodologia da malha *stretched*, com a discretização espacial nas regiões a montante e jusante da PHS como recomendado por Gomes *et al.* (2018) e já descrito na metodologia de verificação da WaveMIMO e validação. Próximo à PHS, 1 m a montante e 1 m a jusante é a região de alto interesse, portanto, a discretização horizontal tem a dimensão de 0,05 m, assim como em Martins *et al.* (2022), enquanto a discretização vertical respeita os valores da malha *stretched*, isso pode ser visualizado na Figura **4.4**.

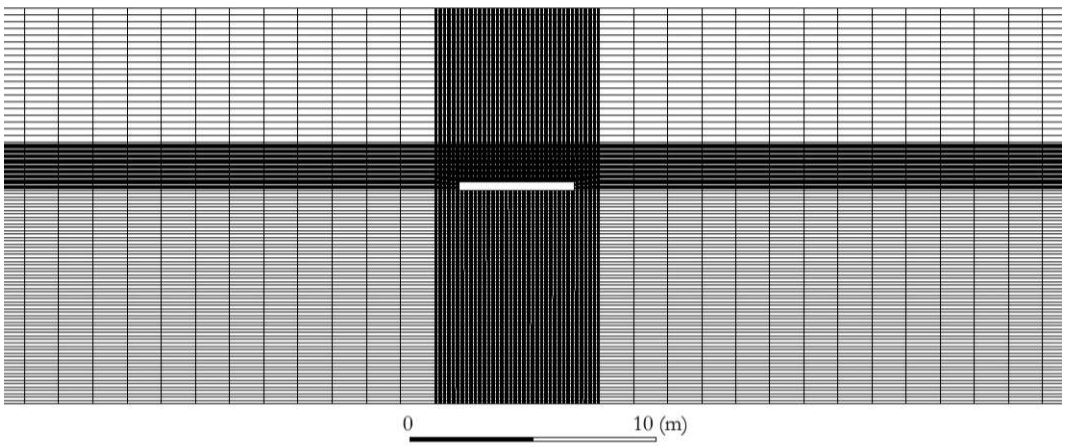


Figura 4.4: Discretização espacial do domínio computacional para a verificação por Seibt *et al.* (2023), detalhamento da região no entorno da PHS.

Além disso, outra diferença está relacionada ao comprimento e à extremidade direita do canal de ondas. Em Seibt *et al.* (2023), foi adotado um canal de ondas mais longo com uma parede como extremidade direita, enquanto no presente estudo foi empregado um canal de ondas mais curto com uma PN após a PHS e um perfil hidrostático como extremidade direita, por meio da Eq. (3.6).

Para verificar o modelo computacional, os resultados da elevação da superfície livre e da velocidade axial abaixo da PHS no presente estudo foram comparados com os valores numéricos obtidos pelos autores. Mais precisamente, a elevação da superfície livre foi monitorada utilizando uma sonda numérica do tipo linha vertical localizada entre a entrada do canal e a PHS, em x = 104,688 m. A velocidade axial foi monitorada utilizando uma sonda numérica pontual na região entre o fundo do canal e o dispositivo, localizada nas coordenadas x = 141,911 m e z = 5,616 m, isto é, 60% da profundidade da PHS. O passo de tempo da simulação foi de 0,001 s e o com duração de 100 s, e a análise dos dados considerou um passo de tempo de 0,05 s, assim como Seibt *et al.* (2023).

Devido à condição inicial de inércia do fluido, a análise considera o intervalo 25 s ≤ t ≤ 100 s. A Figura **4.5** mostra, qualitativamente, que a elevação da superfície livre da água monitorada na posição de x = 104,688 m é reproduzida corretamente. A análise

quantitativa levou em conta as Eqs. (3.7) e (3.8), em que as diferenças para a elevação da superfície livre foram: MAE de 0,030 m e RMSE de 0,040 m.

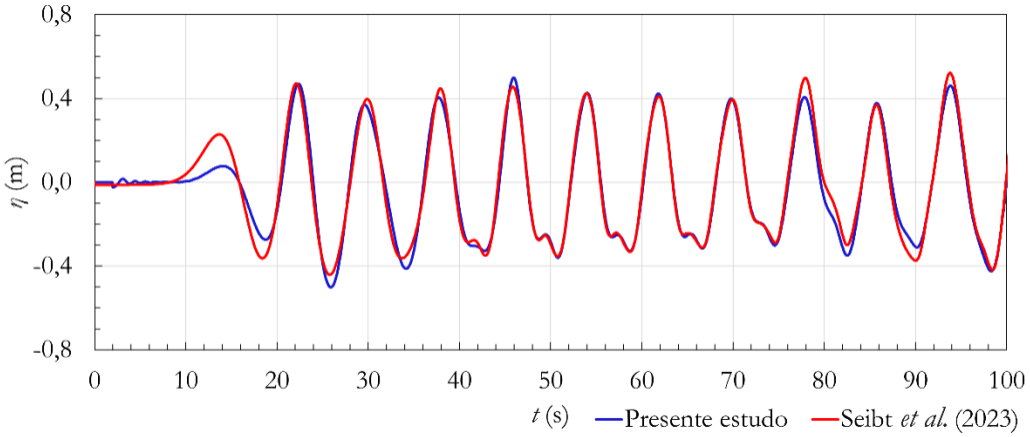


Figura 4.5: Elevação da superfície livre em x = 104,688 m.

A Figura **4.6** apresenta a reprodução adequada da velocidade axial monitorada abaixo da PHS. Quantitativamente, foram observadas diferenças de 0,061 m/s e 0,077 m/s para MAE e RMSE, respectivamente. Cabe destacar que, a partir de t = 67 s há diferenças nas velocidades. Uma provável justificativa para tal é que o presente estudo resolve o processo de reflexão da onda através da região de PN, diferentemente do modelo considerado no estudo de Seibt *et al*. (2023).

Considerando os resultados qualitativos e quantitativos encontrados em ambas as análises realizadas, o modelo numérico é considerado verificado.

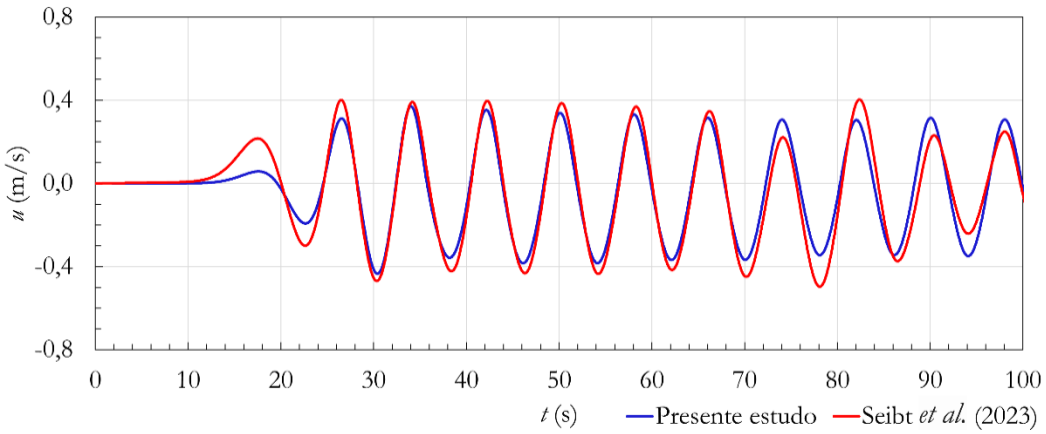


Figura 4.6: Velocidade axial abaixo da PHS em x = 141.911 m; z = 5.616 m.

5 Estudo de caso

Como já mencionado, o objetivo deste trabalho é analisar a hidrodinâmica do dispositivo PHS em relação à sua função de QM e CEO, por meio de simulações numéricas, com a propagação de ondas regulares representativas e ondas irregulares realísticas de um estado de mar ocorrido no município de Rio Grande (RS) no ano de 2014. A propagação das ondas é através da metodologia WaveMIMO de Machado *et al.* (2021). São simulados cinco casos do canal numérico com diferentes valores de L_p.

O presente estudo de caso usou como primeira formulação (1ªF) o domínio computacional de um canal de ondas em escala real com L_c e posição da PN fixa, alterando apenas o comprimento do dispositivo PHS para cada caso. O canal numérico tem dimensões baseadas em Gomes *et al.* (2018) e a PHS em Seibt *et al.* (2023). A segunda formulação (2ªF) do domínio computacional ocupa-se em testar a influência da PN nos resultados da 1ªF, em especial no monitoramento da sonda fixa após o dispositivo. Na 2ªF cada caso tem uma distância fixa de 1λ entre o fim da PHS e o início da PN e, consequentemente, o L_c deixa de ser fixo tal qual era na 1ªF.

Portanto, neste capítulo é apresentado o domínio computacional da 1ªF e são discutidos os resultados desta 1ªF cujos resultados são apresentados no Apêndice A - Resultados da 1ª Formulação do Domínio Computacional. Posteriormente, é apresentada a 2ªF, os resultados e discussão da influência da PN na hidrodinâmica da 1ªF tanto para ondas regulares representativas quanto irregulares realísticas. Na sequência, para facilitar a compreensão, apenas os resultados da 2ªF são apresentados e discutidos ao longo do texto. Considerando o intervalo de casos analisados, são apresentadas recomendações dos casos com a PHS mais eficiente nas funções de QM, CEO, e função conjunta QM e CEO para cada tipo de onda incidente. Também para a 2ªF é considerada uma outra metodologia de análise, a pôr integração das séries de elevação e velocidade axial ao longo do tempo que será apresentada neste capítulo.

5.1 Primeira formulação (1ªF) do domínio computacional

A 1ªF do domínio computacional consiste em um canal de ondas numérico com dimensões indicadas por Gomes *et al.* (2018) e verificadas, para o estado de mar considerado por Maciel *et al.* (2023). O dispositivo de PHS é inserido no canal com base nas dimensões recomendadas por Seibt *et al.* (2023), também verificadas, e é proporcional às ondas regulares representativas do estado do mar de Rio Grande (RS),

Brasil. As características das ondas regulares representativas podem ser vistas na Figura **3.3**. Portanto, as dimensões do domínio computacional deste estudo são (ver Figura **3.7**): H_c = 12 m; L_c = 258 m; d = 9,52 m; $X_p = 2\lambda$ = 103,2 m; L_p variável de 3,45 m a 10,37 m; $h_p = 0{,}9d$ = 8,568 m; $e_p = H_s/3$= 0,223 m; e L_{praia} = 129 m.

Com relação à discretização espacial, a malha *stretched* é usada antes e após a região na qual está localizada a PHS. Apesar da malha seguir as recomendações de Gomes *et al.* (2018) e Mavriplis (1997), conforme explicado anteriormente nos procedimentos de validação e verificação, são necessários ajustes na região da superfície livre em proporção aos segmentos de velocidade de entrada.

Cada um dos 10 segmentos onde são aplicados a CC de velocidade de entrada, conforme Maciel *et al.* (2023), têm uma altura de 0,952 m e a altura representativa da onda que define a discretização da malha é de 0,67 m. Portanto, é necessário que o último segmento, que fica na região da superfície livre, tenha um refino proporcional ao segmento de saída de pressão na região da superfície livre – limitado por $H/2$ e 20 divisões verticais. Portanto, o 10º segmento da velocidade de entrada tem 29 divisões verticais. Além disso, na região com apenas água, são 63 divisões ao todo, garantindo que os 9 segmentos tenham 7 divisões verticais cada. Na região da PHS, foi usada uma malha mais refinada com discretização horizontal de 0,05 m, baseada no modelo de Martins *et al.* (2022), e discretização vertical respeitando as recomendações da malha *stretched* com o objetivo de representar melhor os gradientes de alta velocidade e pressão ao redor do dispositivo. O passo de tempo da simulação foi de 0,01 s, e a simulação durou 900 s.

Levando em conta a proposta deste estudo de investigar as duas funções da PHS, como QM e como CEO, foi necessário expandir os casos de estudo variando L_p. Os seguintes comprimentos da PHS foram simulados para o mesmo canal numérico: $1L_p$ com base em Seibt *et al*. (2023), $1{,}5L_p$; $2L_p$; $2{,}5L_p$ e $3L_p$. As dimensões discretas estão descritas na Tabela **5.1**.

O dispositivo PHS é analisado como um QM por meio da comparação da H_s a montante e a jusante do dispositivo. O objetivo dessa análise é que a PHS seja um bom QM, ou seja, que reduza a altura das ondas depois que elas se propagarem sobre a placa (He *et al.*, 2019). Para isso, são criados padrões de análise proporcionais para todos os casos. A coordenada de início da PHS é fixa para todos os casos. No entanto, como o comprimento da PHS é variável para cada caso (ver Tabela **5.1**), apenas uma única sonda com posição fixa não permitiria a análise adequada da eficiência de cada caso monitorando os dados de elevação da superfície livre, pois esta sonda estaria a uma distância diferente do dispositivo para cada caso. Assim, a função de QM será analisada através de sondas 10 m a montante em x = 93,2 m e 10 m a jusante da PHS, para cada caso, conforme coordenadas horizontais definidas na Tabela 5.1. Além disso, uma outra sonda a jusante é posicionada na coordenada fixa de x = 128,63 m, antes do início da PN (x = 129 m). Esse monitoramento secundário para todos os casos têm o objetivo de

facilitar a análise da redução das ondas após a propagação sobre a PHS através da interpretação desses dados como as ondas que se propagam para a costa após a PHS como QM.

Tabela 5.1: Dimensões de L_p para os diferentes casos de estudo e coordenadas horizontais das sondas numéricas para a elevação da superfície livre (QM) e velocidade axial (CEO).

Caso	L_p (m)	Posição da sonda numérica de elevação da superfície 10 m a jusante da PHS x (m)	Posição da sonda numérica da velocidade axial no centro abaixo da PHS x (m)
$1L_p$	3,45	116,65	104,93
$1{,}5L_p$	5,18	118,38	105,79
$2L_p$	6,91	120,11	106,65
$2{,}5L_p$	8,64	121,84	107,52
$3L_p$	10,37	123,57	108,38

Para visualizar os dados da Tabela **5.1** foi elaborada a Figura **5.1** que apresenta o caso $1L_p$ em escala para compreender a posição das sondas em relação ao domínio computacional. Após são apresentados esboços de cada caso com as suas sondas numéricas de elevação da superfície livre 10 m a montante e jusante e a sonda fixa igual em todos os casos.

Para a análise do dispositivo de PHS como um CEO, o foco está na velocidade axial sob a placa. A análise da velocidade axial máxima ocorre no ponto médio abaixo da placa (z = 4,28 m), seguindo a proporção de monitoramento do estudo de Orer e Ozdamar (2007) que avaliou a velocidade no centro da profundidade entre a placa e o fundo do canal de laboratório. Essa velocidade pode ser usada, posteriormente, para estudos de turbinas (Graw, 1994; Orer e Ozdamar, 2007).

A Figura **5.2** mostra as coordenadas verticais das sondas de pontos numéricos usadas para monitorar a velocidade axial abaixo da PHS. O monitoramento ocorre ao longo de toda a profundidade entre o fundo do canal e a PHS com o objetivo de criar os perfis de velocidade para análise dos resultados. A coordenada vertical da sonda (z) permanece idêntica para todos os casos analisados. A única variação para essa análise está na coordenada horizontal (x), que deve ser central à PHS. Em outras palavras, cada vez que o comprimento da PHS é aumentado, há um deslocamento dessa coordenada central. Os valores da coordenada horizontal para cada caso são apresentados na Tabela 5.1.

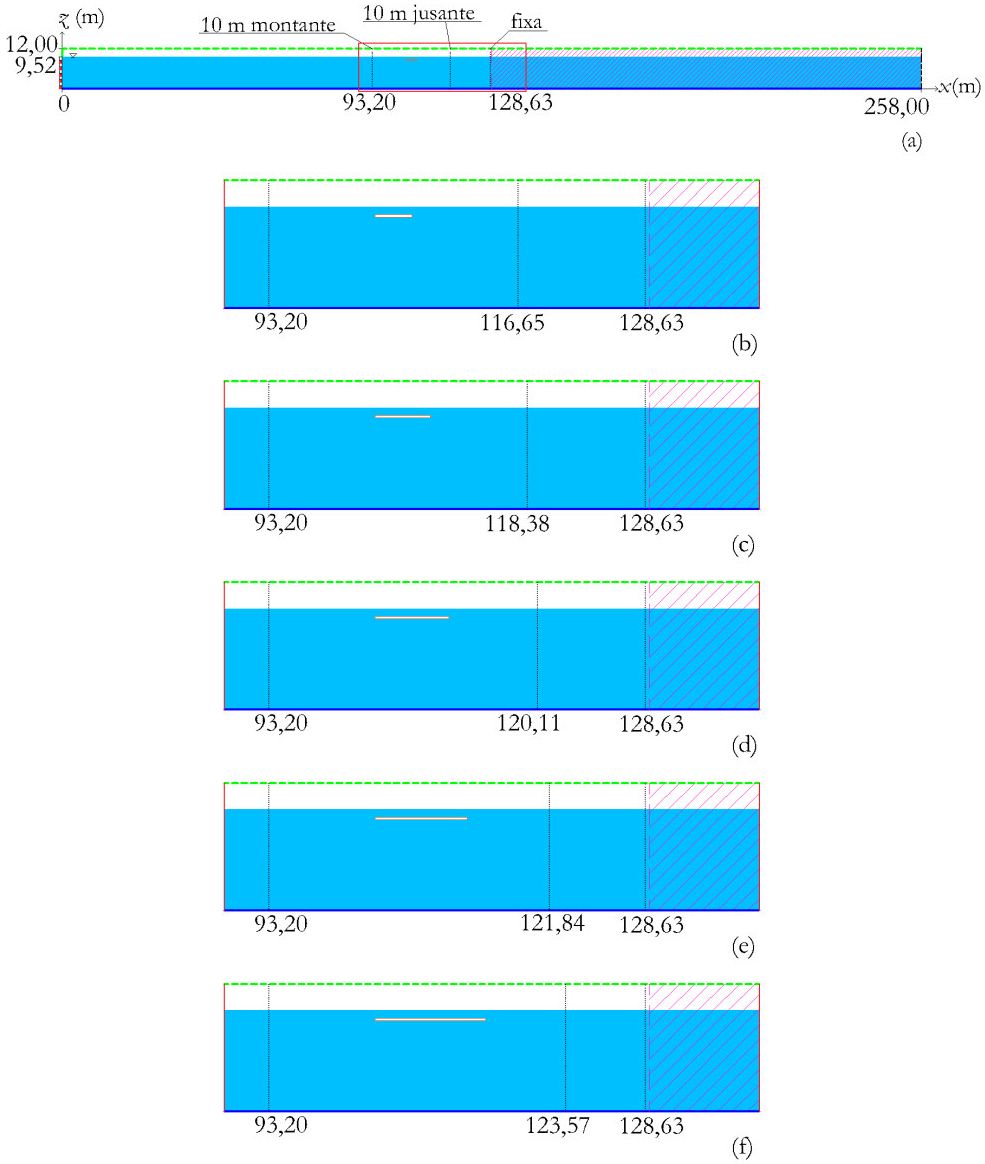


Figura 5.1: Posição das sondas numéricas de elevação da superfície livre para a análise da PHS na função de QM para cada caso: (a) $1L_p$ em escala; (b) $1L_p$; (c) $1{,}5L_p$; (d) $2L_p$; (e) $2{,}5L_p$; (f) $3L_p$.

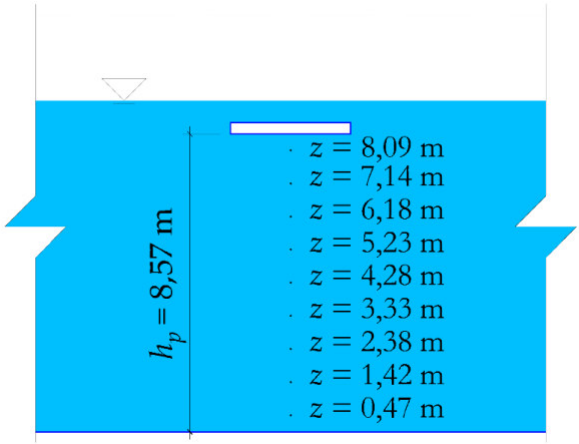


Figura 5.2: Posição vertical das sondas numéricas para a função de CEO.

5.1.1 Discussão dos resultados da 1ªF

A eficiência da PHS na função de QM sob a incidência de ondas regulares representativas é apresentada qualitativamente na Figura A. 1 e quantitativamente na Tabela A. 1. Com esses resultados, observa-se que o aumento do L_p melhora o efeito como QM para ondas regulares representativas já que, entre os casos $1L_p$ e 3 L_p, a diferença de redução alcançada foi acima de 55%. Através da sonda fixa, conforme Tabela A. 2, observa-se que as H_s que atingiriam a costa depois de passar pelo dispositivo tem a melhor redução no caso $2{,}5L_p$.

A redução da H_s nos casos mais eficientes como QM ($2L_p$, $2{,}5L_p$ e $3L_p$) aumentou mais de 4,5 vezes em comparação com o caso menos eficiente ($1L_p$). Considerando os presentes resultados para ondas regulares e o intervalo de dados considerado, já é possível observar que a variação dos efeitos de redução da altura da onda devido ao comprimento da PHS não é linear.

Na Tabela A. 3 são apresentadas as velocidades consideradas para a PHS na função de CEO. A maior velocidade axial encontrada é no caso $3L_p$, ou seja, este tem o maior potencial para converter a energia contida nas ondas do mar em eletricidade, com valores 5,41% maior que o caso $1L_p$ que obteve a segunda maior eficiência como CEO.

Qualitativamente, o efeito pulsante da velocidade abaixo da PHS é visível para todos os casos, ver Figura A. 3, conforme apresentado nos procedimentos de verificação e validação e nos estudos de referência de Orer e Ozdamar (2007) e Seibt *et al*. (2023). As velocidades demonstradas nos perfis máximos da Figura A. 2 são estáveis para a PHS sob ondas regulares, como confirma a Figura A. 3, garantindo a uniformidade de energia disponível ao longo do tempo.

Para a PHS atuando como QM sob ondas irregulares realísticas do estado de mar, a Figura A. 4 (a) – (e) apresenta qualitativamente a redução na altura das ondas à jusante do dispositivo. Esse efeito ocorre em todos os casos e é consistente com o princípio físico

de um QM. O caso $3L_p$ é o que apresenta a maior eficiência na redução de H_s. Além disso, na Tabela A. 4, ao comparar os casos mais e menos eficientes, $3L_p$ e $1L_p$, respectivamente, há uma diferença no amortecimento da H_s de quase 8 vezes. A redução da H_s no caso de $1L_p$ é insignificante, o que justifica avaliação dos efeitos das diferentes características do dispositivo PHS como um QM sob ondas irregulares realísticas e a inclusão de outros casos com maior L_p.

Para a redução das ondas por um QM os parâmetros dimensionais da geometria como o comprimento da placa, a espessura e a proporção da profundidade da instalação, podem ser importantes, conforme apresentado na literatura considerando ondas regulares Wang e Shen (1999), Yu (2002), Aghili *et al.* (2014), Seibt *et al.* (2014a), Seibt *et al.* (2014b), Seibt *et al.* (2019), Seibt *et al.* (2023), e considerando também ondas irregulares, Zheng *et al.* (2023). Optou-se por iniciar a investigação da PHS submetida a um estado de mar realístico variando o comprimento L_p, pois, em proporção às ondas regulares representativas incidentes, a placa no caso $1L_p$ era muito "curta" para o comprimento de onda ($1L_p$ = 3,457 m versus λ = 51,6 m). Esse fato indicou um primeiro caminho para entender a relevância da influência do L_p na eficiência da PHS como QM. Esta é, portanto, a justificativa para a criação de outros quatro casos para a análise da PHS tanto para ondas regulares quanto irregulares.

É importante observar que, ao considerar ondas irregulares realísticas, diferentemente das ondas regulares representativas, o maior amortecimento do H_s ocorre no caso de $3L_p$, independentemente da posição da sonda de elevação à jusante (ver Tabela A. 4 e Tabela A. 5). Enquanto, para ondas regulares, o caso $3L_p$ era mais eficiente na sonda 10 m à jusante e o caso $2{,}5L_p$ na sonda fixa. O que conduz à discussão de que há uma grande variação nos efeitos do L_p para a PHS como um QM sob diferentes abordagens de ondas. Esses resultados, que exigem maiores investigações, mostram a lacuna entre os valores de eficiência teóricos com ondas regulares e o que acontece com as ondas irregulares no oceano e na costa. Entretanto, é fundamental destacar que o intervalo de L_p do presente estudo é limitado e esboça a hidrodinâmica da PHS como QM sob ondas irregulares.

Independente das ondas incidentes, para a 1ªF, os três casos com maior L_p tem as melhores eficiências da PHS como QM (ver Tabela A. 4). Sob ondas regulares representativas a porcentagem de redução da H_s varia em até 3,7% entre os três casos com maior L_p para o monitoramento 10 m a jusante e na sonda fixa. Já para as ondas irregulares, a menor variação entre estes três casos com maior L_p é de 7,11%.

Finalmente, com relação a PHS como CEO sob a incidência de ondas irregulares realísticas, para os cinco casos avaliados as velocidades axiais máximas em z = 4,284 m o caso $2L_p$ obteve o maior módulo, conforme Tabela A. 6. A menor velocidade axial máxima é encontrada para o caso $3L_p$. O efeito pulsante do escoamento também ocorreu nestes cinco casos com as ondas irregulares realísticas.

Ao comparar as velocidades axiais máximas obtidas com $2L_p$ e $2{,}5L_p$ fica explícito que não houve diferenças consideráveis nas velocidades ao longo de todo o perfil; o mesmo ocorre ao comparar os casos com $1L_p$ e $3L_p$. Comparando os casos de pior e melhor desempenho, pode-se notar que o caso de $2L_p$ tem um potencial de conversão aproximadamente 9% maior do que o caso de 3 L_p.

5.2 Segunda formulação (2ªF) do domínio computacional

A 2ªF do domínio computacional é baseada na 1ªF e altera apenas na distância entre o fim da PHS e o início da região da PN. Anteriormente essa distância era fixa independente do comprimento da PHS, ou seja, L_c constante para qualquer L_p. Agora, para a 2ªF, cada caso tem seu próprio L_c pois foi considerada uma distância fixa de 1λ entre o fim da PHS e o início da PN. Essa diferença entre a geometria de cada formulação pode ser visualizada na Figura **5.3**.

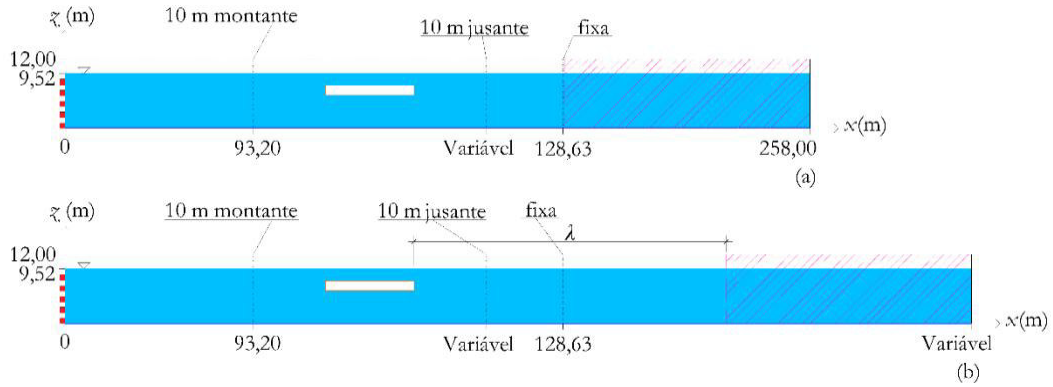


Figura 5.3: Diferença entre o domínio computacional da 1ªF e 2ªF.

Foi mantida a solução numérica no ANSYS Fluent, com a nova geometria, onde foram propagadas as ondas regulares representativas e ondas irregulares realísticas geradas através da metodologia WaveMIMO, com o mesmo passo de tempo e parâmetros de solução descritos na seção 3.2.

Para avaliar a PHS na função de QM é monitorada a elevação da superfície livre nas coordenadas horizontais 10 m a montante e 10 m a jusante da PHS para cada caso, tal qual já analisado na 1ªF. Também a sonda fixa em x = 128,63 m está presente na 2ªF, a H_s deste ponto será interpretada como a altura das ondas que atingem a costa após se propagar sobre o dispositivo. Na 2ªF também há o interesse em analisar os monitoramentos da elevação da superfície livre na entrada do canal em $x = 0$ m. Anteriormente esse monitoramento era utilizado como procedimento interno de verificação da simulação. Agora recebe um novo objetivo que é, além da verificação das ondas incidentes no canal numérico, também a comparação da 1ªF e 2ªF e os possíveis efeitos da PN nessa região. Além disso, na 2ªF é adicionado o monitoramento da elevação

da superfície livre na coordenada x no início da região da PN, que varia para cada caso. A Tabela **5.2** apresenta as coordenadas de monitoramento da elevação da superfície livre no início da PN para a 2ªF e o valor de L_c para cada caso.

Tabela 5.2: Posição do início da PN e L_c para cada caso na 2ªF.

Caso	Posição da sonda numérica de elevação da superfície no início da PN x (m)	Comprimento total do canal L_c (m)
$1L_p$	158,25	287,25
$1{,}5L_p$	159,99	288,99
$2L_p$	161,71	290,71
$2{,}5L_p$	163,44	292,44
$3L_p$	165,17	294,17

A determinação das sondas de elevação da superfície livre foi feita estrategicamente para garantir a comparação entre os resultados da 1ªF e 2ªF. A adição da sonda na entrada do canal tem como objetivo observar a H_s incidente na simulação numérica e compará-la com a H_s representativa do estado de mar realístico apresentada na Figura **3.3**. Já a sonda adicionada no início da PN para cada caso tem o objetivo de avaliar os efeitos desta região sobre a H_s.

Para avaliar a PHS na função de CEO é monitorada a velocidade axial abaixo da PHS em todos os pontos conforme a Figura **5.2**, ou seja, os mesmos pontos já considerados na 1ªF. Nesta 2ªF a velocidade axial máxima foi determinada para dois pontos de referência nas profundidades: z = 4,284 m (1ªF e 2ªF) e z = 5,236 m (2ªF).

Na 1ªF a decisão do ponto de análise foi o estudo experimental de Orer e Ozdamar (2007) que avalia a velocidade apenas no ponto central entre a PHS e o fundo do canal. Considerando os resultados obtidos nos perfis de velocidade axial máxima ao longo da profundidade, ver Figura A. 2, é visível que a velocidade aumenta nas profundidades acima deste ponto central considerado como referência para a determinação dos valores máximos de cada caso. Portanto, agora na 2ªF é adicionada a profundidade de z = 5,236 m como referência para construção dos perfis, o que representa 60% da profundidade, tal qual o estudo de Seibt *et al.* (2023). Isso significa que a determinação da velocidade axial máxima agora ocorre para uma profundidade mais próxima ao dispositivo PHS.

A metodologia para elaboração dos perfis de velocidade é igual, seja o ponto z = 4,284 m ou z = 5,236 m. Para o ponto de referência, é localizado o instante de tempo t em que ocorre as velocidades axiais máximas para cada caso. Com este instante t são localizadas as velocidades axiais em cada um dos pontos monitorados ao longo da

profundidade conforme determinados na Figura **5.2**, assim garantindo a construção do perfil de velocidades axial máxima ao longo da profundidade para cada caso.

Vale lembrar que o estudo de turbina não é do escopo do presente estudo. Ainda que tenha sido aprimorada a análise de velocidade axial máxima para a 2ªF, uma avaliação da altura útil de instalação da turbina é fundamental para garantir a análise mais aprofundada da PHS como CEO. Indica-se a necessidade de um estudo futuro com esse tipo de teste para ampliar a interpretação dos resultados e melhor estimar a eficiência da PHS-CEO com ondas irregulares.

Ressalta-se que, quando a velocidade axial tem sinal negativo, indica que o escoamento sob a PHS ocorre na direção oposta da propagação das ondas, fato que está de acordo com outros autores Orer e Ozdamar (2007), Seibt *et al.* (2019), He *et al.* (2019) e Seibt *et al.* (2023).

A metodologia de estudo de caso da 2ªF do domínio computacional inicia com um teste da influência da PN na hidrodinâmica do dispositivo PHS para avaliar as possíveis distorções da 1ªF observadas nos resultados já discutidos. Posteriormente, a análise dos resultados da 2ªF para a PHS nas funções de QM, CEO e análise conjunta das funções de QM e CEO.

5.2.1 Teste da influência da PN na hidrodinâmica do dispositivo PHS

Os resultados obtidos pela 1ªF do domínio computacional apresentam oscilação da H_s após a propagação sobre a PHS em casos específicos. O aumento da H_s para os casos $1L_p$ e $2{,}5L_p$ entre as sondas localizadas 10 m a jusante, x = 121,84 m e x = 123,57 m, respectivamente, e a sonda fixa a jusante (x = 128,63 m) motivaram a avaliar as possíveis distorções destes resultados da 1ªF.

Esses resultados conduziram à questão: "como a H_s pode aumentar após a placa se não há fonte de energia durante a propagação?". Um indicativo da influência da PN é que na 1ªF a sonda fixa em x = 128,63 m está muito próxima da região de PN que inicia em x = 129 m.

O interesse dessa subseção é investigar se há algum efeito do próprio modelo computacional distorcendo os resultados numéricos. Para isso, foram simulados os cinco casos novamente, tanto para ondas regulares representativas quanto ondas irregulares do estado de mar realístico, considerando a 2ªF do domínio computacional. Os efeitos na H_s pela posição da PN serão discutidos nessa subseção e apresentados os resultados comparativos entre as formulações.

Considerando as Ondas Regulares Representativas

Para a propagação de ondas regulares a Tabela **5.3** compara os valores da H_s da 2ª F com a 1ªF. Os valores das H_s são similares, sendo os casos $1L_p$ e $3L_p$ sem diferença

significativa entre si. As maiores diferenças da H_s, na grandeza de centímetros, ocorrem em diferentes pontos de monitoramento para as ondas regulares. Ora a principal diferença está na entrada do canal, ora está na sonda 10 m a montante da PHS. O caso 2,5L_p da 2ªF destaca-se com a maior alteração nos resultados em comparação com a 1ªF.

Quanto à H_s no início da PN na 2ªF, comparando com a sonda fixa para cada caso, não há uniformidade na variação entre os casos na 2ªF. Nos casos 1L_p, 1,5L_p e 2,5L_p a H_s teve variação menor que um centímetro, ou seja, um valor insignificante para a presente análise. E os casos 2L_p e 3L_p tiveram uma redução da H_s no início da PN para a incidência de ondas regulares.

Tabela 5.3: Valores da H_s [m] monitoradas nos mesmos pontos para a 1ªF e 2ªF para as ondas regulares representativas.

Caso	Entrada do canal	10 m montante	10 m jusante	Sonda fixa	Início PN
1L_p 2ªF	0,4782	0,5488	0,4688	0,4628	0,4667
1L_p 1ªF	0,4659	0,5402	0,4612	0,4559	-
Diferença	**0,0123**	**0,0086**	**0,0076**	**0,0069**	**-**
1,5L_p 2ªF	0,3535	0,6238	0,3431	0,3242	0,3301
1,5L_p 1ªF	0,3512	0,5994	0,3294	0,3087	-
Diferença	**0,0023**	**0,0244**	**0,0137**	**0,0155**	**-**
2L_p 2ªF	0,3968	0,7435	0,2453	0,2456	0,2127
2L_p 1ªF	0,3384	0,7130	0,2270	0,2290	-
Diferença	**0,0584**	**0,0305**	**0,0183**	**0,0166**	**-**
2,5L_p 2ªF	0,4167	0,7375	0,2190	0,1866	0,1856
2,5L_p 1ªF	0,5524	0,8120	0,2466	0,2150	-
Diferença	**-0,1357**	**-0,0745**	**-0,0276**	**-0,0284**	**-**
3L_p 2ªF	0,7676	0,8351	0,2462	0,2359	0,2102
3L_p 1ªF	0,7617	0,8400	0,2461	0,2385	-
Diferença	**0,0059**	**-0,0049**	**0,0001**	**-0,0016**	**-**

A Tabela **5.4** apresenta a eficiência da PHS na função de QM através da porcentagem de redução da H_s. Como observado anteriormente, há uma baixa variação entre os resultados para a 1ªF e 2ªF. Para ondas regulares, a maior influência da PN na porcentagem de redução da H_s é de apenas 1,2% que ocorre entre a 1ªF e 2ªF dos casos 2L_p e 2,5L_p. Ou seja, a proximidade da sonda fixa e a PN na 1ªF, para a função de QM, é insignificante na propagação de ondas regulares.

Tabela 5.4: Comparação da eficiência da PHS-QM para 1ªF e 2ªF através da porcentagem de redução da H_s [m] entre as sondas a jusante em relação à sonda 10 m a montante da PHS para as ondas regulares representativas.

Caso	10 m jusante	Sonda fixa	Início PN
$1L_p$ 2ªF	-14,6%	-15,7%	-15,0%
$1L_p$ 1ªF	-14,6%	-15,6%	-
Diferença	**0%**	**0,1%**	**-**
$1{,}5L_p$ 2ªF	-45,0%	-48,0%	-47,1%
$1{,}5L_p$ 1ªF	-45,0%	-48,5%	-
Diferença	**0%**	**-0,5%**	**-**
$2L_p$ 2ªF	-67,0%	-67,0%	-71,4%
$2L_p$ 1ªF	-68,2%	-67,0%	-
Diferença	**-1,2%**	**-0,9%**	**-**
$2{,}5L_p$ 2ªF	-70,3%	-74,7%	-74,8%
$2{,}5L_p$ 1ªF	-69,6%	-73,5%	-
Diferença	**0,7%**	**1,2%**	**-**
$3L_p$ 2ªF	-70,5%	-71,6%	-74,8%
$3L_p$ 1ªF	-70,7%	-71,6%	-
Diferença	**0,2%**	**0%**	**-**

Considerando as Ondas Irregulares Realísticas

Para a propagação das ondas irregulares, a Tabela **5.5** compara os valores da H_s da 2ªF com a 1ªF. A 2ªF apresenta diferenças em relação à 1ªF com valores significativos (> 0,30 m), em especial os casos $2L_p$ e $2{,}5L_p$ na entrada do canal. Na 1ªF os casos com maior oscilação na H_s para as sondas a jusante da PHS são $1L_p$ e $3L_p$ (ver Tabela A. 4 e Tabela A. 5). Já na 2ªF esse comportamento ocorre para os casos $1{,}5L_p$ e $3L_p$, conforme Tabela **5.5**. Para a 1ªF a variação da H_s nas sondas à jusante da PHS tem valores máximos de 0,02 m e a 2ªF tem variações inferiores. Ou seja, na 2ªF há menor variação da H_s nos monitoramentos após a PHS.

A sonda fixa após a PHS reduziu os valores da H_s monitorados para todos os casos na 2ªF, em comparação com os valores para a sonda 10 m a jusante, exceto o caso $2L_p$ (variação irrisória). O que é coerente com a física de propagação da onda após o dispositivo e em direção à costa. Isso demonstra que, para ondas irregulares, o afastamento entre a PHS e PN retirou a influência nos resultados da 1ªF.

A análise da H_s na entrada do canal foi realizada para o presente teste da influência da PN com o objetivo de avaliar os valores obtidos com a H_s da onda regular representativa do estado de mar realístico apresentada na Figura **3.3**. Enquanto a diferença máxima de H_s na entrada do canal entre os casos da 1ªF era de 0,3 m em relação à H_s da onda regular representativa do estado de mar realístico, a 2ªF tem resultados

inferiores entre seus casos. Na 2ªF, o caso $3L_p$, excepcionalmente tem uma diferença de 0,23 m na H_s na entrada do canal em relação ao valor representativo do estado de mar realístico e, comparando este caso com o $1L_p$ há uma diferença de 0,18 m na H_s na entrada do canal. Os demais casos têm menor diferença em relação à H_s representativa do estado de mar realístico e em relação ao caso $1L_p$ têm diferença menor que 0,13 m.

Alguns motivos para estes resultados estão em: (a) melhora do modelo computacional na 2ªF devido ao afastamento da PN de forma proporcional à extremidade a jusante da PHS; (b) o princípio físico do dispositivo envolve a reflexão de ondas na função de QM, justificando a manutenção do aumento da H_s na entrada do canal em relação aos valores encontrados em outros pontos monitorados.

A posição da PN não influenciou diretamente a H_s das ondas incidentes no dispositivo (sonda 10 m a montante).

Tabela 5.5: Comparação dos valores da H_s [m] monitoradas nos mesmos pontos para a 1ªF e 2ªF considerando as ondas irregulares realísticas.

Caso	Entrada do canal	10 m montante	10 m jusante	Sonda fixa	Início PN
$1L_p$ 2ªF	0,7150	0,6687	0,6210	0,6163	0,6287
$1L_p$ 1ªF	0,7460	0,6620	0,6321	0,6489	-
Diferença	**-0,0310**	**0,0067**	**-0,0111**	**-0,0326**	**-**
$1{,}5L_p$ 2ªF	0,7331	0,6977	0,6147	0,6011	0,6160
$1{,}5L_p$ 1ªF	0,7739	0,6828	0,6192	0,6153	-
Diferença	**-0,0408**	**0,0149**	**-0,0045**	**-0,0142**	**-**
$2L_p$ 2ªF	0,8055	0,7379	0,5390	0,5412	0,6014
$2L_p$ 1ªF	1,1200	0,7376	0,5940	0,5829	-
Diferença	**-0,3145**	**0,0003**	**-0,0250**	**-0,0417**	**-**
$2{,}5L_p$ 2ªF	0,8454	0,7828	0,5367	0,5257	0,5685
$2{,}5L_p$ 1ªF	1,2881	0,7826	0,5597	0,5620	-
Diferença	**-0,4427**	**0,0002**	**-0,0230**	**-0,0363**	**-**
$3L_p$ 2ªF	0,8937	0,7959	0,4823	0,4625	0,5128
$3L_p$ 1ªF	0,9814	0,8289	0,5339	0,5116	-
Diferença	**-0,0877**	**-0,0330**	**-0,0516**	**-0,0491**	**-**

A Tabela **5.6** apresenta a comparação da eficiência da PHS na função de QM para a 1ªF e 2ªF submetidas às ondas irregulares realísticas. Destaca-se os casos $1L_p$ e $2L_p$ como os de maior diferença entre a 1ªF e 2ªF na redução da H_s da sonda fixa. As porcentagens de redução da H_s apresentadas demonstram que a influência da PN foi maior sobre os resultados da sonda fixa do que na sonda 10 m a jusante na 1ªF. O caso $1L_p$, por exemplo, teve uma diferença de 5,9% na sonda fixa entre as formulações. A Tabela **5.6** auxilia na compreensão de que, no início da região da PN há um aumento da H_s, conforme observado na última coluna.

Tabela 5.6: Eficiência da PHS-QM: Porcentagem de redução da H_s [m] entre as sondas a jusante em relação à sonda 10 m a montante da PHS da 1ªF e 2ªF para a ondas irregulares realísticas.

Caso	10 m jusante	Sonda fixa	Início PN
$1L_p$ 2ªF	-7,1%	-7,8%	-6,0%
$1L_p$ 1ªF	-4,5%	-2,0%	-
Diferença	**2,6%**	**5,9%**	**-**
$1{,}5L_p$ 2ªF	-11,9%	-13,8%	-11,7%
$1{,}5L_p$ 1ªF	-9,3%	-9,9%	-
Diferença	**2,6%**	**4,0%**	**-**
$2L_p$ 2ªF	-22,9%	-26,7%	-18,5%
$2L_p$ 1ªF	-19,5%	-21,0%	-
Diferença	**3,4%**	**5,7%**	**-**
$2{,}5L_p$ 2ªF	-31,4$	-32,8%	-27,4%
$2{,}5L_p$ 1ªF	-28,5%	-28,2%	-
Diferença	**3,0%**	**4,7%**	**-**
$3L_p$ 2ªF	-39,4%	-41,9%	-35,6%
$3L_p$ 1ªF	-35,6%	-38,3%	-
Diferença	**3,8%**	**3,6%**	**-**

A análise da influência da região de PN no monitoramento da H_s para ondas regulares e irregulares permitiu a melhoria dos resultados obtidos. A 2ªF é composta pelo canal numérico de comprimento L_c variável conforme o L_p da PHS. Assim, cada caso da 2ªF tem um a distância fixa de 1λ entre o fim da PHS e o início da PN, alterando apenas o parâmetro L_c.

Dado o melhor desempenho da 2ªF, esta é adotada para a discussão final dos resultados apresentados nas seções seguintes, 5.2.2 e 5.2.3. Os resultados dessas são idênticos aos apresentados aqui, porém sem a comparação com a 1ªF. A discussão nessas subseções seguintes tem como objetivo avaliar as funções da PHS como QM e CEO, e não mais a influência da PN sob o monitoramento das simulações numéricas.

5.2.2 Segunda formulação (2ªF) - Ondas regulares representativas do estado de mar

Nesta subseção são discutidos os resultados da 2ªF para a PHS na função de QM, CEO e análise conjunta QM e CEO submetida a ondas regulares representativas do estado de mar realístico. Esses são os resultados do presente estudo de caso a ser considerado como recomendação da PHS nas diferentes funções.

O objetivo de um QM é a redução da H_s das ondas após a propagação no dispositivo, portanto, um bom QM é aquele que propicia a maior redução. Neste estudo, conforme Figura **5.1**, considera-se a comparação entre as sondas 10 m a

montante e 10 m a jusante do dispositivo como a eficiência da PHS na função de QM. A sonda fixa é interpretada como as ondas que atingem a costa.

Um bom dispositivo na função de CEO, no presente estudo, é aquele com maior velocidade axial nas profundidades $z = 4{,}284$ m e $z = 5{,}236$ m. Os resultados da velocidade axial são comparados pelos valores máximos de cada caso, que podem ocorrer em instantes de tempo diferentes. A Figura **5.2** apresenta os pontos de monitoramento utilizados na construção dos perfis de velocidade axial máxima ao longo da profundidade para cada caso.

A seguir, na Figura **5.4**(a)-(e) são apresentadas as elevações da superfície livre 10 m a montante e 10 m a jusante da PHS para cada um dos casos durante todo o tempo simulado. A Figura **5.5** destaca o intervalo de $400\,\text{s} < t < 450\,\text{s}$ para cada caso, explicitando a eficiência como QM.

A Tabela **5.7** apresenta os valores quantitativos da H_s monitorada em diferentes posições do canal numérico para cada caso simulado. Os resultados da H_s para o monitoramento 10 m a montante da PHS demonstram um aumento em relação aos valores monitorados na entrada do canal. A justificativa para esse efeito está na própria hidrodinâmica do dispositivo PHS que reduz a altura das ondas através da reflexão das ondas. Portanto, com o avanço do tempo de simulação e a propagação contínua das ondas, o monitoramento no ponto 10 m a montante é influenciado pelas ondas refletidas pela PHS.

Tabela 5.7: Valores da H_s [m] para cada caso submetido a ondas regulares representativas do estado de mar realístico.

Caso	Entrada do canal	10 m montante	10 m jusante	Sonda fixa
$1L_p$	0,4782	0,5488	0,4688	0,4628
$1{,}5L_p$	0,3535	0,6238	0,3431	0,3242
$2L_p$	0,3968	0,7435	0,2453	0,2456
$2{,}5L_p$	0,4167	0,7375	0,2190	0,1866
$3L_p$	0,7676	0,8351	0,2462	0,2359

Observando a Figura 5.4 com a Tabela **5.8**, que apresenta a redução da H_s a jusante da PHS, o caso $1L_p$ teve a menor eficiência e o caso $3L_p$ a maior eficiência para função de QM. Sendo o caso mais eficiente 4,8 vezes superior ao caso menos eficiente. Com exceção ao caso $1L_p$, todos os demais têm eficiência acima de 40% na PHS como QM sob ondas regulares representativas do estado de mar. Ainda na Tabela **5.8**, identifica-se que a eficiência dos casos com os três maiores L_p tem valores aproximados.

Na sonda fixa, o caso $2{,}5L_p$ teve maior redução da H_s após PHS. Comparando as H_s na sonda fixa com os valores 10 m a jusante da PHS, para os casos $2{,}5L_p$ e $3L_p$ na Tabela **5.7**, é notável que ambos os casos têm uma redução satisfatória para a função de QM. Isso significa que, mesmo que a eficiência do QM seja avaliada através da comparação do

monitoramento a 10 m a montante e jusante da PHS, o caso 2,5L_p também apresentou resultados interessantes na redução das ondas que atingem a costa.

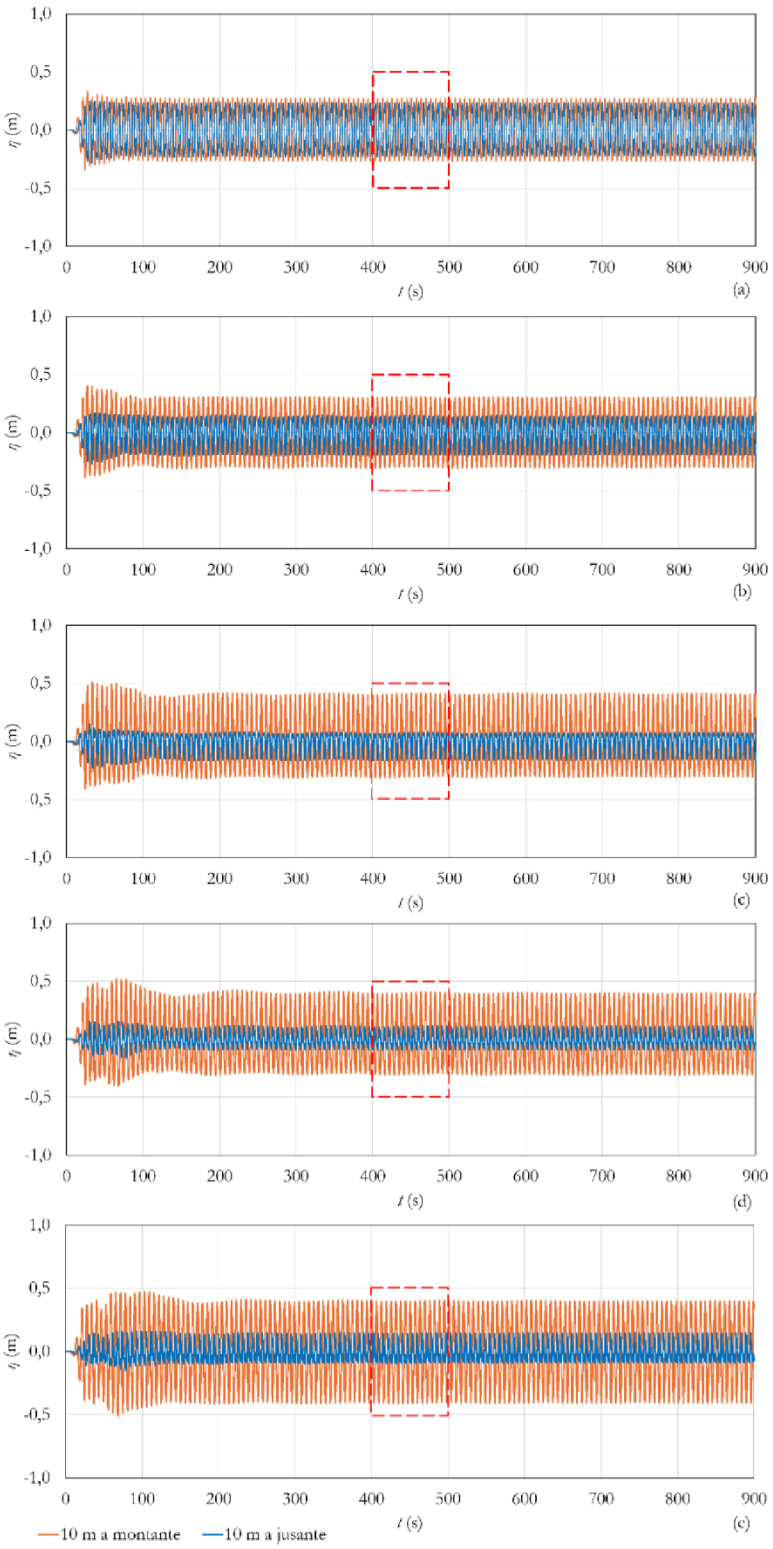


Figura 5.4: Análise da PHS como QM sob a incidência de ondas regulares representativas: (a) 1L_p; (b) 1,5L_p; (c) 2L_p; (d) 2,5L_p; (e) 3L_p.

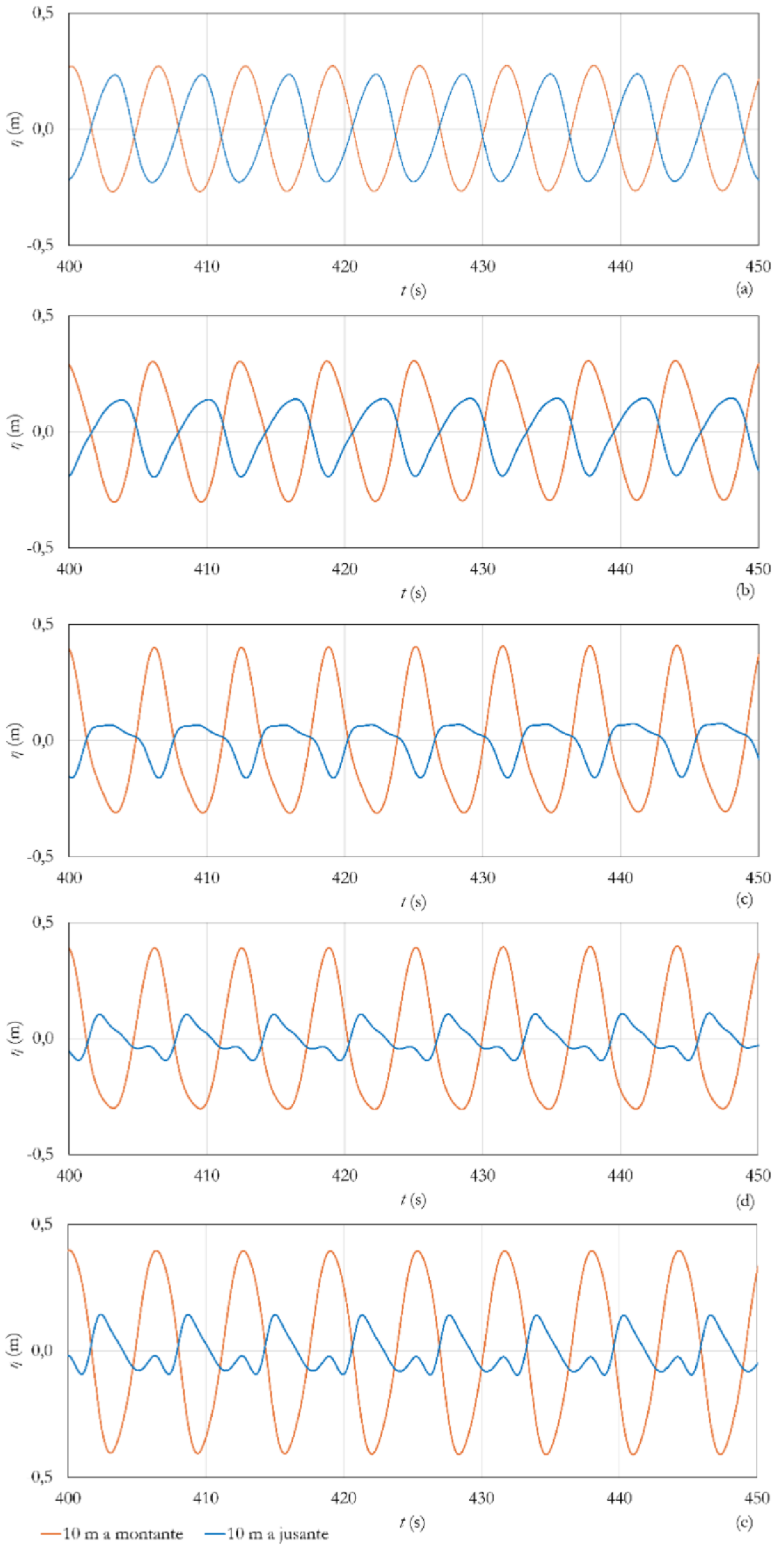


Figura 5.5: Destaque do monitoramento para 400 s < t < 450 s para cada caso sob ondas irregulares realísticas: (a) $1L_p$; (b) $1{,}5L_p$; (c) $2L_p$; (d) $2{,}5L_p$; (e) $3L_p$.

Tabela 5.8: Eficiência da PHS-QM: Porcentagem de redução da H_s [m] para as sondas a jusante em relação à sonda 10 m a montante da PHS submetida a ondas regulares representativas do estado de mar realístico.

Caso	10 m jusante	Sonda fixa
$1L_p$	-14,6%	-15,7%
$1{,}5L_p$	-45,0%	-48,0%
$2L_p$	-67,0%	-67,0%
$2{,}5L_p$	-70,3%	-74,7%
$3L_p$	-70,5%	-71,6%

Para a PHS na função de CEO, as Figura **5.6** e Figura **5.10** apresentam os perfis de velocidade axial máxima ao longo da profundidade monitorados em $z = 4{,}284$ m e $z = 5{,}236$ m, respectivamente. Ambos os perfis de velocidade apresentam um comportamento similar entre si, com baixa variação das velocidades ao longo da profundidade.

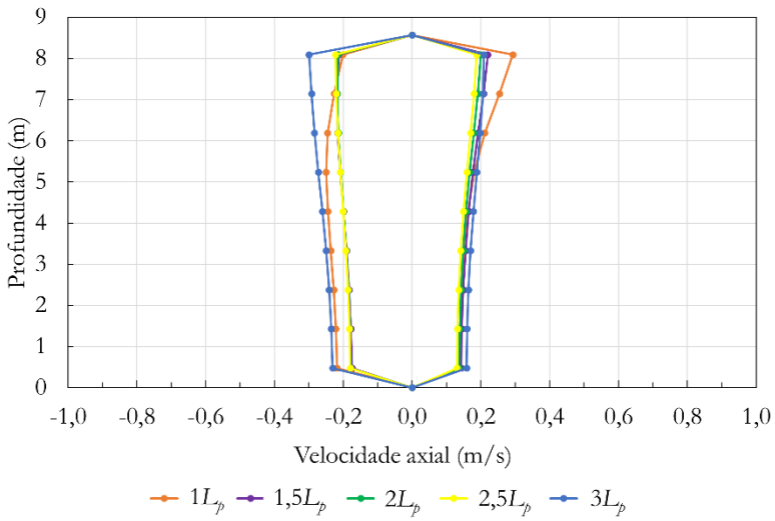


Figura 5.6: Perfil das velocidades axiais máximas abaixo da PHS para as ondas regulares representativas em diferentes instantes de tempo para o monitoramento em $z = 4{,}284$ m.

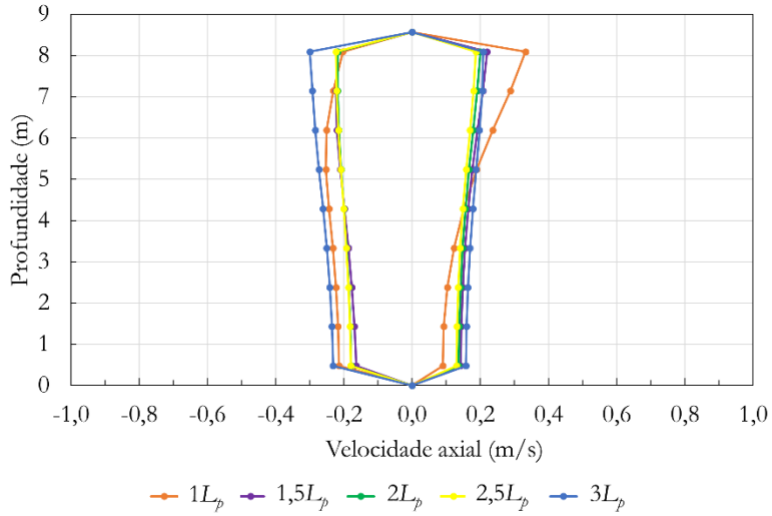


Figura 5.7: Perfil das velocidades axiais máximas abaixo da PHS para as ondas regulares representativas em diferentes instantes de tempo para o monitoramento em z = 5,236 m.

Nas Tabela **5.9** e Tabela **5.10** são apresentados os valores quantitativos considerados para a construção desse perfil de velocidades da Figura **5.6**, ou seja, considerando o valor máximo determinado para o ponto z = 4,284 m. Com os resultados discretos pode-se observar que o caso 3L_p tem a melhor eficiência como CEO, ou seja, a maior velocidade axial. De toda forma, o caso 1L_p tem resultados aproximados com o melhor caso, o que tem grande respaldo no estudo numérico de otimização da PHS como CEO sob ondas regulares realizado por Seibt *et al.* (2023). Os outros três casos intermediários tem uma diferença de quase 0,05 m/s nas suas velocidades axiais máximas neste ponto em comparação ao caso mais eficiente como CEO.

Tabela 5.9: Velocidade axial máxima negativa ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas regulares representativas.

Caso	1L_p	1,5L_p	2L_p	2,5L_p	3L_p
Instante de tempo [s]	309,97	423,68	202,29	202,23	227,86
Profundidade [m]	Velocidade Axial [m/s]				
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,476	-0,218	-0,175	-0,179	-0,180	-0,231
1,428	-0,222	-0,178	-0,181	-0,182	-0,235
2,380	-0,228	-0,183	-0,185	-0,186	-0,241
3,332	-0,236	-0,190	-0,192	-0,193	-0,250
4,284	**-0,245**	**-0,199**	**-0,200**	**-0,200**	**-0,261**
5,236	-0,250	-0,209	-0,208	-0,208	-0,273
6,188	-0,245	-0,216	-0,214	-0,216	-0,284
7,140	-0,227	-0,218	-0,217	-0,221	-0,292
8,092	-0,201	-0,214	-0,217	-0,223	-0,299
8,568	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 5.10: Velocidade axial máxima positiva ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas regulares representativas.

Caso	$1L_p$	$1{,}5L_p$	$2L_p$	$2{,}5L_p$	$3L_p$
Instante de tempo [s]	249,93	249,98	256,26	401,41	281,56
Profundidade [m]	Velocidade Axial [m/s]				
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,476	0,140	0,142	0,137	0,131	0,158
1,428	0,141	0,144	0,138	0,132	0,160
2,380	0,146	0,149	0,142	0,135	0,164
3,332	0,152	0,155	0,148	0,141	0,170
4,284	**0,163**	**0,165**	**0,157**	**0,149**	**0,178**
5,236	0,181	0,177	0,167	0,159	0,188
6,188	0,211	0,192	0,179	0,170	0,198
7,140	0,254	0,208	0,191	0,180	0,206
8,092	0,293	0,220	0,200	0,187	0,209
8,568	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Nas Tabela **5.11** e Tabela **5.12** são apresentados os valores quantitativos considerados para a construção dos perfis de velocidades da Figura 5.7, ou seja, considerando o valor máximo determinado para o ponto $z = 5{,}236$ m. Com os resultados discretos pode-se observar que o caso $3L_p$ tem a melhor eficiência como CEO. O comportamento de valores aproximados entre os casos $1L_p$ e $3L_p$ se repete também neste ponto monitorado. Tal qual observado no monitoramento anterior, os outros três casos intermediários tem uma redução significativa nas suas velocidades axiais máximas nesta profundidade. Agora o caso $3L_p$ se destaca com uma diferença de 0,06 m/s enquanto o caso $1L_p$ varia apenas 0,04 m/s em relação aos piores casos, $2L_p$ e $2{,}5L_p$.

Comparando as velocidades axiais máximas nos diferentes pontos de análise para os casos mais eficientes como CEO, ou seja, $1L_p$ e $3L_p$, o segundo caso apresenta-se de forma constante como melhor CEO. Além disso, o caso $3L_p$ também tem as maiores velocidades no sentido de propagação das ondas (positivo). A decisão por analisar um novo ponto da profundidade apresentou um aumento de 0,01 m/s na velocidade axial máxima do caso $3L_p$ e não houve diferença desse parâmetro para o caso $1L_p$.

Em concordância com o princípio físico do dispositivo no ensaio experimental de Orer e Ozdamar (2007) e o estudo numérico de Seibt *et al.* (2023), para as simulações com ondas regulares, nenhuma velocidade positiva teve maior módulo do que as negativas. Demonstrando que o maior deslocamento de massa abaixo do dispositivo está no sentido contrário à propagação das ondas.

Por fim, buscando uma versão da PHS na função conjunta de QM e CEO, para a incidência de ondas regulares, o caso $3L_p$ obteve os melhores resultados.

Tabela 5.11: Velocidade axial máxima negativa ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas regulares representativas.

Caso	$1L_p$	$1{,}5L_p$	$2L_p$	$2{,}5L_p$	$3L_p$
Instante de tempo [s]	202,54	897,68	202,26	202,21	227,86
Profundidade [m]	Velocidade Axial [m/s]				
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,476	-0,214	-0,164	-0,178	-0,180	-0,231
1,428	-0,217	-0,169	-0,181	-0,182	-0,235
2,380	-0,223	-0,176	-0,185	-0,186	-0,241
3,332	-0,232	-0,186	-0,192	-0,193	-0,250
4,284	-0,243	-0,198	-0,199	-0,200	-0,261
5,236	**-0,253**	**-0,210**	**-0,208**	**-0,208**	**-0,273**
6,188	-0,251	-0,220	-0,214	-0,216	-0,284
7,140	-0,231	-0,223	-0,218	-0,221	-0,292
8,092	-0,203	-0,218	-0,217	-0,223	-0,299
8,568	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 5.12: Velocidade axial máxima positiva ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas regulares representativas.

Caso	$1L_p$	$1{,}5L_p$	$2L_p$	$2{,}5L_p$	$3L_p$
Instante de tempo [s]	850,29	249,98	256,27	401,42	281,56
Profundidade [m]	Velocidade Axial [m/s]				
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,476	0,090	0,142	0,137	0,131	0,158
1,428	0,093	0,144	0,138	0,132	0,160
2,380	0,104	0,149	0,142	0,135	0,164
3,332	0,123	0,155	0,148	0,141	0,170
4,284	0,152	0,165	0,157	0,149	0,178
5,236	**0,189**	**0,177**	**0,167**	**0,159**	**0,188**
6,188	0,237	0,192	0,179	0,170	0,198
7,140	0,288	0,208	0,191	0,180	0,206
8,092	0,333	0,220	0,200	0,187	0,209
8,568	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

5.2.3 Segunda formulação (2ªF) - Ondas irregulares realísticas do estado de mar

Nesta subseção são discutidos os resultados da 2ªF para a PHS na função de QM, CEO e análise conjunta QM e CEO submetida a ondas irregulares do estado de mar realístico. Esses são os resultados do presente estudo de caso a ser considerado como recomendação da PHS nas diferentes funções.

O objetivo de um QM é a redução da H_s após a propagação do dispositivo, portanto um bom QM é aquele que propicia a maior redução. Neste estudo, conforme Figura **5.1**, considera-se a comparação entre as sondas 10 m a montante e 10 m a jusante como a eficiência da PHS na função de QM. A sonda fixa é interpretada como as ondas que atingem a costa.

Um bom dispositivo na função de CEO, no presente estudo, é aquele com maior velocidade axial nas profundidades $z = 4{,}284$ m e $z = 5{,}236$ m. Os resultados da velocidade axial são comparados pelos valores máximos de cada caso, que podem ocorrer em instantes de tempo diferentes. A Figura **5.2** apresenta os pontos de monitoramento utilizados na construção dos perfis de velocidade axial máxima ao longo da profundidade para cada caso.

Na Figura **5.8** (a) – (e), são apresentadas as elevações 10 m a montante e a jusante da PHS submetida a ondas irregulares para toda a simulação. A Figura **5.9** destaca o intervalo de 400 s < t <450 s para cada caso, explicitando a eficiência como QM.

A Tabela **5.13** apresenta os valores quantitativos da H_s monitorada em diferentes posições do canal de ondas numérico para cada caso simulado. Diferente do resultado dessa análise para ondas regulares (ver Tabela **5.7**) a H_s na posição 10 m a montante da PHS não aumentou em relação à entrada do canal. Isso demonstra que, para a incidência de ondas irregulares realísticas, houve uma menor reflexão das ondas pelo dispositivo PHS.

Tabela 5.13: Valores da H_s [m] para a PHS submetida às ondas irregulares realísticas do estado de mar.

Caso	Entrada do canal	10 m montante	10 m jusante	Sonda fixa	Início PN
$1L_p$	0,7150	0,6687	0,6210	0,6163	0,6287
$1{,}5L_p$	0,7331	0,6977	0,6147	0,6011	0,6160
$2L_p$	0,8055	0,7379	0,5390	0,5412	0,6014
$2{,}5L_p$	0,8454	0,7828	0,5367	0,5257	0,5685
$3L_p$	0,8937	0,7959	0,4823	0,4625	0,5128

Observando a Figura **5.8** com os dados da Tabela **5.14** que apresenta a porcentagem de redução da H_s a jusante da PHS, o caso $1L_p$ teve a menor eficiência e o caso $3L_p$ a maior eficiência para função de QM, tal qual os resultados da PHS como QM sob a incidência ondas regulares. No entanto, para o presente resultado com a incidência de ondas irregulares, não há outros casos com eficiência similar ao caso $3L_p$. A menor eficiência tem um valor 5,5 vezes inferior ao melhor QM. Todos os casos tiveram redução da H_s após o dispositivo, ou seja, a H_s na sonda fixa foi menor do que 10 m a jusante.

Comparando as eficiências da PHS como QM para ondas regulares e irregulares, Tabela **5.8** e Tabela **5.14**, respectivamente, observa-se uma grande redução na eficiência da PHS como QM para ondas irregulares em todos os casos. Enquanto os quatro maiores casos para ondas regulares tinham a porcentagem de eficiência superior à 45%, para as

ondas irregulares nem mesmo o caso mais eficiente obteve este valor. Por exemplo, o caso $3L_p$ teve uma eficiência 1,7 vezes menor sob ondas irregulares do que para ondas regulares. Os demais casos sob ondas irregulares tiveram essa redução entre 2 e 3,7 vezes em relação às suas próprias eficiências como QM sob a incidência de ondas regulares.

Esse fato fortalece a necessidade de tratar os dispositivos de proteção costeira com estudos numéricos considerando ondas irregulares. Afinal, essa aproximação resulta em valores mais realísticos do que os obtidos com ondas regulares.

Tabela 5.14: Eficiência da PHS-QM: Porcentagem de redução da H_s [m] entre as sondas a jusante em relação à sonda 10 m a montante da PHS submetida às ondas irregulares realísticas do estado de mar.

Caso	10 m jusante	Sonda fixa
$1L_p$	-7,1%	-7,8%
$1{,}5L_p$	-11,9%	-13,8%
$2L_p$	-22,9%	-26,7%
$2{,}5L_p$	-31,4$	-32,8%
$3L_p$	-39,4%	-41,9%

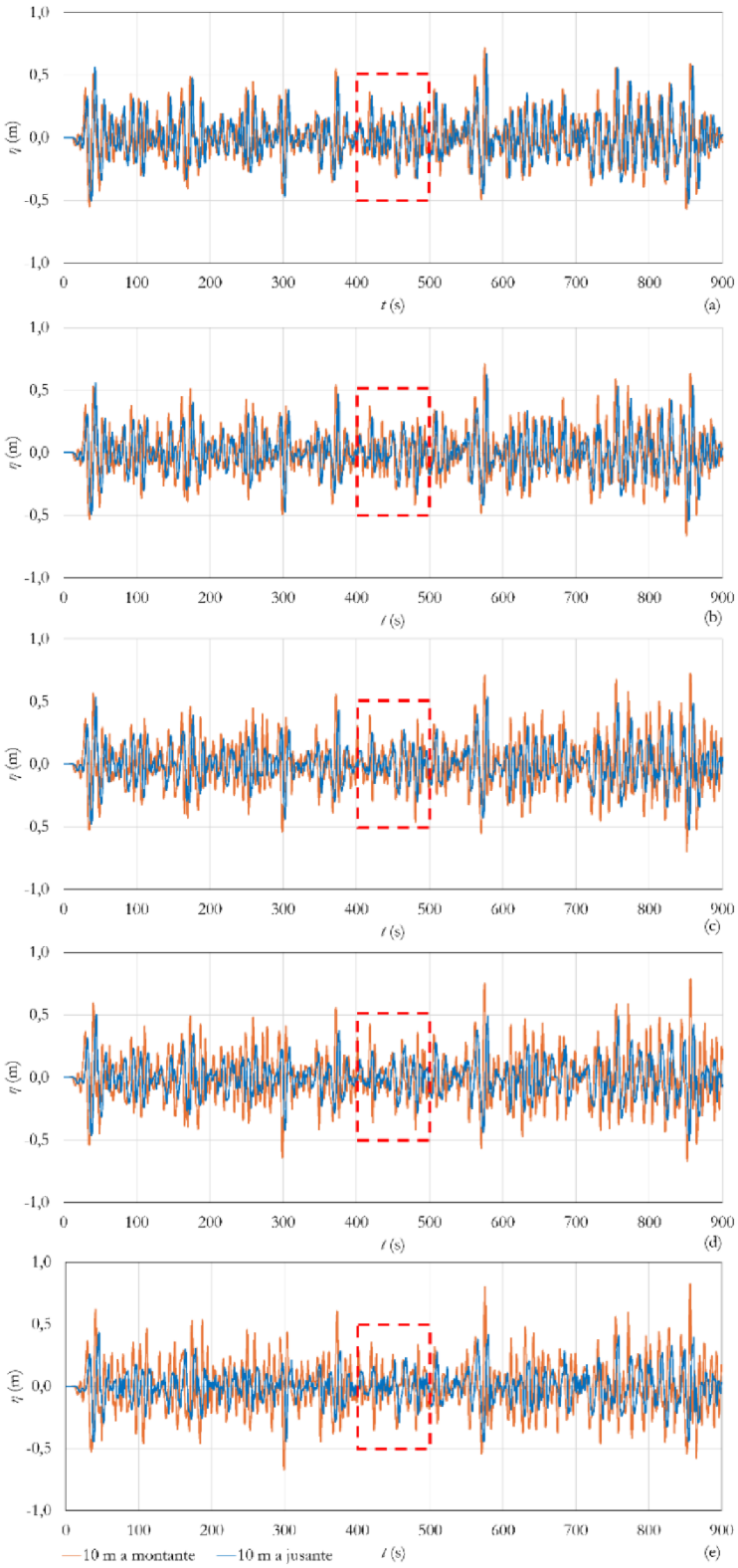


Figura 5.8: Análise da PHS como QM sob a incidência de ondas irregulares realísticas: (a) $1L_p$; (b) $1{,}5L_p$; (c) $2L_p$; (d) $2{,}5L_p$; (e) $3L_p$.

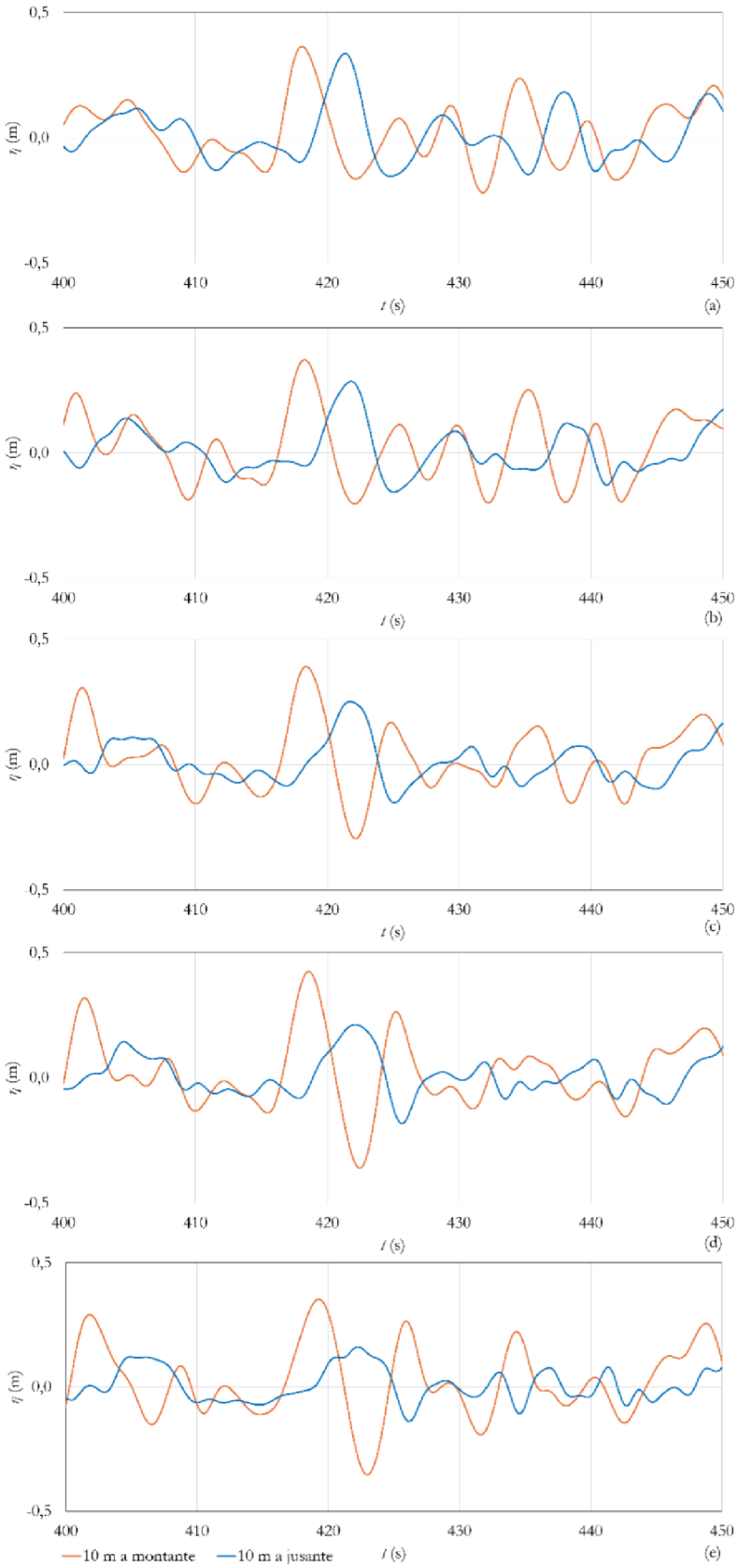


Figura 5.9: Destaque do monitoramento para 400 s < t < 450 s para cada caso: (a) $1L_p$; (b) $1{,}5L_p$; (c) $2L_p$; (d) $2{,}5L_p$; (e) $3L_p$.

Para a PHS na função de CEO, as Figura **5.10** e Figura **5.11** apresentam os perfis de velocidade axial máxima ao longo da profundidade monitorados em z = 4,284 m e z = 5,236 m, respectivamente. Ambos os perfis apresentam um comportamento similar entre si, com baixa variação das velocidades ao longo da profundidade para cada caso. Comparando esses perfis da PHS sob a incidência de ondas irregulares com os resultados das ondas regulares, Figura **5.6** e Figura **5.7**, é notável que as ondas irregulares apresentam velocidades muito superiores ao longo de toda a profundidade. Reforçando a importância de considerar dados mais reais para os estudos da PHS.

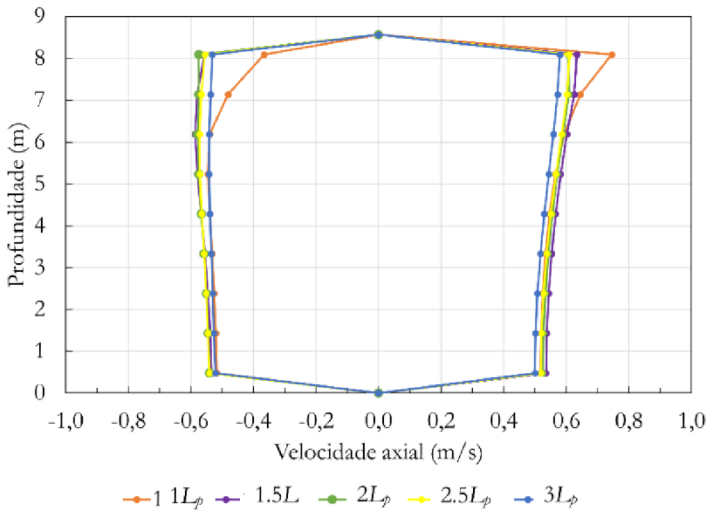


Figura 5.10: Perfil das velocidades axiais máximas abaixo da PHS para as ondas irregulares realísticas em diferentes instantes de tempo para o monitoramento em z = 4,284 m.

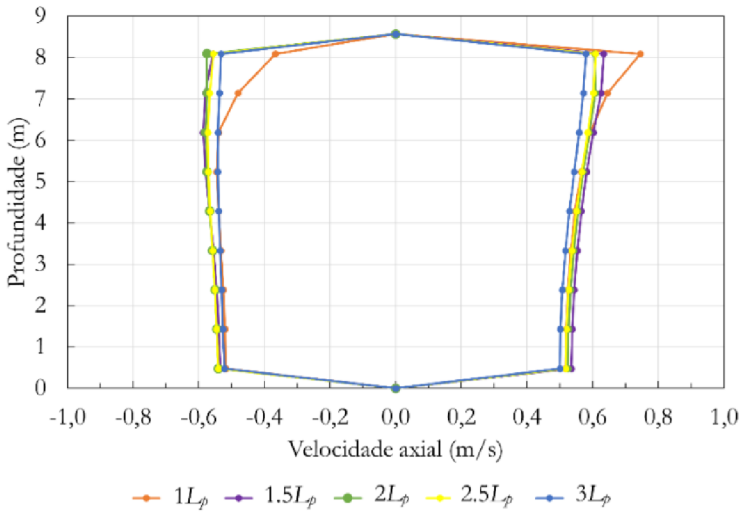


Figura 5.11: Perfil das velocidades axiais máximas abaixo da PHS para as ondas irregulares realísticas em diferentes instantes de tempo para o monitoramento em z = 5,236 m.

Nas Tabela **5.15** e Tabela 5.16 são apresentados os valores quantitativos considerados para a construção desse perfil de velocidades da Figura **5.10**, ou seja, considerando o valor máximo determinado para o ponto z = 4,284 m. O caso $2L_p$ tem a maior eficiência como CEO para ondas irregulares e o caso $2{,}5L_p$ alcança valores similares. A pior eficiência, nesta profundidade, é o caso $1L_p$. O padrão de eficiência dos casos se repete para as velocidades positivas nesta profundidade conforme apresenta a Tabela 5.16. Todas as velocidades são menores do que as máximas negativas, ainda que com pouca diferença entre seus módulos.

Tabela 5.15: Velocidade axial máxima negativa ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas irregulares realísticas.

Caso	$1L_p$	$1{,}5L_p$	$2L_p$	$2{,}5L_p$	$3L_p$
Instante de tempo [s]	852,38	852,85	852,98	853,24	853,61
Profundidade [m]	Velocidade Axial [m/s]				
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,476	-0,496	-0,518	-0,541	-0,541	-0,522
1,428	-0,499	-0,521	-0,545	-0,546	-0,526
2,380	-0,505	-0,526	-0,551	-0,551	-0,530
3,332	-0,513	-0,532	-0,558	-0,558	-0,535
4,284	**-0,522**	**-0,539**	**-0,567**	**-0,565**	**-0,539**
5,236	-0,531	-0,545	-0,575	-0,571	-0,542
6,188	-0,529	-0,539	-0,578	-0,572	-0,541
7,140	-0,472	-0,480	-0,573	-0,566	-0,536
8,092	-0,354	-0,366	-0,574	-0,554	-0,532
8,568	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 5.16: Velocidade axial máxima positiva ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas irregulares realísticas.

Caso	$1L_p$	$1{,}5L_p$	$2L_p$	$2{,}5L_p$	$3L_p$
Instante de tempo [s]	576,66	577,05	576,92	577	577,18
Profundidade [m]	Velocidade Axial [m/s]				
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,476	0,491	0,518	0,525	0,519	0,500
1,428	0,493	0,520	0,528	0,521	0,502
2,380	0,499	0,525	0,534	0,527	0,508
3,332	0,508	0,534	0,543	0,537	0,517
4,284	**0,521**	**0,547**	**0,556**	**0,551**	**0,530**
5,236	0,541	0,565	0,571	0,567	0,544
6,188	0,572	0,593	0,590	0,585	0,559
7,140	0,628	0,645	0,609	0,602	0,572
8,092	0,718	0,745	0,605	0,609	0,580
8,568	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Nas Tabela **5.17** e Tabela **5.18** são apresentados os valores quantitativos considerados para a construção dos perfis de velocidades da Figura 5.11, ou seja, considerando o valor máximo determinado para o ponto z = 5,236 m. O caso $1{,}5L_p$ tem a maior eficiência nessa profundidade e os casos $2L_p$ e $2{,}5L_p$ tem valores similares. O caso $3L_p$ é o de menor eficiência como CEO sob incidência de ondas irregulares.

Tabela 5.17: Velocidade axial máxima negativa ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas irregulares realísticas.

Caso	$1L_p$	$1{,}5L_p$	$2L_p$	$2{,}5L_p$	$3L_p$
Instante de tempo [s]	852,8	852,68	852,94	853,2	853,6
Profundidade [m]	Velocidade Axial [m/s]				
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,476	-0,517	-0,534	-0,540	-0,541	-0,522
1,428	-0,520	-0,538	-0,545	-0,545	-0,526
2,380	-0,525	-0,545	-0,550	-0,551	-0,530
3,332	-0,532	-0,555	-0,558	-0,558	-0,535
4,284	-0,539	-0,567	-0,567	-0,565	-0,539
5,236	**-0,546**	**-0,579**	**-0,575**	**-0,571**	**-0,542**
6,188	-0,539	-0,587	-0,579	-0,573	-0,541
7,140	-0,481	-0,580	-0,575	-0,567	-0,536
8,092	-0,366	-0,557	-0,575	-0,556	-0,532
8,568	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Na Tabela **5.18** o caso com maior velocidade axial no sentido de propagação da onda é o 2,5L_p, acompanhado pelo 2L_p com valores similares. Um ponto de discussão dos resultados apresentados nesse monitoramento é que, no sentido negativo, o caso mais eficiente era o 1,5L_p. Todavia, para os valores de velocidade positiva, este não se posiciona sequer entre os melhores casos. Além disso, as velocidades positivas não são menores do que as negativas para os presentes casos sob incidência de ondas irregulares realísticas. Esse resultado gera um estranhamento do princípio físico que, até então a literatura tem afirmado que os valores máximos ocorrem no sentido negativo. Portanto, foram calculadas as diferenças entre os valores positivos e negativos para cada caso na profundidade de $z = 5{,}236$ m. Assim, obteve-se que a maior diferença entre essas velocidades para um mesmo caso é de 0,01 m/s. Este valor é considerado insignificante e não compromete a qualidade e coerência física dos resultados obtidos e analisados para a PHS sob a incidência de ondas irregulares. Essa decisão justifica-se na premissa de que os estudos que mencionam a característica hidrodinâmica da velocidade axial ser maior no sentido negativo são estudo da PHS sob a incidência de ondas regulares. Até o presente momento, conforme conhecimento dos autores, não há outro estudo que avalie este parâmetro da PHS sob ondas irregulares realísticas. Portanto, não é descartada a possibilidade de que haja alterações desta premissa da velocidade axial para a PHS sob ondas irregulares. Para afirmar esse novo comportamento hidrodinâmico é necessário maiores estudos considerando outros comprimentos relativos entre L_p e λ assim como a incidência de outros estados de mar.

Tabela 5.18: Velocidade axial máxima positiva ao longo da profundidade para cada caso submetido às ondas irregulares realísticas.

Caso	$1L_p$	$1{,}5L_p$	$2L_p$	$2{,}5L_p$	$3L_p$
Instante de tempo [s]	577,03	576,81	576,9	576,98	577,18
Profundidade [m]	Velocidade Axial [m/s]				
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,476	0,517	0,535	0,525	0,519	0,500
1,428	0,520	0,538	0,527	0,521	0,502
2,380	0,525	0,544	0,533	0,527	0,508
3,332	0,534	0,553	0,543	0,537	0,517
4,284	0,547	0,566	0,556	0,551	0,530
5,236	**0,565**	**0,582**	**0,572**	**0,567**	**0,544**
6,188	0,593	0,602	0,590	0,586	0,559
7,140	0,645	0,626	0,609	0,603	0,572
8,092	0,745	0,634	0,606	0,609	0,580
8,568	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Para a incidência de ondas irregulares realísticas a PHS na função de CEO teve a sua maior eficiência no caso $2L_p$ para a profundidade z = 4,284 m e o caso $2{,}5L_p$ para a profundidade z = 5,236 m.

Por fim, buscando uma versão da PHS na função conjunta de QM e CEO, para a incidência de ondas irregulares realísticas, o caso $2{,}5L_p$ é o mais indicado pois é o segundo mais eficiente QM e como CEO. Também é um caso que tem as velocidades axiais máximas muito similares tanto na profundidade z = 4,284 m quanto z = 5,236 m.

5.3 Análise integral dos resultados da 2ªF

Outra forma de analisar os resultados da 2ªF para a PHS na função de QM e CEO é a integração das séries ao longo do tempo. Assim é possível criar uma perspectiva diferente para analisar os resultados da 2ªF, ampliando a discussão da hidrodinâmica do dispositivo. Isso ocorre porque, para a análise por integração é considerado todo o período de simulação, diferente do cálculo da H_s que utiliza apenas o terço superior de altura das ondas. Não foram analisados os resultados da 1ªF por essa metodologia.

Para a função de QM as curvas de elevação da superfície livre 10 m a montante e 10 m a jusante são integradas ao longo do tempo e suas áreas resultantes, comparadas entre si. Para a função de CEO as velocidades axiais abaixo da PHS, no ponto z = 4,284 m, são integradas ao longo do tempo e suas áreas resultantes, comparadas em relação ao caso de referência $1L_p$.

5.3.1 Ondas regulares representativas

Para ondas regulares representativas, as elevações da superfície livre que foram integradas são as apresentadas na Figura 5.4. Os resultados dessa metodologia estão apresentados na Tabela 5.19 que tem nas duas primeiras linhas os valores das séries de cada caso em unidade de área. A última linha desta tabela apresenta a relação entre a área a jusante e a montante, ou seja, a quantidade de redução da altura das ondas para a PHS como QM sob a incidência de ondas regulares representativas do estado de mar.

Conforme os resultados da Tabela **5.19**, todos os demais casos têm uma redução da altura das ondas superior ao caso $1L_p$. Para o monitoramento a montante observa-se que quanto maior o L_p, maior é a retenção/reflexão das ondas. Ou seja, maior a influência da PHS nas ondulações que chegam após um período de propagação. Isso está totalmente de acordo com a hidrodinâmica do dispositivo. Para o monitoramento à jusante da PHS há uma redução significativa nas áreas, tendo o caso $3L_p$ quase 50% menos unidades de área do que o caso $1L_p$. Ou seja, a PHS como QM sob ondas regulares representativas do estado de mar teve baixa transmissão da altura das ondas e, portanto,

comporta-se como um bom QM. Avaliando a relação entre as áreas dos próprios casos, o caso $2{,}5L_p$ apresenta-se – proporcionalmente - como melhor QM.

Tabela 5.19: Área das integrais e relação entre os resultados a 10 m a montante e 10 m a jusante para cada caso da PHS sob a incidência de ondas regulares representativas do estado de mar.

Caso	$1L_p$	$1{,}5L_p$	$2L_p$	$2{,}5L_p$	$3L_p$
Área 10 m a montante da PHS	152,31	167,50	194,72	199,70	230,88
Área 10 m a jusante da PHS	130,54	89,79	58,20	46,54	66,63
Razão entre as áreas	1,17	1,87	3,35	4,29	3,47

Na Figura **5.12** é possível visualizar a retenção maior no caso $3L_p$ do que no caso $1L_p$. Assim, é identificado que o aumento da eficiência como QM (redução da H_s) está relacionada à reflexão das ondas pela presença da PHS. O caso $3L_p$ é o único que apresentou um deslocamento do nível médio ao longo do tempo (ver Figura **5.13**). Fato esse que acrescenta à avaliação anterior da H_s no qual é considerado o caso mais eficiente para ondas regulares. Com a atual análise por integração foi possível identificar esse processo hidrodinâmico que ocorre durante a simulação em que há uma redução da quantidade de água no canal pois boa parte das ondas são refletidas para a entrada do canal. Assim como visto na 1ªF e 2ªF, o caso $1L_p$ com QM sob a incidência de ondas regulares tem uma redução insignificante nas alturas das ondas.

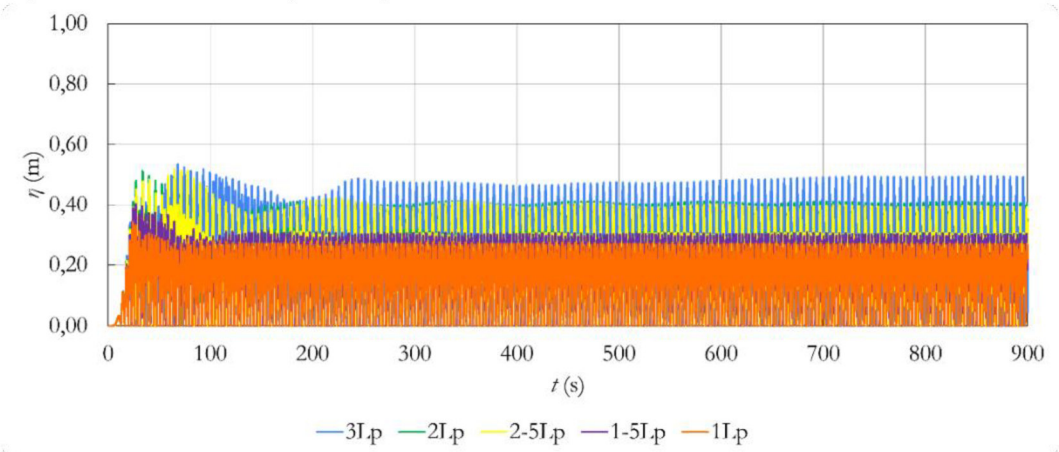


Figura 5.12: Curva das elevações em módulo para a sonda 10 m a montante da PHS sob ondas regulares representativas.

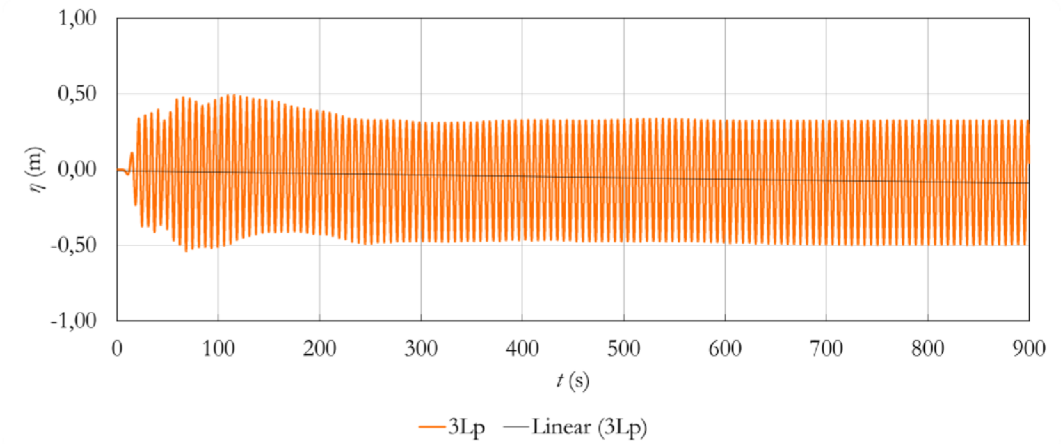


Figura 5.13: Elevação da superfície livre 10 m a montante da PHS ao longo do tempo para o caso $3L_p$ sob ondas regulares representativas.

A análise por integral da PHS na função de CEO sob a incidência de ondas regulares representativas do estado de mar ampliou a compreensão do efeito pulsante abaixo do dispositivo e a comparação de valores médios da velocidade axial ao longo do tempo.

Um CEO eficiente é aquele com alta velocidade axial abaixo do dispositivo, com capacidade para girar uma turbina e gerar energia elétrica. O caso mais eficiente, conforme a Tabela **5.20**, é o caso $1L_p$. A área da curva de velocidade do melhor caso tem valor bem similar ao caso $3L_p$. No geral, ainda que haja uma variação entre os casos, não é maior que 20% para ondas regulares representativas. Isso demonstra que o impacto na eficiência da PHS na função de CEO devido ao comprimento L_p. No entanto, essa dependência é menos significativa que os impactos da variação dos cinco casos de L_p na função de QM.

Tabela 5.20: Área e proporção da área de cada caso em comparação com o caso $1L_p$ de referência, para o monitoramento da velocidade axial abaixo da PHS em z = 4,284 m.

Caso	$1L_p$	$1{,}5L_p$	$2L_p$	$2{,}5L_p$	$3L_p$
Integral da área abaixo da curva	116,13	102,54	99,29	95,80	117,85
$\frlvert V_i \frrvert / \frlvert V_{1L_p} \frrvert$	-	0,88	0,85	0,82	1,01

O efeito pulsante da velocidade axial ao longo do tempo, observado em estudos experimentais (Orer e Ozdamar, 2007) e numéricos com geração das ondas sem a metodologia WaveMIMO (Seibt *et al.*, 2023), também é visível neste método de análise

integral. Portanto, este é mais um indicativo de que o modelo computacional está alinhado com os princípios físicos reais do dispositivo.

A Figura **5.14** apresenta as curvas, em módulo, das velocidades axiais ao longo do tempo para todos os casos. Destaca-se que as áreas dos casos 1,5L_p, 2L_p e 2,5L_p são similares e estabilizam após os 200 s.

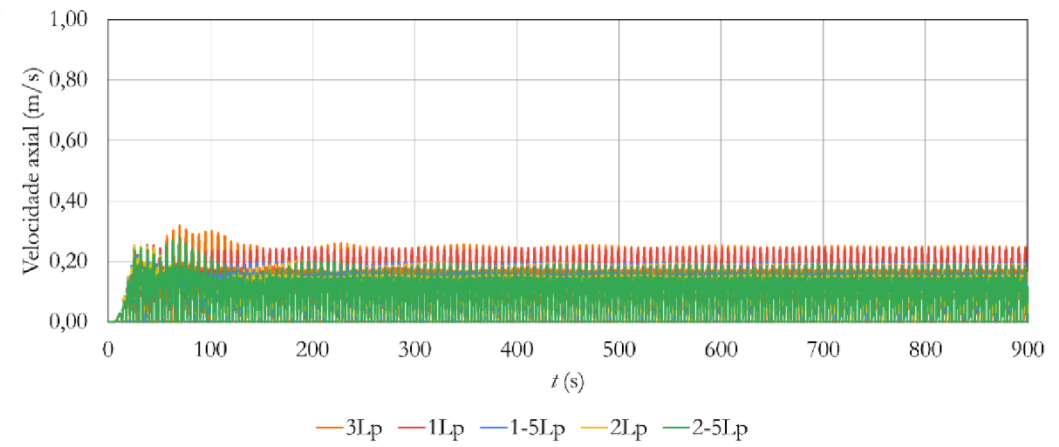


Figura 5.14: Curvas das velocidades axiais em módulo ao longo do tempo para ondas regulares representativas.

5.3.2 Ondas irregulares realísticas

Para ondas irregulares realísticas do estado de mar, as elevações da superfície livre que foram integradas são as apresentadas na Figura **5.8**. Os resultados dessa metodologia estão apresentados na Tabela **5.21** que tem nas duas primeiras linhas os valores integrados das séries de cada caso em unidade de área. A última linha desta tabela apresenta a relação entre a área a montante e a jusante, ou seja, a quantidade de redução da altura das ondas para a PHS como QM sob a incidência de ondas irregulares realísticas do estado de mar.

Conforme os resultados da Tabela **5.21**, exceto o caso 1,5L_p, todos os demais casos têm uma redução da altura das ondas superior ao caso 1L_p. Para o monitoramento à jusante da PHS há uma redução menos significativa nas áreas do que os resultados para ondas regulares. Avaliando a relação entre as áreas dos próprios casos, o caso 3L_p apresenta-se como melhor QM. Em concordância com a hidrodinâmica do dispositivo, a área das integrais a jusante da PHS reduz para todos os casos em comparação aos seus próprios valores a montante, ou seja, há menor transmissão das ondas após a PHS.

Tabela 5.21: Área das integrais e relação entre os resultados da elevação da superfície livre 10 m a montante e 10 m a jusante para cada caso da PHS sob a incidência de ondas irregulares realísticas do estado de mar.

Caso	$1L_p$	$1{,}5L_p$	$2L_p$	$2{,}5L_p$	$3L_p$
Área 10 m a montante da PHS	146,50	129,14	135,90	141,28	146,50
Área 10 m a jusante da PHS	113,30	107,11	100,95	96,88	87,01
Razão entre as áreas	1,29	1,21	1,35	1,45	1,68

Em relação à PHS na função de CEO, há pouca variação na área da velocidade axial entre os casos, sendo a maior de apenas 3%. A partir dos dados da Tabela **5.22**, pode-se interpretar que, para ondas irregulares realísticas, a velocidade axial média – ou ao longo do tempo – não sofreu influência do comprimento da PHS.

Tabela 5.22: Área e proporção da área de cada caso em comparação com o caso $1L_p$ de referência, para o monitoramento da velocidade axial abaixo da PHS em z = 4,284 m para ondas irregulares realísticas.

Caso	$1L_p$	$1{,}5L_p$	$2L_p$	$2{,}5L_p$	$3L_p$
Integral da área	109,95	109,95	111,07	112,89	111,26
$\frac{\lvert V_i \rvert}{\lvert V_{1L_p} \rvert}$	-	1,00	1,01	1,03	1,01

Na Figura **5.15** são apresentadas as curvas absolutas das velocidades axiais abaixo da PHS. É visível que as diferenças entre os casos estão nos picos das velocidades, enquanto os valores intermediários são mais próximos.

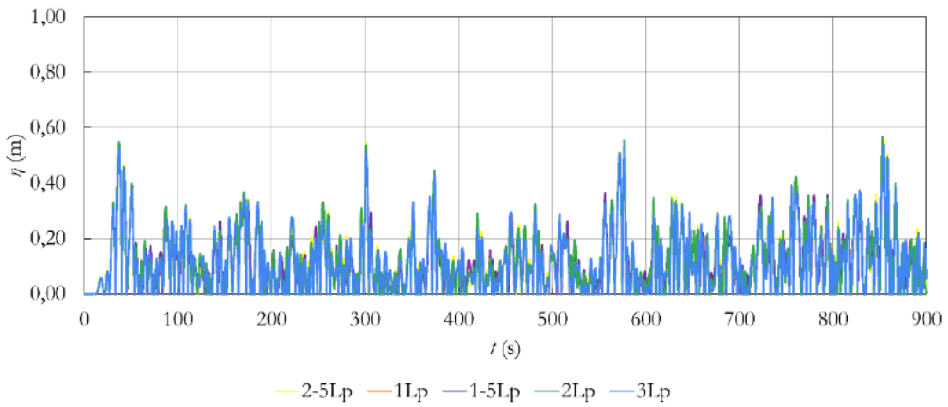


Figura 5.15: Curvas das velocidades axiais em módulo ao longo do tempo para ondas irregulares.

6 Conclusões

Este estudo numérico investigou diferentes comprimentos da PHS sujeita às ondas regulares representativas e ondas irregulares realísticas do estado do mar que ocorreu em 2014 na costa de Rio Grande (RS), município no sul do Brasil. Além disso, a PHS foi avaliada em termos de funcionalidade como QM, CEO e na análise conjunta como QM e CEO. Para isso, o modelo computacional que emprega a metodologia WaveMIMO foi validado e verificado.

A 1ªF teve seus resultados apresentados no Apêndice A. Devido à oscilação da H_s no monitoramento após a PHS, foi desenvolvida a 2ªF que afasta a região de PN do fim da PHS e da sonda fixa. Assim, a subseção 5.2.1 apresentou o teste da influência da PN na hidrodinâmica do dispositivo. Foi encontrada uma influência máxima de 1,2% nos valores da H_s para a PHS sob ondas regulares representativas enquanto, para a incidência de ondas irregulares realísticas, este valor chegou à 5,9%. As porcentagens de redução da H_s demonstram que a influência da PN foi maior sobre os resultados da sonda fixa do que na sonda 10 m a jusante da PHS na 1ªF. Concluiu-se que na 1ªF a posição da região de PN teve influência na hidrodinâmica do dispositivo, justificando o desenvolvimento da 2ªF. Assim, com os resultados melhorados, o domínio computacional da 2ªF foi considerado para avaliar a PHS nas funções de QM e CEO.

A PHS sob a incidência de ondas regulares representativas do estado de mar realístico teve o caso $3L_p$ como o de maior eficiência na função de QM, ou seja, o caso com maior redução da H_s na sonda 10 m a jusante do dispositivo. Os três maiores L_p tem valores de eficiência aproximados. Para a função de CEO, na profundidade central (z = 4,284 m) o caso mais eficiente foi o $3L_p$ e o caso $1L_p$ teve resultados aproximados. Já para a profundidade de z = 5,236 m o caso $3L_p$ novamente teve a melhor eficiência com uma diferença de 0,06 m/s em relação aos casos menos eficientes, $2L_p$ e $2{,}5L_p$. Para as ondas regulares representativas na função conjunta de QM e CEO o caso $3L_p$ obteve os melhores resultados.

A PHS sob a incidência de ondas irregulares realísticas do estado de mar realístico teve o caso $3L_p$ como o de maior eficiência na função de QM, ou seja, o caso com maior redução da H_s na sonda 10 m a jusante do dispositivo, assim como na análise com ondas regulares representativas. Aqui, a maior eficiência é 5,5 vezes a eficiência do menor caso, $1L_p$. Para a função de CEO, na profundidade central (z = 4,284 m) o caso mais eficiente foi o $2L_p$ e o caso $2{,}5L_p$ teve resultados aproximados. Já para a profundidade de z = 5,236 m o caso $1{,}5L_p$ teve a melhor eficiência. Para as ondas irregulares realísticas na

função conjunta de QM e CEO o caso 2,5L_p obteve os melhores resultados, pois é o segundo mais eficiente em cada uma das funções separadamente.

O caso 3L_p se mostrou como melhor QM em ambas as abordagens de ondas incidentes, sendo a eficiência 1,7 vezes menor para ondas irregulares realísticas em comparação com as ondas regulares representativas. O caso 3L_p se mostrou como o pior CEO sob a incidência de ondas irregulares realísticas. Esse fato fortalece a necessidade de tratar os dispositivos de proteção costeira com estudos numéricos considerando ondas irregulares. Afinal, essa aproximação resulta em valores mais realísticos do que os obtidos com ondas regulares.

Até aqui o presente estudo apresenta duas constatações: (a) a confirmação de que o uso de ondas regulares representativas em estudos numéricos é insuficiente para determinar a hidrodinâmica real do processo, especialmente quando o foco é definir a eficiência da PHS como QM ou como CEO; (b) esses resultados são os primeiros a considerar numericamente a PHS com ondas irregulares e considerando ambas as funções como QM e como CEO.

Vale lembrar que o estudo de turbina não é do escopo do presente estudo. Ainda que tenha sido aprimorada a análise de velocidade axial máxima para a 2ªF, uma avaliação da altura útil de instalação da turbina é fundamental para garantir a análise mais aprofundada da PHS como CEO. Indica-se a necessidade de um estudo futuro com esse tipo de teste para ampliar a interpretação dos resultados e melhor estimar a eficiência da PHS-CEO com ondas irregulares.

Na subseção 6.3 é apresentada outra metodologia de análise através da integração das curvas de elevação da superfície livre 10 m a montante e a jusante, e da velocidade axial abaixo da PHS, tal qual executado por Motta *et al.* (2025). Para a propagação de ondas regulares representativas o caso com maior redução na área 10 m a montante e a jusante é o 2,5L_p, sendo que o caso 2L_p e 3L_p tem valores muito próximos entre si. Na função de CEO o caso 3L_p é o único que tem quase a mesma eficiência do caso de referência, 1L_p, os demais são inferiores. Para a propagação de ondas irregulares realísticas o caso com maior redução na área 10 m a montante e a jusante é o 3L_p, assim como na metodologia de análise com a H_s. Na função de CEO todos os casos têm eficiência similar ao 1L_p, sendo 3% a maior diferença em relação ao caso de referência.

Ao tratar das recomendações da PHS a maior eficiência teve valores similares a outros casos, gerando diferentes possibilidades de L_p recomendado para as respectivas funções avaliadas. Destaca-se que a decisão por qual comprimento L_p considerar para a PHS irá depender do contexto do ponto de instalação do dispositivo. Esta decisão deve ser feita pela pessoa projetista, afinal existem outras variáveis envolvidas no projeto de instalação do dispositivo para além das ondas incidentes serem regulares ou irregulares, a qual este estudo se ocupa. A seguir é apresentada o exemplo de um possível critério de desempate entre os casos: o custo construtivo da PHS e sua função objetivo.

Por exemplo, para ondas regulares representativas o dispositivo PHS na função de CEO teve as melhores eficiências nos casos $1L_p$ e $3L_p$, enquanto o QM mais eficiente foi o caso $3L_p$. Nesta situação, se há o interesse na PHS apenas na função de CEO, é evidente que o caso $1L_p$ terá a eficiência máxima e um custo construtivo menor pois tem o comprimento de 3,45 m. Todavia, se há o interesse na função conjunta de QM e CEO, ainda que haja um aumento no custo de construção devido ao comprimento de 10,37 m da PHS, o caso $3L_p$ é mais eficiente para a análise conjunta. Esta ponderação também deve ser considerada na incidência de ondas irregulares. Na função de CEO, os casos $2L_p$ e $2{,}5L_p$ tiveram as maiores eficiências na profundidade $z = 4{,}284$ m e o caso $1{,}5L_p$ em $z = 5{,}236$ m. Portanto, se há o interesse unicamente nesta função, é recomendado a construção da PHS mais curta. Todavia, havendo o interesse na função conjunta QM e CEO, o caso $2{,}5L_p$ apresenta-se com uma solução mais eficiente apesar do aumento no custo construtivo de uma PHS mais longa.

Por fim, propõe-se os seguintes trabalhos futuros para aprofundar as análises da hidrodinâmica da PHS, em especial sob a incidência de ondas irregulares:

- Ampliar o intervalo de L_p avaliados, considerando dispositivos com maior comprimento relativo em relação ao comprimento da onda, tanto para a função de QM quanto de CEO;
- Expandir as ondas incidentes através de outros estados de mar, aproximando as eficiências da PHS para as funções de QM e CEO na situação real em que o dispositivo está instalado;
- Avaliar o efeito da espessura da placa (e_p) sob a incidência de ondas irregulares, em especial na reflexão das ondas na função de QM;
- Simular numericamente a PHS com elementos de fixação submetidos a ondas irregulares através da metodologia WaveMIMO para compreender os esforços gerados pelos estados de mar;
- Avaliar a potência energética da PHS como CEO com estudos viabilidade para instalação de turbinas, melhorando a posição de monitoramento da velocidade axial;
- Avaliar os efeitos hidrodinâmicos do dispositivo em estudos considerando a presença da turbina abaixo da PHS, em especial sua influência no ponto de análise da velocidade axial;
- Elaborar modelos numéricos e experimentais em 3D que considerem mais unidades da PHS sobre a incidência de ondas uni e bidirecionais. Avaliar ambas as funções de QM e CEO.

Referências

Aghili, M.; Ghadimi, P.; Maghrebi, Y. F.; Nowruzi, H. Simulating the interaction of solitary wave and submerged horizontal plate using SPH method. **International Journal of Physical Research**, v. 2, p. 16-26, 2014.

Carter, R. W. **Wave energy converters and a submerged horizontal plate**. Dissertação (Degree of Master of Science in Ocean and Resources Engineering) - University of Hawai, Manoa, USA, p. 273. 2005.

Chai, T.; Draxler, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development**, v. 7, p. 1247-1250, 2014.

Chakrabarti, S. K. **HANDBOOK OF OFFSHORE ENGINEERING**, v. 1, Amsterdam Heidelberg: Elsevier, 661 p., 2005.

Cheng, Y.; Ji, C.; Ma, Z.; Zhai, G.; Oleg, G. Numerical and experimental investigation of nonlinear focused waves-current interaction with a submerged plate. **Ocean Engineering**, v. 135, p. 11-27, 2017.

Cisco, L.A.; Maciel, R.P.; Oleinik, P.H.; Dos Santos, E.D.; Gomes, M.N.; Rocha, L.A.O.; Isoldi, L.A.; Machado, B.N. Numerical Analysis of the Available Power in an Overtopping Wave Energy Converter Subjected to a Sea State of the Coastal Region of Tramandaí, Brazil. **Fluids**, v. 7, n. 11, p. 359, 2022.

Dean, R. G.; Dalrymple, R. A. **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists**. Singapore: World Scientific, 370 p., 1991.

Dick, T. M.; Brebner, A. Solid and Permeable Submerged Breakwaters, in: Coastal Engineering Proceedings, **Anais** [S. l.], v. 1, n. 11, cap. 72, 1968, p. 1141-1158.

Energy Institute. **Statistical Review of World Energy**, 72 ed., 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, 2017.

Fang, Q.; Yang, C.; Guo, A. Hydrodynamic Performance of Submerged Plates During Focused Waves. **Journal of Marine Science Engeneering**, v. 7, n. 11, 2019, p. 389.

Gomes, M. D. N. **Modelagem Computacional De Um Dispositivo Coluna D'água Oscilante Para A Conversão Da Energia Das Ondas Do Mar Em Energia Elétrica**. Orientador: Prof. Dr. Cláudio Rodrigues Olinto. 2010. Dissertação (Mestre em Modelagem Computacional) - Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, 2010.

_____. **Constructal Design De Dispositivos Conversores De Energia Das Ondas Do Mar Em Energia Elétrica Do Tipo Coluna De Água Oscilante**. Orientador:

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2014.

Gomes, M. D. N.; Lorenzini, G.; Rocha, L. A. O.; Santos, E. D. D.; Isoldi, L. A. Constructal Design Applied to the Geometric Evaluation of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter Considering Different Real Scale Wave Periods. **Journal of Engineering Thermophysics**, v. 27, n. 2, p. 173–190, 2018.

González, A.T.; Dunning, P.; Howard, I.; McKee, K.; Wiercigroch, M. Is Wave Energy Untapped Potential? **Int. J. Mech. Sci.**, v. 205, p. 106544, 2021.

Graw, K. **Is the submerged plate wave energy converter ready to act as a new coastal protection system?** In: XXIV Convegno Di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. **Anais...** Napoli, 1994.

Greene, T. R.; Heins, A. E. Water waves over a channel of infinite depth. **Applied Mathematics**, v. 11, p. 201–214, 1953.

Hayatdavoodi, M.; Ertekin, R. C.; Valentine, B. D. Solitary and cnoidal wave scattering by a submerged horizontal plate in shallow water. **AIP ADVANCES**, v. 7, n. 06, p. 065212, 2017.

He, M.; Gao, X.; Xu, W.; Ren, B.; Wang, H. Potential application of submerged horizontal plate as a wave energy breakwater: A 2D study using the WCSPH method. **Ocean Engineering**, v. 185, p. 27–46, 2019.

Heins, A. E. Water Waves Over a Channel of Finite Depth With a Submerged Plane Barrier. **Canadian Journal of Mathematics**, v. 2, p. 210 – 222, 1950.

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

Holthuijsen, L.H. **Waves in Oceanic and Coastal Waters.** Cambridge University Press: New York, USA, 2007.

Hubner, R.G.; Fragassa, C.; Paiva, M.D.S.; Oleinik, P.H.; Gomes, M.D.N.; Rocha, L.A.O.; Santos, E.D.D.; Machado, B.N.; Isoldi, L.A. Numerical Analysis of an Overtopping Wave Energy Converter Subjected to the Incidence of Irregular and Regular Waves from Realistic Sea States. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 8, p. 1084, 2022.

Kar, C.-J.; Els, P.S. Validation Metric Based on Relative Error. **Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems**, v. 18, n. 5, p. 487–520, 2012.

Karimpour, A. **OCEANLYZ.** 2024. Disponível em: https://sites.google.com/view/oceanlyz

Karmakar, D.; Soares, C. G. Wave Motion Control Over Submerged Horizontal Plates. In: Proceedings of the ASME 2015, 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. **Anais...** Newfoundland, Canada, 2015.

Lima, S. F.; Almeida, L. E.; Toldo Jr., E. Estimativa da Capacidade de Transporte Longitudinal de Sedimentos a partir de Dados de Ondas para a Costa do Rio Grande do Sul. **Pesquisas em Geociências**, p. 99-107, maio/ago. 2002.

Lisboa, R. D. C.; Teixeira, P. R. D. F.; Didier, E. Simulação Da Propagação De Ondas Regulares E Irregulares Em Um Canal Bidimensional Com Praia Numérica. In: 7º SEMENGO. **Anais ...** Rio Grande. ed. 7, 2016.

Machado, B. N.; Oleinik, P. H.; Kirinus, E. De P.; Dos Santos, E. Do.; Rocha, L. A. O.; Gomes, M. Das N.; Conde, J. M. P.; Isoldi, L. A. WaveMIMO Methodology: Numerical Wave Generation of a Realistic Sea State. **Journal of Applied and Computational Mechanics**, v. 74, p. 2129-2148, 2021.

Maciel, R. P.; Fragassa, C.; Machado, B. N.; Rocha, L. A. O.; Dos Santos, E. D.; Gomes, M. D. N.; Isoldi, L. A. Verification and Validation of a Methodology to Numerically Generate Waves Using Transient Discrete Data as Prescribed Velocity Boundary Condition. **Journal of Marine Science Engeneering**, v. 9, n. 896, 2021, 19 p.

Maciel, R. P.; Machado, B. N.; Oleinik, P. H.; Dos Santos, E. D.; Gomes, M. D. N.; Isoldi, L. A. Investigation of Numerical Irregular Wave Generation Using Transient Discrete Data as Boundary Conditions of Prescribed Velocity. **Defect Diffusion Forum** v. 11, n. 427, 2023, 31 p.

Maliska, C.R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. LTC, Rio de Janeiro, 2004.

Martins, J. C.; Fragassa, C.; Goulart, M. M.; Dos Santos, E. D.; Isoldi, L. A.; Gomes, M. D. N.; Rocha, L. A. O. Constructal Design of an OvertoppingWave Energy Converter Incorporated in a Breakwater. **Journal of Marine Science Engeneering**, v. 10, n. 471, 2022, 27 p.

Mavriplis, D. J. Unstructured Grid Techniques. **Annual Reviews Fluid Mechanics**, v. 29, p. 473-514, 1997.

Mocellin, A. P. G.; Maciel, R. P.; Oleinik, P. H.; Santos, E. D. D.; Rocha, L. A. O.; Ziebell, J. S.; Isoldi, L. A.; Machado, B. N. Geometrical Analysis of an Oscillating Water Column Converter Device Considering Realistic Irregular Wave Generation with Bathymetry. **Journal of Experimental and Theoretical Analyses,** v. 1, p. 24-43, 2023.

Motta, V. E.; Thum, G. Ü.; Gonçalves, R. A. A. C.; Rocha, L. A. O.; dos Santos, E. D.; Machado, B. N.; Isoldi, L. A. Numerical Study of Inclined Geometric Configurations of a Submerged Plate-Type Device as Breakwater and Wave Energy Converter in a Full-Scale Wave Channel. **Journal of Experimental and Theoretical Analyses**, v. 3(1), n. 3, 2025.

Muehe, D. (Org.). **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2006. 476 p.

Oleinik, P.H. **Metodologia Numérica para a Simulação Hidrodinâmica de Estados de Mar Utilizando Dados Espectrais e Estudo de Caso de um OWC na Costa de Rio Grande–RS.** Orientador: Prof. Dr Liércio André Isoldi. 2020. Dissertação (Mestre em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, 2020.

Oleinik, P.H.; Tavares, G.P.; Machado, B.N.; Isoldi, L.A. Transformation of Water Wave Spectra into Time Series of Surface Elevation. **Earth**, 2021, 2, 997–1005.

Oleinik, P. H.; Maciel, R. P.; Santos, E. D. D.; Rocha, L. A. O.; Machado, B. N.; Isoldi, L. A. Numerical method for the characterization of sea states using realistic irregular waves on computational fluid dynamics simulations for application on wave energy converters. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 73, 2025.

Opoku, F.; Uddin, M.N.; Atkinson, M. A Review of Computational Methods for Studying Oscillating Water Columns – the Navier-Stokes Based Equation Approach. **Renew. Sustain. Energy Rev.** v. 174, p. 113124, 2023.

ONU (Organização das Nações Unidas), United Nations Framework Convention on Climate Change. Paris Agreement. In **Proceedings of the Conference of Parties 17,** Paris, France. p. 32, 2015a.

ONU (Organização das Nações Unidas). **Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development**. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015b.

Orer, G.; Ozdamar, A. An experimental study on the efficiency of the submerged plate wave energy converter. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 32, p. 1317-1327, 2007.

Paiva, M. D. S.; Mocellin, A. P. G.; Koch, A. H. D. S.; Oleinik, P.H.; Isoldi, L.A.; Machado, B.N. investigation on the discretization of the realistic irregular wave generation region through the waveMIMO methodology. **Rev. Eng. Térmica**, v. 22, p. 03, 2023.

Paiva, M. d. S.; Mocellin, A. P. G.; Oleinik, P. H.; dos Santos, E. D.; Rocha, L. A. O.; Isoldi, L. A.; Machado, B. N. Geometrical Evaluation of an Overtopping Wave Energy Converter Device Subject to Realistic Irregular Waves and Representative Regular Waves of the Sea State That Occurred in Rio Grande—RS. **Processes**, *13*(2), 335, 2025.

Park, J. C.; Kim, M. H.; Mitaya, H. Fully non-linear free surface simulation by a 3D viscous numerical wave tank. **International Journal for Numerical Method in Fluids**, v. 29, p. 685-703, 1999.

Pecher, A.; Kofoed, J. P. (Ed.). **Handbook of Ocean Wave Energy**. Ocean Engineering & Oceanography, v. 7, Springer, 2017, 287 p.

Samad, A.; Sannasiraj, S. A.; Sundar, V.; Halder, P. (Eds.). **Ocean Wave Energy Systems: Hydrodynamics, Power Takeoff and Control Systems**. Ocean Engineering & Oceanography, v. 14, Springer, 2022, 578 p.

Seibt, F. M. **Modelagem computacional de conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo placa submersa.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Orientador: Prof. Dr. Liércio André Isoldi. Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, RS, Brasil, 2011, 53p.

Seibt, F. M.; Couto, E. C.; Teixeira, P. R. D. F.; Santos, E. D. D.; Isoldi, L. A. Análise Numérica De Uma Placa Submersa Como Quebra Mar E Conversor De Energia Das Ondas. **Vetor**, Rio Grande, v. 22, n. 2, p. 5-17, 2012.

Seibt, F. M.; Couto, E. C.; Santos, E. D. D.; Isoldi, L. A.; Rocha, L. A. O.; Teixeira, P. R. D. F. Numerical Study on the Effect of Submerged Depth on the Horizontal Plate Wave Energy Converter. **China Ocean Engineering**, v. 28 p. 687–700, 2014.

Seibt, F. M.; Santos, E. D. D.; Isoldi, L. A.; Rocha, L. A. O. Modelagem Computacional Do Conversor De Energia Das Ondas Tipo Placa Horizontal Submersa Em Escala Real E Análise De Similaridade Com Modelo Em Escala De Laboratório. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 3, p. 397-418, 2017a.

Seibt, F. M.; Rocha, L. A. O.; Santos, E. D. D.; Isoldi, L. A. Estudo Numérico Do Efeito Da Variação Conjunta Do Comprimento E Da Altura Relativa De Um Conversor De Energia Das Ondas Tipo Placa Horizontal Submersa. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 3, p. 586-605, 2017b.

Seibt, F. M. **Estudo Numérico De Um Dispositivo De Placa Horizontal Submersa Para Conversão De Energia Das Ondas Do Mar Em Energia Elétrica Aplicando Design Construtal.** Orientador: Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha. Tese (Doutor em Engenharia) - Universidade Federal Do Rio Grande (FURG), 2019.

Seibt, F. M.; Santos, E. D. D.; Isoldi, L. A.; Rocha, L. A. Constructal Design on Froude-Scaled Models of a Submerged Horizontal Plate Type Wave Energy Converter. In: XXV ENMC, XIII ECTM, 9º MCSul e IX SEMENGO, Formato Virtual, **Anais...**, 2022.

Seibt, F. M.; Santos, E.D.D.; Isoldi, L.A.; Rocha, L.A.O. Constructal Design on full-scale numerical model of a submerged horizontal plate-type wave energy converter. **Marine Systems & Ocean Technology,** v. 18, p. 1-13, 2023.

Siew, P. F.; Hurley, D. G. Long surface waves incident on a submerged horizontal plate. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 83, n. 1, p. 141-151, 1977.

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, p. 3710–3730, 2011.

Tavakoli, S.; Khojasteh, D.; Haghani, M.; Hirdaris, S. A Review on the Progress and Research Directions of Ocean Engineering. **Ocean Eng.**, v. 272, p. 113617, 2023.

Trombetta, T. B. Wave energy attenuation over a plane slope acting as a coastal protection structure on the southern Brazilian shelf. **Regional Studies in Marine Science**, v. 28, p. 1-6, 2019.

Thorpe, T. W. **A Brief Review of Wave Energy**. ETSU-R120, Report Produced for The UK Department of Trade and Industry, 1999.

Thum, G. Ü.; Maciel, R. P.; Oleinik, P. H.; Rocha, L. A. O.; dos Santos, E. D.; Seibt, F. M.; Machado, B. N.; Isoldi, L. A. Numerical Analysis of the Submerged Horizontal Plate Device Subjected to Representative Regular and Realistic Irregular Waves of a Sea State. **Fluids**, *9*(8), 188, 2024.

UNESCO. **A ciência que precisamos para o oceano que queremos:** a Década das Nações Unidas da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021-2030), Paris, 2019.

USA Army. **Shore Protection Manual**. Vicksburg: Coastal Engineering Research Center, 1984.

Versteeg, H. K.; Malalasekera, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method**. 2 ed. Harlow, England: Pearson. 2007.

Wahyudie, A.; Jama, M.A.; Susilo, T.B.; Saeed, O.; Nandar, C.S.A.; Harib, K. Simple Bottom-up Hierarchical Control Strategy for Heaving Wave Energy Converters. **Int. J. Electr. Power Energy Syst.,** v. 87, p. 211–221, 2017.

Wang, K.; Shen, Q. Wave motion over a group of submerged horizontal plates. **International Journal of Engineering Science**, v. 37, p. 703-715, 1999.

Xu, Y.; Zhang, G.; Wan, D.; Chen, G. MPS Method for Study of Interactions between Solitary Wave and Submerged Horizontal Plate. In: Proceedings of the International Ocean And Polar Engineering Conference, 29 ed. **Anais...** Honolulu, Hawaii, USA, 2019.

Yu, X. Functional performance of a submerged and essentially horizontal plate for offshore wave control: a review. **Coastal Engineering Journal**, v. 44, n. 2, p. 127-147, 2002.

Zheng, Y.; Zhou, Y.; Jin, R.; Mu, Y.; He, M.; Zhao, L. Experimental Study on Submerged Horizontal Perforated Plates under Irregular Wave Conditions. **Water**, v. 15, n. 3015, 2023.

Zwart, P. J.; Godin, P. G.; Penrose, J.; Rhee, S. H. Ship Hull Simulations with a Coupled Solution Algorithm**. Proceedings of the 10th International Symposium on Practical Designs of Ships and Other Floating Structures**. Houston, USA, 2007.

Apêndice A - Resultados da 1ª Formulação do Domínio Computacional

O Apêndice A apresenta e discute os resultados da 1ªF do domínio computacional para a incidência de ondas regulares e irregulares realísticas do estado de mar, os quais foram brevemente destacados na seção 5.1. São avaliados os resultados dos monitoramentos da elevação da superfície livre para a função de QM e os da velocidade axial abaixo da PHS para a função de CEO. Para a 1ªF não há análise por integração das séries ao longo do tempo.

1ªF - PHS sob a incidência das ondas regulares representativas

As características das ondas regulares representativas podem ser vistas na Figura **3.3**. Devido à condição inicial de repouso do fluido, na análise dos resultados apresentados abaixo, o intervalo de tempo considerado é de 200 s $\leq t \leq$ 900 s. Com relação à avaliação da PHS como QM, a Figura A. 1 (a) - (e) compara os resultados da elevação da superfície livre a montante e a jusante da PHS para cada um dos casos.

Qualitativamente, pode-se observar na Tabela A. 1 que há uma redução de H_s para todos os casos, demonstrando consistência com o interesse inicial da PHS em reduzir as ondas transmitidas após o dispositivo. Também é possível observar que a redução na elevação da superfície livre após a PHS é diretamente proporcional ao comprimento da placa, sendo o caso $1L_p$ o que apresenta a maior H_s a jusante do dispositivo. A análise quantitativa dos resultados é necessária para confirmar os resultados. A Tabela A. 1 apresenta os resultados de H_s para todos os casos nas sondas distantes 10 m à montante e à jusante da PHS. A última coluna apresenta o valor do ERP entre as sondas para cada um dos casos, ou seja, é a porcentagem de redução após a propagação sobre o dispositivo, interpretada como a eficiência da PHS na função de QM. Na Tabela A. 1 o aumento de L_p melhora a eficiência do QM para ondas regulares representativas do estado de mar já que, entre os casos $1L_p$ e 3 L_p, a diferença de redução alcançada foi acima de 55%.

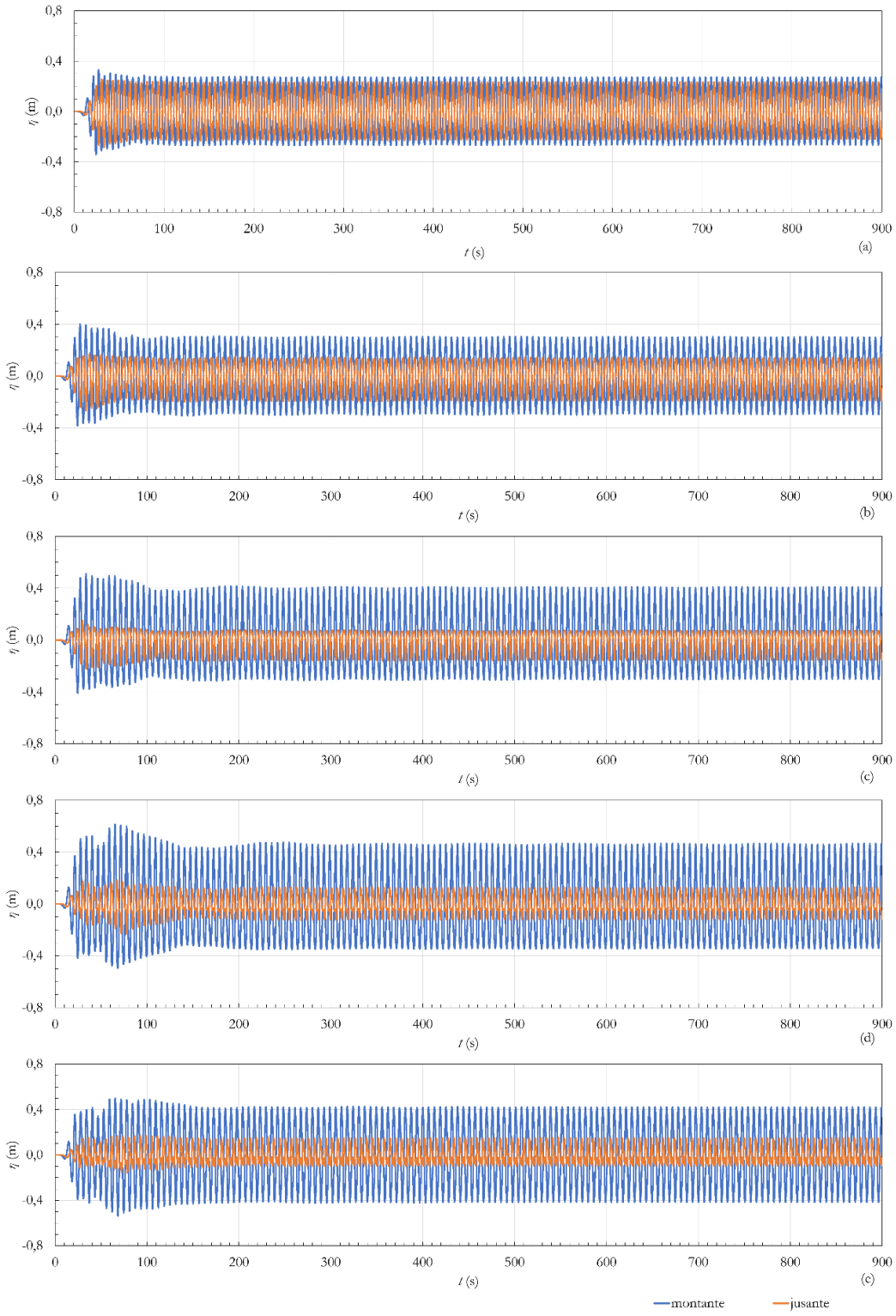


Figura A. 1: Análise da PHS como QM sob a incidência de ondas regulares representativas (1ªF): (a) $1L_p$; (b) $1{,}5L_p$; (c) $2L_p$; (d) $2{,}5L_p$; (e) $3L_p$.

Tabela A. 1: H_s calculada 10 m a montante e a jusante da PHS para todos os casos sob ondas regulares representativas (1ªF).

Caso	10 m antes da PHS	10 m depois da PHS	ERP
	(x = 93,2 m)	(x = variável)	(redução de H_s)
$1L_p$	0,540	0,461	-14,62%
$1{,}5L_p$	0,599	0,329	-45,05%
$2L_p$	0,713	0,227	-68,16%
$2{,}5L_p$	0,812	0,246	-69,63%
$3L_p$	0,840	0,246	-70,70%

Uma segunda maneira de avaliar a PHS na função de QM é através da sonda de elevação da superfície livre posicionada em x = 128,63 m em todos os casos avaliados ($1L_p$, $1{,}5L_p$, $2L_p$, $2{,}5L_p$, $3L_p$). Como essa sonda está mais distante da PHS, em comparação com a análise anterior, e posicionada antes do início da PN, interpreta-se que essas seriam as H_s que atingiriam a costa depois de passar pelo dispositivo. A Tabela A.2 apresenta quantitativamente a H_s para as sondas localizadas a 10 m a montante e na sonda fixa a jusante da PHS.

Tabela A. 2: H_s calculada 10 m a montante da PHS e na sonda fixa, localizada em x = 128,63 m para todos os casos sob ondas regulares representativas (1ªF).

Caso	10 m antes da PHS	Sonda fixa	ERP
	(x = 93,2 m)	(x = 128,63 m)	(redução da H_s)
$1L_p$	0,540	0,456	-15,61%
$1{,}5L_p$	0,599	0,309	-48,50%
$2L_p$	0,713	0,229	-67,88%
$2{,}5L_p$	0,812	0,215	-73,52%
$3L_p$	0,840	0,239	-71,61%

Na Tabela A.2 é observado que o caso $3L_p$ aumentou a capacidade de redução de H_s em 4,5 vezes em comparação com o caso $1L_p$. Em contraste com a análise anterior, na qual o caso $3L_p$ era o QM mais eficiente, ao comparar a H_s a montante da PHS com as ondas que atingem a costa depois de passar pelo dispositivo (sonda fixa) o caso de $2{,}5L_p$ é o mais eficiente. Apenas os casos $1{,}5L_p$ e $2{,}5L_p$ tem variação em torno de 3% da redução da H_s após a PHS, os demais casos tem variações até 1% para a H_s monitorada a jusante do dispositivo.

Um comportamento interessante está relacionado ao aumento da eficiência na redução de H_s, que foi de 3 vezes para o caso de $1{,}5L_p$ em comparação com o caso de $1L_p$;

enquanto a redução de H_s dos melhores casos ($2{,}5L_p$ e $3L_p$) aumentou a eficiência mais de 4,5 vezes em comparação com o pior caso ($1L_p$). Portanto, entende-se que a variação dos efeitos de redução da altura da onda devido ao comprimento da PHS não é linear, mesmo na propagação de ondas regulares.

Outro ponto a ser discutido é a viabilidade econômica de uma PHS longa. Ao comparar os valores de H_s que atingem a costa para os casos de $2{,}5L_p$ e $3L_p$, por exemplo, o aumento de 20% no comprimento do dispositivo para o segundo caso levou a uma diminuição na eficiência de redução da altura da onda. Portanto, dada a evolução não linear da eficiência de redução de ondas, o interesse no comportamento da PHS sob a incidência de ondas irregulares realísticas é justificado e reforçado.

Em sequência, foi avaliada a PHS como CEO quando submetida às ondas regulares representativas do estado do mar de Rio Grande (RS). A Figura A. 2 mostra os perfis de velocidade axial máxima obtidos abaixo da PHS ao longo da profundidade (ver Figura **5.2**) para cada um dos casos. Como mencionado, os valores máximos são negativos devido ao fato de que as velocidades mais altas ocorrem na direção oposta à propagação da onda. Esse padrão se repete neste estudo, bem como na literatura (Orer e Ozdamar, 2007; Seibt *et al.* 2019; He *et al.*, 2019).

Pode-se observar que, para os casos de $1{,}5L_p$ e $2L_p$, não houve diferenças consideráveis nos perfis de velocidade na direção oposta à propagação. Por outro lado, na direção positiva, há uma variação ao se aproximar da superfície, porém, neste estudo, a região de interesse para a futura instalação de uma turbina é a região central entre o fundo e a PHS. Os casos $2{,}5L_p$ e $3L_p$ têm um perfil semelhante na direção da propagação da onda, enquanto, para as velocidades axiais negativas máximas, o valor do caso $3L_p$ é 12% maior no ponto da PHS de interesse como CEO em z = 4,284 m).

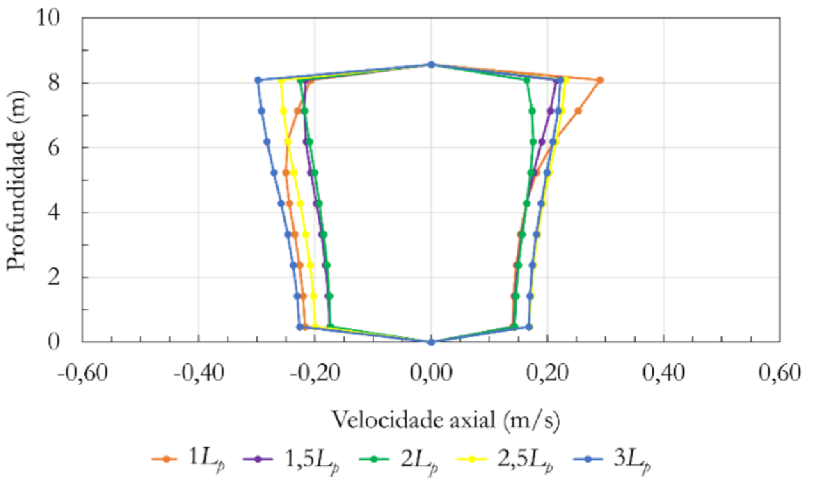


Figura A. 2: Perfis de velocidade axial máxima ao longo da profundidade para todos os casos sob ondas regulares representativas (1ªF).

Considerando a aplicação da PHS à função CEO, a Tabela A. 3 mostra a velocidade axial máxima monitorada no ponto com a abscissa localizada no centro da PHS e a coordenada vertical $z = 4{,}284$ m, ou seja, o ponto médio considerando a distância do fundo até a PHS. Deve-se observar que, como os comprimentos da PHS variaram, a coordenada horizontal (x) tem um valor específico em cada caso já apresentado na Tabela **5.1**. Na Tabela A. 3, a maior velocidade axial é encontrada para o caso $3L_p$, o que significa que, dentre as dimensões de PHS avaliadas, ele tem o maior potencial para converter a energia contida nas ondas do mar em eletricidade. O caso $3L_p$ tem a velocidade axial negativa máxima 5,41% maior que o caso $1L_p$; lembrando que o caso $1L_p$ tem as dimensões otimizadas para a PHS na função de CEO sob a incidência de ondas regulares a partir da teoria de Stokes de 2ª ordem, conforme estudo de Seibt *et al.* (2023). O pior caso encontrado é o $2L_p$, que tem um potencial de conversão 25,43% menor do que o melhor caso, o $3L_p$.

Tabela A. 3: Velocidade axial máxima na posição $z = 4{,}284$ m e instante de ocorrência para todos os casos sob ondas regulares representativas (1ªF).

Caso	Veloc. Axial Máxima (m/s)	Instante t de ocorrência (s)
$1L_p$	-0,244	272,05
$1{,}5L_p$	-0,197	265,68
$2L_p$	-0,192	290,74
$2{,}5L_p$	-0,225	227,52
$3L_p$	-0,258	316,6

A Figura A. 3 exibe as velocidades axiais para todos os casos ao longo do tempo, na sonda numérica localizada em $z = 4{,}284$ m. Qualitativamente, o efeito pulsante da velocidade abaixo da PHS é visível para todos os casos, conforme apresentado nos procedimentos de verificação e validação e nos estudos de referência de Orer e Ozdamar (2007) e Seibt *et al*. (2023). Ou seja, ora o escoamento está no sentido de propagação (valores positivos) ora no sentido contrário à propagação (valores negativos). É importante mencionar que a Figura A. 3 permite visualizar a recorrência das amplitudes apresentadas na Tabela A. 3. Essa recorrência dos valores próximos à velocidade axial máxima em ambos os sentidos confirma que os perfis apresentados na Figura A. 2 podem ser tratados como eficiência/potencial aplicação da PHS como CEO já que não são valores isolados ao longo do monitoramento da velocidade para ondas regulares. Em outras palavras, as velocidades demonstradas nos perfis máximos são “constantes” para a PHS sob ondas regulares, garantindo a uniformidade de energia disponível.

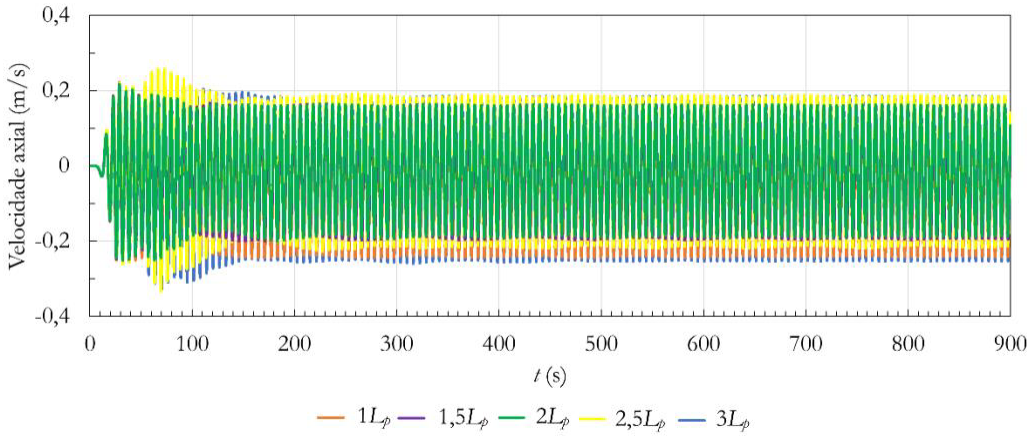


Figura A. 3: Velocidade axial em z = 4,284 m ao longo do tempo para todos os casos sob ondas regulares representativas (1ªF).

1ªF - PHS sob a incidência das ondas irregulares realísticas

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para as simulações numéricas da 1ªF do domínio computacional com a PHS para os cinco casos submetido a ondas irregulares realísticas do estado de mar. Devido ao comportamento aleatório das ondas irregulares, todo o intervalo da geração e propagação é considerado nas análises qualitativas e quantitativas, ou seja, os resultados apresentados aqui correspondem a série de 900 s.

Para a PHS atuando como QM, a Figura A. 4 (a) – (e) ilustra as ondas monitoradas pelas sondas numéricas posicionadas a 10 m a montante (sonda fixa em x = 93,2 m) da PHS e 10 m a jusante da PHS em cada caso. Qualitativamente, em todos os cinco casos, a elevação da superfície livre obtida a montante da PHS é maior do que aquela monitorada a jusante. Esse resultado é consistente com o princípio físico de um QM que é reduzir a altura das ondas à jusante.

Por sua vez, a Tabela A. 4 apresenta os resultados quantitativos do monitoramento da H_s das séries apresentadas na Figura A. 4 (a) – (e), bem como a porcentagem de redução da H_s após a propagação das ondas irregulares realísticas sobre o dispositivo. Como nos resultados anteriores, para a função de QM, o caso $3L_p$ é o que apresenta a maior redução de H_s, ou seja, demonstra a maior eficiência. Além disso, ao comparar os casos mais e menos eficientes, $3L_p$ e $1L_p$, respectivamente, há uma diferença no amortecimento da H_s de quase 8 vezes. A redução da H_s para essa análise comparativa entre monitoramentos é diretamente proporcional ao comprimento da PHS, ou seja, quanto mais longa a PHS, maior a redução.

Tabela A. 4: H_s calculada para as sondas a 10 m a montante e jusante da PHS para todos os casos sob ondas irregulares realísticas (1ªF).

Caso	10 m antes da PHS (x = 93,2 m)	10 m depois da PHS (x = variável)	ERP (redução da H_s)
$1L_p$	0,662 m	0,632 m	-4,52%
$1{,}5L_p$	0,683 m	0,619 m	-9,31%
$2L_p$	0,738 m	0,594 m	-19,47%
$2{,}5L_p$	0,783 m	0,560 m	-28,48%
$3L_p$	0,829 m	0,534 m	-35,59%

Como pode ser visto na Tabela A. 4, a redução da H_s no caso de $1L_p$ é insignificante para esta análise da PHS como QM sob ondas irregulares realísticas. Por outro lado, a redução da H_s na análise de ondas regulares apresentou resultados razoáveis (ver Tabela A. 1) para a 1ªF. Portanto, justifica-se a importância da avaliação dos efeitos das diferentes características do dispositivo PHS como um QM sob ondas irregulares realísticas do estado de mar.

Para a redução das ondas por um QM os parâmetros dimensionais da geometria como o comprimento da placa, a espessura e a proporção da profundidade da instalação, podem ser importantes, conforme apresentado na literatura considerando ondas regulares Wang e Shen (1999), Yu (2002), Aghili *et al.* (2014), Seibt *et al.* (2014a), Seibt *et al.* (2014b), Seibt *et al.* (2019), Seibt *et al.* (2023), e considerando também ondas irregulares, Zheng *et al.* (2023). Optou-se por iniciar a investigação da PHS submetida à um estado de mar realísticos variando o comprimento L_p, pois, em proporção às ondas regulares representativas incidentes, a placa no caso $1L_p$ era muito "curta" para o comprimento de onda ($1L_p$ = 3,457 m versus λ = 51,6 m). Esse fato indicou um primeiro caminho para entender a relevância da influência do L_p na eficiência da PHS como QM. Esta é, portanto, a justificativa para a criação de outros quatro casos para a análise da PHS tanto para ondas regulares quanto irregulares.

Assim como nos resultados da 1ªF para ondas regulares, uma segunda avaliação da PHS como QM é apresentada a seguir, com base em uma análise das elevações da superfície livre obtidas usando uma sonda fixada na posição a jusante em x = 128,63 m para todos os casos. Novamente esses valores são interpretados como as elevações da superfície livre das ondas que atingem a costa depois de propagar pela PHS. Portanto, a Tabela A. 5 apresenta as H_s obtidas pelo monitoramento das sondas fixas nas coordenadas horizontais x = 93,2 m e x = 128,63 m para cada caso.

O resultado para o caso de $1L_p$ revela baixa eficiência na aplicação do dispositivo como QM sob a incidência de ondas irregulares realísticas, como também observado na Tabela A. 4. Entretanto, há um aumento significativo na eficiência do dispositivo já para

o caso 1,5L_p. Além disso, ao comparar os casos com a maior e a menor eficiência, 3L_p e 1L_p, respectivamente, a diferença no amortecimento das ondas é 19,3 vezes maior.

Por fim, é importante observar que, ao considerar ondas irregulares realísticas, diferentemente das ondas regulares representativas, o maior amortecimento do H_s ocorre no caso de 3L_p, independentemente da posição da sonda a jusante. Enquanto, para ondas regulares, o caso 3L_p era mais eficiente na sonda 10 m a jusante e o caso 2,5L_p na sonda fixa.

Tabela A. 5: H_s considerando a sonda localizada a 10 m a montante da PHS e a sonda fixa em x = 128,63 m para todos os casos sob ondas irregulares realísticas (1ªF).

Caso	10 m antes da PHS (x = 93,2 m)	Sonda fixa (x = 128,63 m)	ERP (redução da H_s)
1L_p	0.662 m	0,649 m	-1,98%
1,5L_p	0,683 m	0,615 m	-9,89%
2L_p	0,738 m	0,583 m	-20,97%
2,5L_p	0,783 m	0,562 m	-28,19%
3L_p	0,829 m	0,511	-38,28%

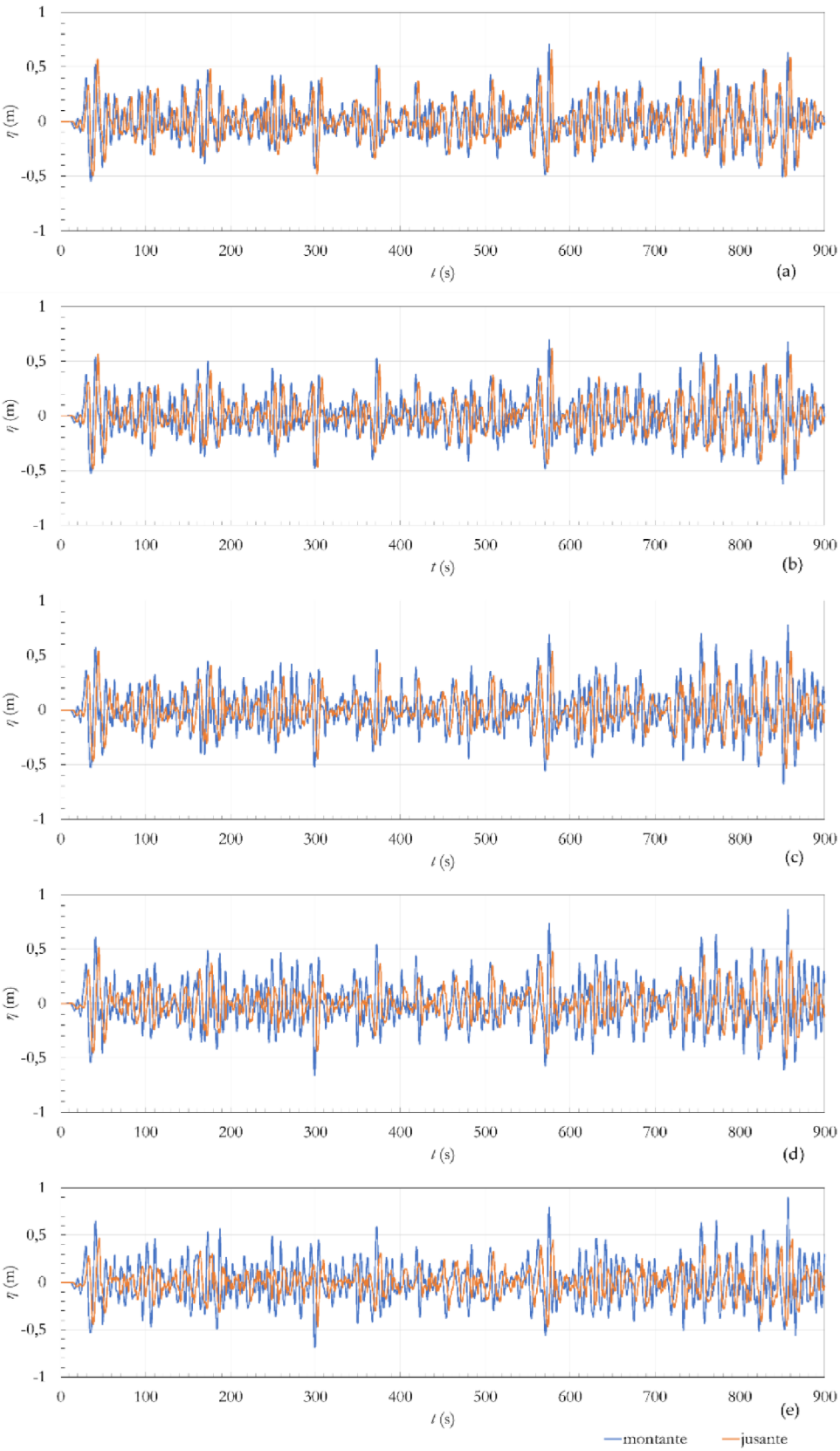


Figura A. 4: Análise da PHS como QM sob a incidência de ondas irregulares realísticas (1ªF): (a) $1L_p$; (b) $1{,}5L_p$; (c) $2L_p$; (d) $2{,}5L_p$; (e) $3L_p$.

Um fato interessante é que, na situação de ondas irregulares realísticas, para ambas as sondas a jusante da PHS, a eficiência foi inferior a 40% em todos os cinco casos (ver Tabela A. 4 e Tabela A. 5). Entretanto, para a PHS sob ondas regulares representativas somente o caso 1L_p p teve uma redução da H_s inferior a 40% para ambas as sondas a jusante (ver Tabela A. 1 e **Error! Reference source not found.**). Portanto, pode-se observar que há uma grande variação nos efeitos do comprimento da PHS como um QM para as diferentes abordagens das ondas incidentes. Esse resultado, que exige maiores investigações, mostra a lacuna entre os valores teóricos das ondas regulares e o que realmente acontece com as ondas irregulares no oceano e na costa.

Tanto no caso de ondas regulares quanto no de ondas irregulares realísticas, não foi possível delinear uma progressão padronizada na variação da eficiência de redução da H_s para o intervalo de casos estudados. Essa consideração levou a perguntas sobre a propagação da onda após a PHS.

Independente das ondas incidentes, para a 1ªF, os três casos com maior L_p tem as melhores eficiências da PHS como QM. Além de lógico, considerando os princípios físicos, surge uma observação em relação a variação dessa eficiência para cada tipo de onda incidente. Por exemplo, para ondas regulares a porcentagem de redução da H_s varia em até 3,7% entre estes três casos para o monitoramento 10 m a jusante e na sonda fixa. Já para as ondas irregulares, a menor variação entre os três casos é de 7,11%. Essa análise mostra que uma pequena variação no L_p da PHS conduz a uma grande variação na eficiência do dispositivo como QM sob ondas irregulares. Entretanto, é fundamental destacar que o intervalo de L_p do presente estudo é limitado e esboça a hidrodinâmica da PHS como QM sob ondas irregulares.

Finalmente, com relação a PHS como CEO sob a incidência de ondas irregulares realísticas, a Figura A. 5 apresenta os perfis de velocidade axial máxima obtidos abaixo da PHS ao longo da profundidade para cada um dos casos. Conforme mencionado, os valores máximos são negativos devido ao fato de que as velocidades mais altas ocorrem na direção oposta à propagação da onda. Esse padrão apresentado na literatura para ondas regulares (Orer e Ozdamar, 2007; Seibt *et al.*, 2019; He *et al.*, 2019) é repetido nestes resultados para a PHS sob ondas irregulares realísticas. O efeito pulsante do escoamento também ocorreu nestes cinco casos com as ondas irregulares. Isso pode ser visto na Tabela A. 6 que demonstra as velocidades axiais máximas nas direções positiva e negativa ao longo da profundidade, tal qual o princípio apresentado nas ondas regulares Figura A. 3. No entanto, esse escoamento pulsante é irregular, assim como as elevações da superfície livre.

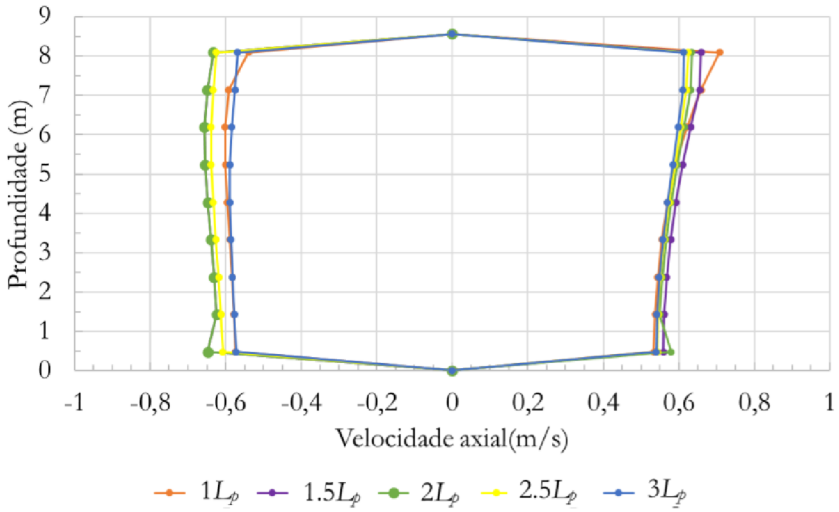


Figura A. 5: Perfis de velocidades axiais máximas ao longo da profundidade para todos os casos sob ondas irregulares realísticas (1ªF).

Para os cinco casos avaliados as velocidades axiais máximas em $z = 4{,}284$ m foram obtidas para o caso $2L_p$. Ao comparar as velocidades axiais máximas obtidas com $2L_p$ e $2{,}5L_p$ fica explícito que não houve diferenças consideráveis nas velocidades ao longo de todo o perfil; o mesmo ocorre ao comparar os casos com $1L_p$ e $3L_p$.

A Tabela A. 6 mostra a velocidade axial máxima calculada no ponto localizado no centro da PHS e em $z = 4{,}284$ m. A menor velocidade axial é encontrada para o caso $3L_p$, ou seja, entre as dimensões da PHS avaliadas, é a que tem o menor potencial para converter a energia contida nas ondas do mar em eletricidade. Já o caso com a maior velocidade axial máxima é o de $2L_p$. Comparando os casos de pior e melhor desempenho, pode-se notar que o caso de $2L_p$ tem um potencial de conversão aproximadamente 9% maior do que o caso de 3 L_p.

Tabela A. 6: Velocidade Axial Máxima na posição $z = 4{,}284$ m e instante de ocorrência para todos os casos sob ondas irregulares realísticas (1ªF).

Caso	Veloc. Axial Máxima (m/s)	Instante t de ocorrência (s)
$1L_p$	-0,595	852,38
$1{,}5L_p$	-0,636	852,64
$2L_p$	-0,647	852,95
$2{,}5L_p$	-0,633	853,32
$3L_p$	-0,588	853,65