

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE MATEMÁTICA E ESTATÍSTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATEMÁTICA APLICADA

**Análise Geométrica de um Dispositivo
Conversor de Energia das Ondas do tipo
Coluna de Água Oscilante Considerando um
Estado de Mar Encontrado em Tramandaí -
RS**

por

Ana Paula Giussani Mocellin

Dissertação submetida como requisito parcial
para a obtenção do grau de
Mestra em Matemática Aplicada

Profª. Dra. Bianca Neves Machado
Orientadora

Profª. Dra. Juliana Sartori Ziebell
Co-orientadora

Porto Alegre, fevereiro de 2024

CIP - CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Giussani Mocellin, Ana Paula

Análise Geométrica de um Dispositivo Conversor de Energia das Ondas do tipo Coluna de Água Oscilante Considerando um Estado de Mar Encontrado em Tramandaí - RS / Ana Paula Giussani Mocellin.—Porto Alegre: PPGMAp da UFRGS, 2024.

102 p.: il.

Dissertação (mestrado)— Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada, Porto Alegre, 2024.

Orientadora: Neves Machado, Bianca;
Co-orientadora: Sartori Ziebell, Juliana

Dissertação: Matemática Aplicada: Dinâmica de Fluidos, Dinâmica dos Fluidos Computacional, Design Construtal, Metodologia WaveMIMO, Coluna de Água Oscilante (CAO)

**Análise Geométrica de um Dispositivo Conversor de Energia
das Ondas do tipo Coluna de Água Oscilante Considerando
um Estado de Mar Encontrado em Tramandaí - RS**

por

Ana Paula Giussani Mocellin

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Matemática Aplicada do Instituto de Matemática e Estatística da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial
para a obtenção do grau de

Mestra em Matemática Aplicada

Linha de Pesquisa: Dinâmica de Fluidos

Orientadora: Profa. Dra. Bianca Neves Machado

Co-orientadora: Profa. Dra. Juliana Sartori Ziebell

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
Universidade Federal do Rio Grande

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Universidade Federal do Rio Grande

Prof. Dr. Leandro Farina
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dissertação apresentada e aprovada em
Dezembro de 2023.

Prof. Dr. Lucas da Silva Oliveira
Coordenador

*"A ciência é mais que um corpo de conhecimento, é uma
forma de pensar, uma forma cética de interrogar o
universo, com pleno conhecimento da falibilidade
humana."*

Carl Sagan

AGRADECIMENTOS

A minha família, que nunca deixou de acreditar em mim, mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao meu colega Ramiro, uma amizade que veio desde a graduação e se levou até hoje, sempre nos auxiliando um ao outro nos momentos mais complicados.

Ao meu colega Maycon, que além de minha dupla nessa jornada, encontrei um grande amigo.

As professoras, Dra. Bianca Neves Machado e Dra. Juliana Sartori Zibell, pelas orientações, parcerias e ensinamentos durante esse período.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Matemática Aplicada da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por todo o aprendizado, além de todos colegas, que tive o prazer de conhecer e fazer grandes amizades ao longo desse período.

A Rhuany, secretária do programa, a qual estava sempre disposta a ajudar em qualquer for o momento.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) - Edital 07/2021 - Programa Pesquisador Gaúcho - PqG (Processo: 21/2551-0002231-0).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	xiii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Estado da Arte	5
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivos Específicos	14
2 TEORIA DE ONDAS	15
2.1 Ondas Regulares	15
2.1.1 Equações Governantes	19
2.1.2 Teoria Linear de Ondas	21
2.1.3 Teoria de Stokes de 2ª Ordem	23
2.2 Ondas Irregulares	25
2.2.1 Metodologia WaveMIMO	25
3 TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO E TEORIA CONSTRUTAL	28
3.1 Tecnologias de Conversão	28

3.2	Teoria Construtal	32
3.2.1	Design Construtal aplicado a um dispositivo CAO	34
4	MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA	39
4.1	Método dos Volumes Finitos (MVF)	39
4.2	<i>Volume of Fluid</i> (VoF)	43
4.3	Procedimentos Numéricos	52
4.4	Descrição dos Casos	53
4.4.1	Análise da Influência da Batimetria na Geração e na Propagação de Ondas Regulares Representativas e Irregulares Realísticas	56
4.4.2	Otimização Geométrica do CAO Submetido às Ondas Regulares Representativas e às Ondas Irregulares Realísticas	59
4.5	Monitoramento e Análise dos Resultados	63
5	RESULTADOS	66
5.1	Análise da Influência da Batimetria na Geração e na Propagação de Ondas Regulares Representativas	66
5.2	Análise da Influência da Batimetria na Geração e na Propagação das Ondas Irregulares Realísticas	72
5.3	Estudo de Otimização Geométrica do CAO Submetido às Ondas Regulares Representativas	76
5.4	Estudo de Otimização Geométrica do CAO Submetido às Ondas Irregulares Realísticas	81
6	CONCLUSÃO	89

6.1 Estudos Futuros	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

LISTA DE FIGURAS

1.1	Participação das fontes renováveis de energia na OIE entre os anos de 2000 e 2022 (adaptado de EPE [25]).	2
1.2	Matriz energética brasileira no ano de 2022 [25].	2
1.3	Ilustração do domínio computacional estudado por De Lima et al. [22].	6
1.4	Ilustração do CAO estudado por De Lima et al. [21].	7
1.5	Ilustração do domínio computacional estudado por Letzow et al. [44].	8
1.6	Ilustração do domínio computacional estudado por Oliveira et al. [60].	9
1.7	Ilustração do princípio de funcionamento do CAO estudado por De Lima et al. [20].	10
1.8	Ilustração do domínio utilizado por De Deus et al. [18].	11
1.9	Ilustração das formas geométricas do CAO utilizadas por Gomes et al. [32].	12
2.1	Características de uma onda regular.	17
2.2	Formato das ondas de cada teoria (adaptado de Carneiro [10]).	18
2.3	Aplicabilidade da teoria de ondas (adaptado de Chakrabarti [13]). . .	19
2.4	Exemplo de histograma bivariado que relaciona H_s e T_m [57].	26
2.5	Etapas da metodologia WaveMIMO (adaptado de Machado et al. [48]).	27
3.1	Princípio físico de funcionamento do CAO.	29

3.2	Dispositivos CAO [27, 63]: (a) Islay, Escócia; (b) Porto Quebra-mar Mutriku, Espanha; (c) Porto de Sakata, Japão e (d) Yongsoo, Coréia.	30
3.3	Dispositivo instalado na Ilha do Pico [27].	31
3.4	Ilustração da seção transversal do dispositivo CAO instalado na Ilha do Pico [57].	32
3.5	Exemplos de aplicação da Lei Construtal [5]: (a) rios; (b) pulmões e (c) animais.	33
3.6	Etapas da aplicação do método Design Construtal (adaptado de De Lima [19] e Barros [3]).	34
3.7	Ilustração do dispositivo CAO com as variáveis utilizadas.	35
4.1	Função do método numérico (adaptado de Maliska [53]).	40
4.2	Balanco de massa no volume elementar (adaptado de Maliska [53]).	42
4.3	Fluxo de massa no elemento de fluido (adaptado de Versteeg e Malalasekera [70]).	45
4.4	Componentes de tensão no elemento de fluido (adaptado de Versteeg e Malalasekera [70]).	48
4.5	Forças de pressão e componentes de tensão na direção x (adaptado de Versteeg e Malalasekera [70]).	49
4.6	Ilustração do local de estudo.	54
4.7	Histograma bivariado de H_s e T_m	55
4.8	Domínios computacionais para a análise da influência da batimetria.	57
4.9	Ilustração da subdivisão dos segmentos.	58

4.10	Ilustração da malha <i>stretched</i> considerando o canal de ondas sem batimetria (adaptado de Gomes et al. [30]).	59
4.11	Domínio computacional: (a) para ondas regulares representativas e (b) para ondas irregulares realísticas.	60
4.12	Ilustração da variação que a geometria do CAO sofre ao longo do processo de avaliação geométrica.	62
4.13	Ilustração da discretização do domínio no dispositivo CAO considerando o caso $H_1/L = 0,1985$	62
4.14	Ilustração da sonda horizontal para monitoramento no dispositivo CAO.	64
5.1	Elevação da superfície livre monitorada pela sonda posicionada em $x = 41,82$ m em: (a) $t \leq 900$ s e (b) $100 \text{ s} \leq t \leq 200$ s.	69
5.2	Elevação da superfície livre monitorada pela sonda posicionada em $x = 71,09$ m em: (a) $t \leq 900$ s e (b) $100 \text{ s} \leq t \leq 200$ s.	70
5.3	Elevação da superfície livre monitorada pela sonda posicionada em $x = 71,09$ m em: (a) $t \leq 900$ s e (b) $100 \text{ s} \leq t \leq 200$ s.	74
5.4	Elevação da superfície livre monitorada pela sonda posicionada em $x = 0$ m em: (a) $t \leq 900$ s e (b) $100 \text{ s} \leq t \leq 200$ s.	75
5.5	$P_{H(\text{RMS})}$ encontrada para o dispositivo CAO quando variado o grau de liberdade H_1/L e submetido às ondas regulares representativas.	77
5.6	Resultados encontrados para: (a) $p_{(\text{RMS})}$ e (b) $\dot{m}_{(\text{RMS})}$ quando variado o grau de liberdade H_1/L e o CAO é submetido às ondas regulares representativas.	78

5.7	Topologia das fases quando o CAO é submetido às ondas regulares representativas para o caso ótimo, $(H_1/L)_o = 0,4297$, considerando: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 300$ s, (c) $t = 600$ s e (d) $t = 900$ s.	79
5.8	Topologia das fases quando o CAO é submetido às ondas regulares representativas para o pior caso, $H_1/L = 0,1985$, considerando: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 300$ s, (c) $t = 600$ s e (d) $t = 900$ s.	80
5.9	$P_{H(RMS)}$ encontrada para o dispositivo CAO quando variado o grau de liberdade H_1/L e submetido às ondas irregulares realísticas.	82
5.10	Resultados encontrados para: (a) $p_{(RMS)}$ e (b) $\dot{m}_{(RMS)}$ quando variado o grau de liberdade H_1/L e o CAO é submetido às ondas irregulares realísticas.	83
5.11	Topologia das fases quando o CAO é submetido às ondas irregulares realísticas para o caso ótimo, $(H_1/L)_o = 0,1985$, considerando: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 300$ s, (c) $t = 600$ s e (d) $t = 900$ s.	84
5.12	Topologia das fases quando o CAO é submetido às ondas irregulares realísticas para o pior caso, $H_1/L = 2,2789$, considerando: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 300$ s, (c) $t = 600$ s e (d) $t = 900$ s.	85
5.13	Comparação das $P_{H(RMS)}$ encontradas pelo CAO neste estudo quando o grau de liberdade H_1/L é variado e o dispositivo submetido às ondas irregulares realísticas com as $P_{H(RMS)}$ encontradas por Maciel [49].	87

LISTA DE TABELAS

4.1	Características das ondas regulares representativas.	55
4.2	Configurações das geometrias avaliadas.	61
5.1	Resultados das simulações do estudo de influência da batimetria comparados à equação da elevação da superfície livre (Eq. 2.26).	67
5.2	Resultados MAE e RMSE considerando os casos de batimetria submetidos a ondas regulares representativas onde o caso com batimetria é tomado como referência.	71
5.3	Resultados MAE e RMSE considerando os casos de batimetria submetidos a ondas irregulares realísticas onde o caso com batimetria é tomado como referência.	73

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

2D	Bidimensional
CAO	Coluna de Água Oscilante
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
EDP	Equação Diferencial Parcial
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
JONSWAP	<i>JOint North Sea WAve Project</i>
MAE	<i>Mean Absolut Error</i>
MVF	Método dos Volumes Finitos
NMA	Nível Médio da Água
OIE	Oferta Interna de Energia
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
PRESTO	<i>Pressure Staggering Option</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RS	Rio Grande do Sul
TOMAWAC	<i>Telemac-based Operational Model Addressing Wave Action Compu- tation</i>

VoF *Volume of Fluid*

Lista de Símbolos

α	Fração volumétrica (-)
$\alpha_{\acute{a}gua}$	Fração volumétrica da água (-)
α_{ar}	Fração volumétrica do ar (-)
Δt	Passo de tempo (s)
Δx	Varição da dimensão do volume de controle na direção x (m)
Δz	Varição da dimensão do volume de controle na direção z (m)
\dot{m}	Vazão mássica (kg/s)
\dot{k}_x	Derivada temporal da componente x do número de onda (-)
\dot{k}_z	Derivada temporal da componente z do número de onda (-)
\dot{x}	Derivada temporal na direção horizontal (-)
\dot{z}	Derivada temporal na direção vertical (-)
ϵ	Constante arbitrária (-)
η	Elevação da superfície livre (m)
γ	Viscosidade que relaciona as tensões com a deformação volumétrica (kg/m·s)
λ	Comprimento da onda (m)
μ	Viscosidade dinâmica (kg/m·s)
$\mu_{\acute{a}gua}$	Viscosidade dinâmica da água (kg/m·s)

μ_{ar}	Viscosidade dinâmica do ar (kg/m·s)
ϕ	Potencial de velocidade (-)
Φ_i	Quantidade de água em cada volume (m)
ρ	Massa específica (kg/m ³)
$\rho_{\acute{a}gua}$	Massa específica da água (kg/m ³)
ρ_{ar}	Massa específica do ar (kg/m ³)
σ	Frequência angular (Hz)
τ	Tensão viscosa (N/m ²)
\vec{V}	Vetor de velocidades (-)
\vec{v}	Vetor velocidade na direção vertical (-)
A	Amplitude (m)
A_{duto}	Área do duto da turbina (m ²)
A_i	Área de cada volume (-)
C	Celeridade (m/s)
C_1	Coefficiente de amortecimento linear (s ⁻¹)
C_2	Coefficiente de amortecimento quadrático (m ⁻¹)
D	Domínio genérico (-)
e	Espessura do canal de ondas antes e após o dispositivo (m)
f	Frequência (Hz)
g	Força da gravidade (m/s ²)

H	Altura da onda (m)
h	Profundidade (m)
H_1	Altura da câmara hidropneumática (m)
h_1	Profundidade da lateral direita do canal com batimetria (m)
H_2	Altura do duto da turbina (m)
H_3	Profundidade de submersão (m)
H_s	Altura significativa (m)
H_t	Altura do canal de ondas (m)
j	j -ésima maior onda registrada (-)
k	Número de onda (m^{-1})
k_x	Componente x do vetor número de onda (m^{-1})
k_z	Componente z do vetor número de onda (m^{-1})
L	Comprimento da câmara hidropneumática (m)
l	Comprimento do duto da turbina (m)
L_t	Comprimento do canal de ondas (m)
M	Número de ondas registadas (-)
N	Numero total de dados (-)
N_e	Espectro direcional de densidade da ação da onda ($\text{m}^2/\text{Hz}/\text{rad}$)
O_i	Valor encontrado numericamente (-)
P	Ponto central do volume de controle (-)

p	Pressão estática (N/m ²)
P_H	Potência hidropneumática (W)
P_i	Valor de referência (-)
Q	Termo fonte da equação que representa a situação geral da propagação de ondas em um meio instável e não homogêneo (m ² /rad)
R_1	Região vertical do domínio computacional que contém apenas ar (-)
R_2	Região vertical do domínio computacional que contém a interface entre o ar e a água (-)
R_3	Região vertical do domínio computacional que contém apenas água (-)
R_4	Região horizontal do domínio computacional
S	Termo sumidouro referente a praia numérica (-)
s	Sonda horizontal (-)
S_M	Termo fonte da equação de conservação da quantidade de movimento (-)
S_{Mx}	Termo fonte da equação de conservação da quantidade de movimento na direção x (-)
S_{Mz}	Termo fonte da equação de conservação da quantidade de movimento na direção z (-)
T	Período (s)
t	Tempo (s)
T_m	Período médio (s)
u	Velocidade na direção horizontal x (m/s)

U_r	Número de Ursell (-)
V	Módulo da velocidade do fluido no ponto analisado (m/s)
v_{ar}	Velocidade do ar no duto (m/s)
V_{ch}	Volume da câmara hidropneumática (m ³)
V_t	Volume total do CAO (m ³)
W	Variável referente a terceira dimensão (-)
w	Velocidade na direção vertical z (m/s)
X	Grandeza a ser calculada (-)
x	Coordenada horizontal (-)
x_e	Posição do fim da praia numérica (m)
x_s	Posição do início da praia numérica (m)
z	Coordenada vertical (-)
z_b	Posição vertical do fundo do canal de ondas (m)
z_{fs}	Posição vertical da superfície livre do canal de ondas (m)

RESUMO

Dada a crescente demanda energética global, se faz necessário o estudo acerca de fontes renováveis de energia, dentre elas, destaca-se a energia contida nas ondas do mar, cuja extração é realizada através de dispositivos conversores. A presente dissertação tem como objetivo otimizar a geometria da câmara hidropneumática de um dispositivo conversor da energia contida nas ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), quando submetido às ondas regulares representativas e quando submetido às ondas irregulares realísticas do estado de mar que ocorreu em Tramandaí, município do estado do Rio Grande do Sul (RS). O CAO é definido como uma estrutura, parcialmente submersa, aberta ao mar abaixo da superfície livre da água e conectado a um duto aberto para a atmosfera. O software de dinâmica dos fluidos computacional, FLUENT, foi utilizado para a simulação numérica do CAO acoplado à um canal de ondas bidimensional. A metodologia WaveMIMO foi utilizada para a geração das ondas irregulares realísticas. O Design Construtal, associado à Busca Exaustiva, foi empregado na otimização geométrica da câmara hidropneumática do CAO. O grau de liberdade H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática do CAO) foi variado com o objetivo de maximizar a potência hidropneumática disponível. Os resultados mostraram que a geometria que otimiza o CAO, ou seja, aquela que maximiza a potência hidropneumática disponível quando o dispositivo é submetido às ondas regulares representativas é $(H_1/L)_o = 0,4297$, onde se obteve 53,15 W. Enquanto, quando o dispositivo é submetido às ondas irregulares realísticas, a geometria ótima é $(H_1/L)_o = 0,1985$ e obteve-se uma potência de 25,44 W. Deste modo, observou-se que as ondas regulares representativas superestimam a potência obtida pelo CAO.

Palavras-chave: Dinâmica dos Fluidos Computacional; Design Construtal; Metodologia WaveMIMO; Coluna de Água Oscilante (CAO).

ABSTRACT

Given the growing global energy demand, it is necessary to study renewable energy sources, among which the energy contained in sea waves stands out, which is extracted through converter devices. The present dissertation aims to optimize the geometry of the hydropneumatic chamber of a device that converts the energy contained in sea waves into electrical energy of the Oscillating Water Column (OWC) type, when subjected to representative regular waves and when subjected to realistic irregular waves of the sea state that occurred in Tramandaí, a municipality in the state of Rio Grande do Sul (RS). The OWC is defined as a structure, partially submerged, open to the sea below the free surface of the water and connected to a duct open to the atmosphere. The computational fluid dynamics software, FLUENT, was used for numerical simulation of the OWC coupled to a two-dimensional wave channel. The WaveMIMO methodology was used to generate realistic irregular waves. Constructal Design, associated with Exhaustive Search, was used in the geometric optimization of the OWC hydropneumatic chamber. The degree of freedom H_1/L (ratio between the height and length of the OWC hydropneumatic chamber) was varied aiming to maximize the available hydropneumatic power. The results showed that the geometry that optimizes the OWC, i.e., the one that maximizes the hydropneumatic power available when the device is subjected to representative regular waves, is $(H_1/L)_o = 0.4297$, where 53.15 W was obtained. While, when the device is subjected to realistic irregular waves, the optimal geometry is $(H_1/L)_o = 0.1985$ and a power of 25.44 W was obtained. Thus, it was observed that the representative regular waves overestimate the power obtained by the OWC.

Keywords: Computational Fluid Dynamics; Constructal Design; WaveMIMO Methodology; OWC Device.

1 INTRODUÇÃO

Conforme o crescimento tecnológico e científico da sociedade se amplia, há um aumento da demanda energética global que contribui para o desenvolvimento socioeconômico e para a melhoria na qualidade de vida da população [59]. Segundo o IPCC [42], a partir de 1850 os combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás, dominaram a oferta energética. Com isso, ocorreu um aumento expressivo das emissões de gases causadores do efeito estufa. Nesse sentido, o uso das fontes não renováveis de energia é parcialmente responsável pela emissão desses gases.

Com a última virada do século, devido à ampliação dos investimentos no mercado de fontes renováveis de energia, aos avanços tecnológicos e às maiores taxas de desenvolvimento dos países, o setor energético teve uma grande mudança [71]. Como consequência, o desenvolvimento acelerado das fontes não convencionais de energia e os avanços tecnológicos na exploração de todas as formas de energia. Fato este, que tem auxiliado na redução dos preços e na desvinculação dos conceitos de crescimento econômico de emissão de gases causadores do efeito estufa. Portanto, diversos países tem investido na diversificação da matriz energética [59, 71].

Segundo o Relatório Síntese 2023 [25], no Brasil, em 2022, a Oferta Interna de Energia (OIE), que representa o total da energia disponibilizada no país, teve um decréscimo de 0,03% comparado ao ano de 2021. Ainda, com relação à matriz energética brasileira, o mesmo relatório apresenta que a atuação das fontes renováveis de energia foi marcada pelo aumento da oferta de energia hidráulica, correlacionada com o regime hídrico favorável.

Ainda, conforme pode-se observar na Figura 1.1, o Brasil se destaca quanto à utilização de fontes renováveis de energia, 2009, 2020 e 2022 foram os anos com maior utilização de fontes renováveis na OIE. Com relação ao ano de 2021, 44,7% da matriz energética brasileira foi composta por fontes renováveis de energia,

enquanto, para o ano de 2022, este valor foi de 47,4%. Na Fig. 1.2 é apresentada a composição da matriz energética brasileira tendo como base o ano de 2022.

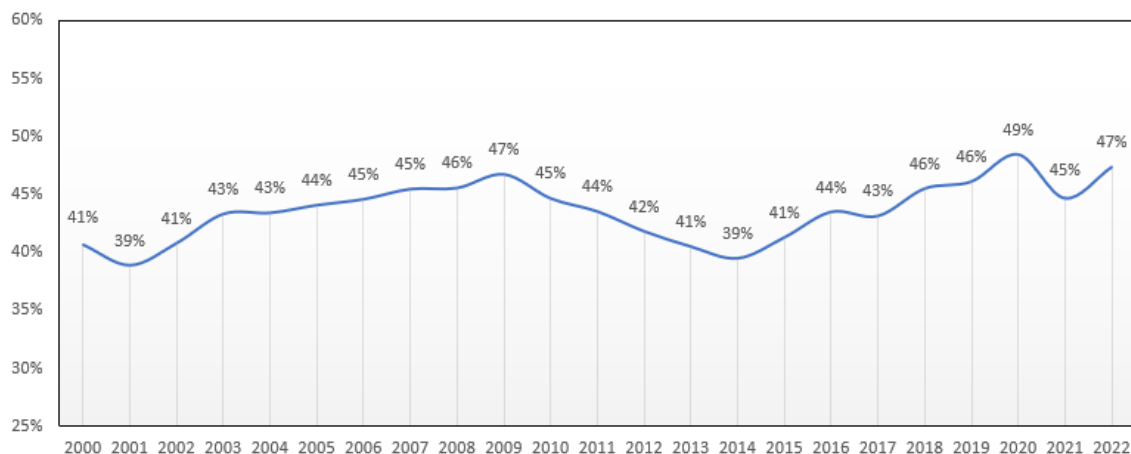


Figura 1.1: Participação das fontes renováveis de energia na OIE entre os anos de 2000 e 2022 (adaptado de EPE [25]).

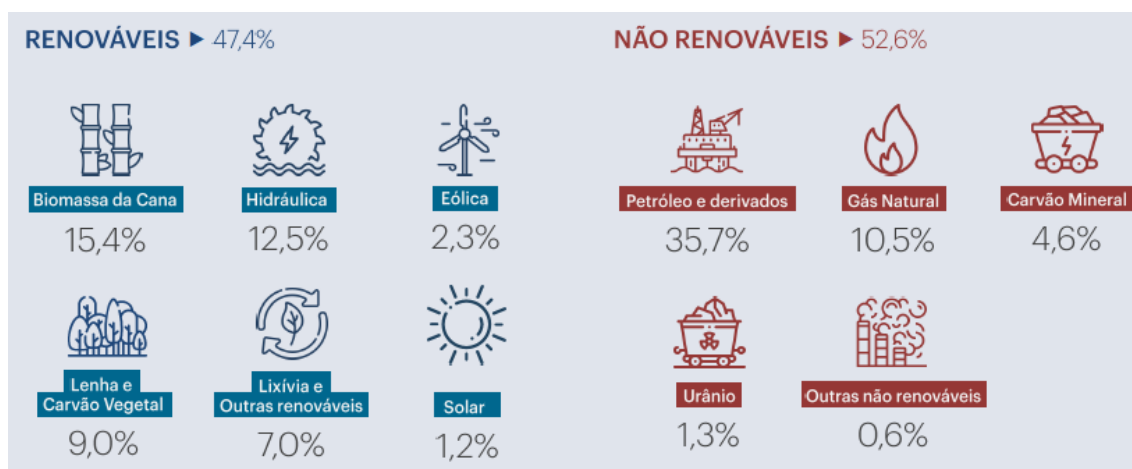


Figura 1.2: Matriz energética brasileira no ano de 2022 [25].

Com o objetivo de diversificar a matriz energética brasileira, no que tange a utilização de fontes renováveis de energia, destaca-se a energia proveniente dos oceanos. De acordo com Tolmasquim [69], o oceano pode ser considerado um grande reservatório de energia térmica e mecânica. Contudo, em razão da baixa qualidade do calor no ambiente marinho, alta entropia e dos avanços tecnológicos

atuais, somente a energia mecânica pode ser aproveitada com maior eficácia. De acordo com Cisco et al. [14], a energia oceânica pode ser subdividida em função da sua origem em: marés, ondas, correntes marinhas, gradientes de temperatura e salinidade.

A energia oriunda das ondas, escopo do presente trabalho, é uma forma concentrada de energia solar: o sol produz diferenças de temperatura, causando ventos que sopram sobre a superfície do oceano. As ondas geradas são capazes de viajar milhares de quilômetros sem praticamente nenhuma perda de energia [16]. Segundo Tolmasquim [69], no sul do Brasil, o potencial energético teórico obtido pelas ondas oceânicas é de 35 GW, que é superior ao potencial encontrado nas demais regiões do país.

A conversão da energia contida nas ondas do mar em energia elétrica é realizada através de dispositivos, como o Coluna de Água Oscilante (CAO), constituído, basicamente, por uma estrutura oca de concreto parcialmente submersa. De acordo com Falcão e Henriques [27], o dispositivo CAO é composto por uma câmara hidropneumática e um duto, onde a turbina e o gerador elétrico são acoplados. A câmara é aberta abaixo da superfície livre da água e o duto aberto para atmosfera, assim, a incidência das ondas sobre o dispositivo faz com que a coluna de água no interior da câmara oscile e gere uma pressão local, expulsando ou succionando o ar no interior do duto. Conseqüentemente, esse escoamento de ar incide na turbina acionando o gerador elétrico.

Devida à necessidade de exploração de diversas fontes renováveis de energia e, considerando o potencial energético da costa brasileira, o conhecimento quanto à conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica é fundamental para que essa fonte renovável de energia possa ser utilizada de forma plena e sustentável [33]. Uma das formas de desenvolver este conhecimento é através da modelagem computacional, a qual emprega a simulação numérica para a solução de problemas

científicos, analisando os fenômenos, desenvolvendo modelos matemáticos para sua descrição e elaborando códigos computacionais para obtenção destas soluções [47].

Com o objetivo de maximizar a conversão da energia, diversos estudos numéricos têm utilizado o método Design Construtal para a avaliação de geometrias em sistemas de fluxo/escoamento, mais precisamente, na otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica [38, 37, 55, 66, 4]. O Design Construtal, segundo Bejan [5], permite que a geometria do dispositivo seja submetida a restrições globais e variada de acordo com os graus de liberdade. Para aplicá-lo, é necessário determinar o indicador de performance, os graus de liberdade e as restrições geométricas. No presente estudo as restrições geométricas são: o volume da câmara hidropneumática do CAO e o volume total do dispositivo CAO, onde ambos foram mantidos constantes; o grau de liberdade avaliado é a razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática, H_1/L ; e o indicador de performance avaliado é a potência disponível no CAO.

Com base no exposto, o presente estudo tem como objetivo otimizar, através do Design Construtal associado à Busca Exaustiva, a geometria da câmara hidropneumática de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO quando submetido às ondas regulares representativas e às ondas irregulares realísticas, que representam um estado de mar ocorrido no município de Tramandaí, estado do Rio Grande do Sul (RS), no dia 28 de maio de 2018 das 10 h e 14 min às 10 h e 29 min. Destaca-se que, para a geração das ondas irregulares realísticas a metodologia WaveMIMO [48] foi utilizada, enquanto a geração das ondas regulares representativas ocorreu através da Teoria de Ondas de 2^a ordem, assim como em Gomes et al. [31], De Lima et al. [22], entre outros. Destaca-se, ainda, que todos os estudos numéricos foram modelados bidimensionalmente (2D).

1.1 Estado da Arte

Nesta subseção são apresentados estudos numéricos que utilizam o Design Construtal, associado à Busca Exaustiva, na otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO. Para isso, esta seção foi subdividida em duas partes: na primeira, serão apresentados estudos nos quais o dispositivo CAO é submetido às ondas regulares; e, na segunda, estudos onde o dispositivo CAO é submetido às ondas irregulares.

Gomes et al. [31] realizaram um estudo de um modelo numérico 2D, onde o dispositivo CAO foi submetido às ondas regulares em escala de laboratório. O grau de liberdade avaliado foi a razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática. O objetivo do estudo foi otimizar a geometria do CAO tendo em vista a maximização da potência. Com relação aos resultados, a geometria que maximiza a potência possui razão 0,84, enquanto, o pior caso foi encontrado para razão 0,14. Além disso, os autores concluíram que o caso ótimo apresenta uma eficiência 10 vezes superior a encontrada no pior caso.

Lorenzini et al. [46] avaliaram um dispositivo CAO em escala real. O objetivo do estudo é a maximização da potência e, para isso, no que tange o Design Construtal, foram avaliados os seguintes graus de liberdade: a relação entre altura e o comprimento da câmara hidropneumática; a relação entre a altura e o comprimento do duto; e, por fim, a submersão do dispositivo. Quanto aos resultados, o caso ótimo ocorreu quando a razão entre a altura e o comprimento da câmara do dispositivo é 0,135, a razão entre altura e comprimento do duto é 6,0 e a submersão do dispositivo é de 9,5 m. Neste caso, foi encontrada uma potência de aproximadamente 190 W. Enquanto, para o pior caso, encontrou-se 11 W.

De Lima et al. [22] realizaram estudo numérico 2D acerca de uma região de transição, que possui geometria trapezoidal e fica localizada entre a câmara

hidropneumática e o duto (vide Fig. 1.3) do dispositivo CAO. O objetivo do estudo é maximizar a potência hidropneumática do CAO. O ângulo de inclinação da parede entre a câmara hidropneumática e o duto, a razão entre a altura e o comprimento do duto e a profundidade de submersão, foram os graus de liberdade avaliados. A maior potência, cerca de 587,31 W, foi encontrada para a geometria ótima do CAO, que apresentou as seguintes características: ângulo de inclinação de 5° , razão entre altura e comprimento do duto igual a 3,0 e submersão de 9,75 m. Enquanto, a menor potência encontrada foi de aproximadamente 46,14 W, o que configura uma diferença de 92,14% entre o caso ótimo e o pior caso analisado, que possui: 45° de inclinação; 2,5 de razão entre altura e comprimento do duto e 10,25 m de submersão.

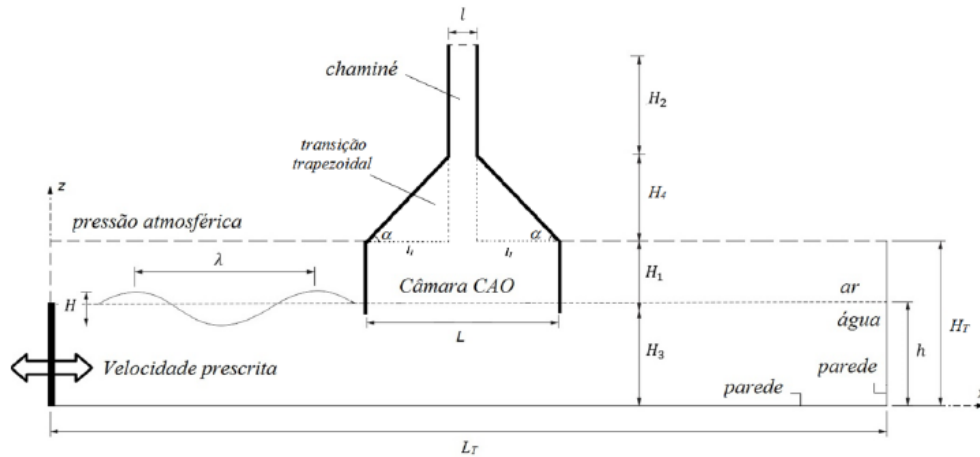


Figura 1.3: Ilustração do domínio computacional estudado por De Lima et al. [22].

Gomes et al. [35] realizaram um estudo numérico 2D, cujo objetivo foi a maximização da potência hidrodinâmica obtida pelo CAO quando submetido à incidência de ondas regulares em escala real com distintos períodos. As restrições do problema foram o volume da câmara hidropneumática e o volume total do dispositivo. Enquanto, os graus de liberdade foram a relação entre altura e o comprimento da câmara hidropneumática e a submersão do dispositivo. Os resultados mostraram que a melhor configuração geométrica para a câmara do dispositivo, ou seja, aquela que maximiza a potência, é obtida quando a razão entre altura e o comprimento

da câmara hidropneumática é quatro vezes maior do que a razão entre altura e comprimento da onda incidente.

De Lima et al. [21] realizaram um estudo 2D do dispositivo CAO contendo duas câmaras hidropneumáticas (vide Fig. 1.4) e submetido à incidência de ondas regulares em escala real. O objetivo do estudo foi a maximização da potência hidropneumática. Com relação aos graus de liberdade, foram otimizadas: a razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática do primeiro CAO; a razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática do segundo CAO; a altura da coluna que divide os dispositivos; e a espessura da coluna que divide os dispositivos. A máxima potência hidropneumática, 5715,2 W, foi encontrada para o caso onde a razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática do primeiro e do segundo CAO são iguais a 0,2613, além disso, os melhores resultados foram encontrados para o caso onde a espessura da coluna que divide os dispositivos é 2,22 m.

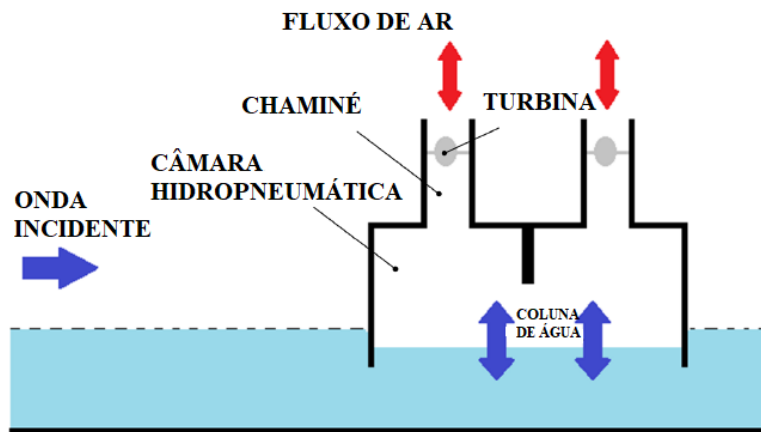


Figura 1.4: Ilustração do CAO estudado por De Lima et al. [21].

caso analisado foi o de razão 0,2, onde foram obtidos 130,43 W de potência, ou seja, uma diferença de 94% na potência obtida pelo melhor e o pior caso. Além disso, concluiu-se que a potência hidropneumática disponível pelo CAO é inversamente proporcional ao grau de liberdade avaliado.

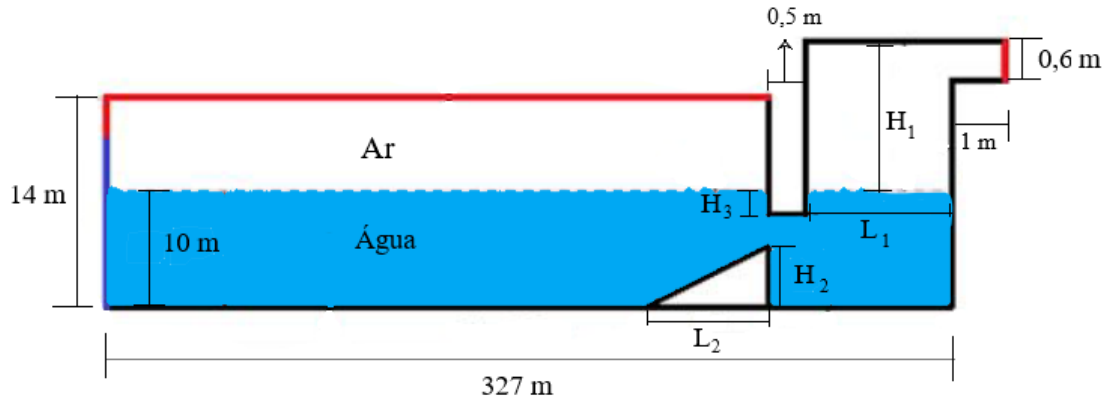


Figura 1.6: Ilustração do domínio computacional estudado por Oliveira et al. [60].

De Lima et al. [20] realizaram um estudo numérico 2D de dispositivos CAO que variam de uma à cinco câmaras acopladas, conforme ilustrado na Fig. 1.7. O objetivo do estudo foi analisar a influência da geometria e do número de câmaras acopladas sobre a potência hidropneumática máxima disponível. O grau de liberdade analisado foi a razão entre a altura e o comprimento de cada câmara hidropneumática. Os resultados mostraram que o dispositivo com cinco câmaras acopladas converte mais energia do que os demais conjuntos avaliados. Além disso, concluiu-se que, à medida que o grau de liberdade é ampliado, a potência hidropneumática reduz, ou seja, são inversamente proporcionais.

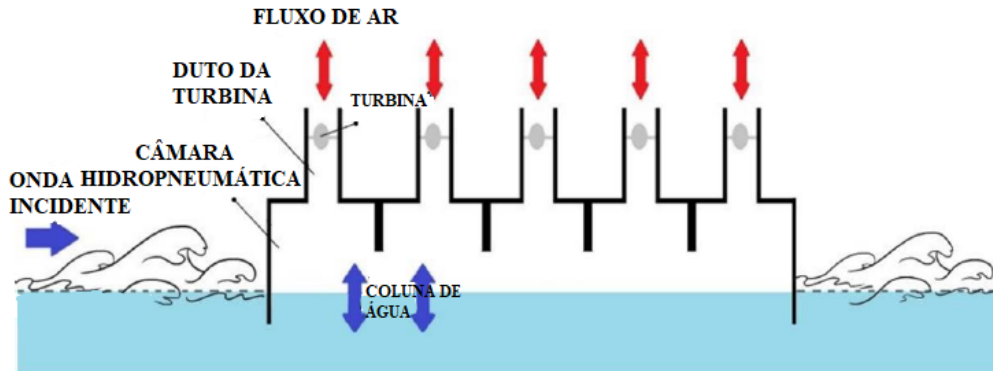


Figura 1.7: Ilustração do princípio de funcionamento do CAO estudado por De Lima et al. [20].

Na sequência são apresentados estudos numéricos onde o dispositivo CAO é submetido às ondas irregulares:

Gomes et al. [36] avaliaram um dispositivo CAO submetido à um espectro de onda JONSWAP, onde o objetivo foi avaliar a influência da câmara hidropneumática, que possui formato retangular, sobre a potência hidropneumática disponível. O grau de liberdade avaliado foi a razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática. As restrições do problema foram a área de entrada e a área total da câmara do conversor, que foram mantidas constantes. Os resultados indicaram recomendações teóricas sobre a configuração geométrica que maximiza a conversão de energia de um CAO submetido à ondas irregulares modeladas através de um espectro de onda. A potência hidropneumática máxima foi encontrada para o caso onde a razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática é igual a 0,02, onde obteve-se aproximadamente 11.000 W.

Gomes et al. [34] avaliaram um conversor CAO, submetido às ondas irregulares obtidas através de um espectro de ondas do tipo Pierson-Moskowitz. O objetivo do estudo foi a maximização da potência encontrada pelo conversor. A razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática foi o grau de liberdade avaliado, enquanto, a razão entre a altura e o comprimento do duto

e a submersão do dispositivo foram mantidas fixas. Os resultados mostraram que a geometria ótima do CAO apresenta o grau de liberdade igual a 0,2152 e gerou uma potência média de aproximadamente 18.000 W. Enquanto, a pior configuração geométrica foi encontrada para razão 0,2193 e gerou uma potência inferior a 1.000 W.

De Deus et al. [18] avaliaram um dispositivo CAO em formato de duplo trapézio, conforme ilustrado na Fig. 1.8. O objetivo do estudo foi a maximização da potência hidropneumática disponível quando o dispositivo é submetido à um espectro de ondas do tipo Pierson-Moskowitz formado por 15 componentes de onda. Destaca-se, ainda, que esse espectro foi representado por uma função de distribuição de energia que depende da altura significativa da onda e da frequência angular de pico. O grau de liberdade analisado foi a razão entre a altura e o comprimento da entrada da câmara do CAO, enquanto foram mantidas constantes a área da entrada e a área total do dispositivo. O espectro de ondas foi analisado considerando três cenários: frequência mínima, frequência de pico e frequência máxima. Os resultados indicaram que a configuração geométrica do CAO (grau de liberdade igual a 0,0175) que gerou a maior potência hidropneumática (aproximadamente 45 W) foi encontrada para o espectro de ondas que considera a frequência de pico.

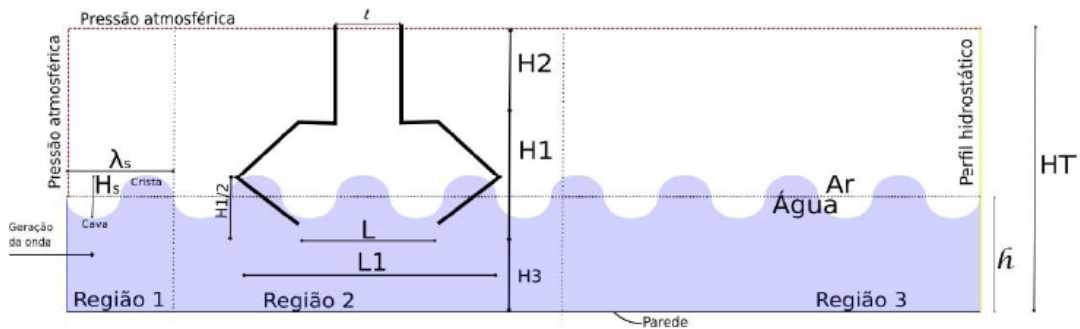


Figura 1.8: Ilustração do domínio utilizado por De Deus et al. [18].

Gomes et al. [32] estudaram um conversor CAO submetido à um espectro de ondas do tipo JONSWAP. O objetivo do estudo é analisar a influência da geometria da câmara do CAO sobre a potência hidropneumática disponível. O grau de liberdade avaliado foi a razão entre a altura e o comprimento da entrada da câmara do CAO, enquanto as restrições empregadas foram a área da entrada e a área total da câmara, que foram mantidas constantes. Foram consideradas quatro formas geométricas para a câmara hidropneumática do dispositivo CAO: retângulo, trapézio, trapézio invertido e trapézio duplo, conforme ilustrado na Fig. 1.9 (a) – (d), respectivamente. Com relação aos resultados, o melhor caso foi encontrado para a razão 0,0416 e para a câmara hidropneumática com formato retangular (Fig. 1.9(a)), onde foram obtidos 304,79 W de potência hidropneumática, o que representa uma melhoria de aproximadamente 99% na eficiência do dispositivo quando comparado ao pior caso, que apresenta a razão 0,0052 e a câmara hidropneumática possui formato de duplo trapézio (Fig. 1.9(d)).

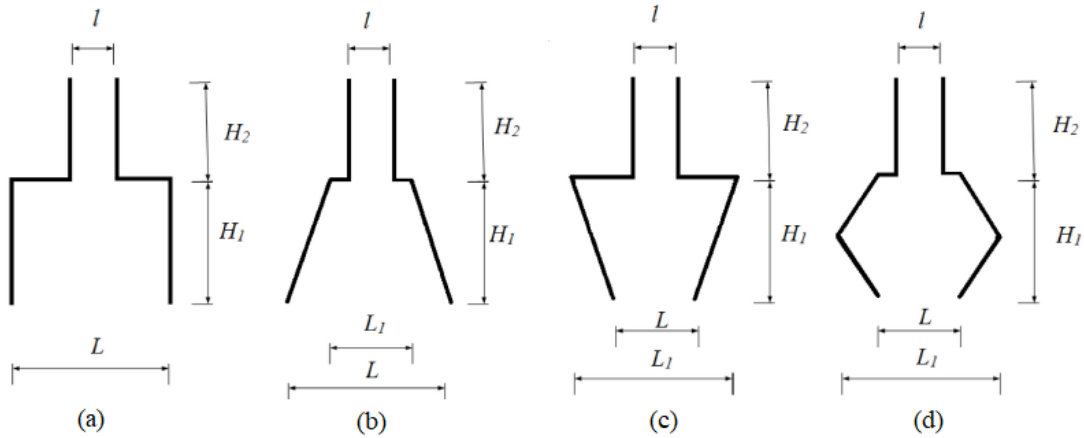


Figura 1.9: Ilustração das formas geométricas do CAO utilizadas por Gomes et al. [32].

Maciel [49] utilizou a metodologia WaveMIMO para submeter um dispositivo CAO às ondas irregulares realísticas encontradas no município de Rio Grande - RS. O objetivo do estudo foi a maximização da potência hidropneumática disponível.

vel pelo CAO. O volume da câmara hidropneumática e o volume total do dispositivo foram mantidos constantes, enquanto o grau de liberdade avaliado foi a razão entre a altura e o comprimento da câmara. A geometria de razão 0,1985 maximizou a potência hidropneumática disponível, onde foram obtidos 29,63 W. O pior caso encontrado é o de razão 2,2789 e apresenta 6,83 W de potência, portanto, o caso ótimo se mostrou 4,34 vezes mais eficiente que o pior caso. Além disso, o caso ótimo obteve uma potência 2,49 vezes maior do que a obtida quando consideradas as configurações geométricas do dispositivo instalado na Ilha do Pico (Portugal), que obteve uma potência de 11,89 W.

Conforme pôde-se observar, o montante de estudos numéricos que aplicam o Design Construtal na avaliação geométrica do dispositivo CAO quando submetido às ondas regulares é superior ao encontrado quando o dispositivo é submetido às ondas irregulares. Destaca-se que as ondas irregulares reproduzem o fenômeno físico ocorrido na natureza, portanto, é de suma importância avaliar se a geometria ótima do dispositivo CAO sofre influência do clima de ondas. Para isso, o presente estudo se baseia no estudo realizado por Maciel [49] e avalia se a geometria ótima do dispositivo CAO se mantém quando o dispositivo é submetido à série de ondas regulares representativas e à série de ondas irregulares realísticas que representam o estado de mar ocorrido em Tramandaí no dia 28 de maio de 2018 das 10 h e 14 min às 10 h e 29 min.

1.2 Objetivos

O presente estudo tem como objetivo principal a simulação fluidodinâmica e a avaliação geométrica, através do Design Construtal aliado à Busca Exaustiva, de um dispositivo CAO quando submetido às ondas regulares representativas e às ondas irregulares realísticas que representam o estado de mar encontrado no município de Tramandaí, Litoral Norte do RS, Brasil.

1.2.1 Objetivos Específicos

1. Obter os dados de velocidade de propagação das ondas irregulares e as características das ondas regulares que representam o estado de mar realístico encontrado no município de Tramandaí, Litoral Norte do RS, Brasil;
2. Analisar se há influência da batimetria na geração numérica das ondas regulares representativas do estado de mar encontrado em Tramandaí;
3. Analisar se há influência da batimetria na geração numérica das ondas irregulares realísticas que representam o estado de mar encontrado em Tramandaí;
4. Aplicar o Design Construtal, aliado à Busca Exaustiva, na avaliação da razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática (H_1/L) do dispositivo CAO quando submetido à incidência das ondas regulares representativas;
5. Aplicar o Design Construtal, aliado à Busca Exaustiva, na avaliação da razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática (H_1/L) do dispositivo CAO quando submetido à incidência das ondas irregulares realísticas.

2 TEORIA DE ONDAS

As ondas podem ser definidas como uma manifestação de forças que atuam sobre o fluido, que tendem a deformá-lo contra a ação da gravidade e da tensão superficial, onde juntas agem para manter uma superfície fluida nivelada. Portanto, é necessário algum tipo de força para a criação das ondas, como por exemplo, uma pedra caindo na água ou uma rajada de vento. Uma vez criadas, as forças gravitacionais e de tensão superficial são ativadas e permitem que as ondas se propaguem [23].

As ondas oceânicas ocorrem em todos os tamanhos e formas, pois dependem da magnitude das forças que atuam na água. Além do mais, diferentes velocidades de impacto criam ondas de diferentes tamanhos, indicando que as forças de pressão que atuam na superfície do fluido são importantes, assim como a magnitude do fluido deslocado [23].

A classificação para o comportamento das ondas é realizada a partir da distinção em ondas regulares ou irregulares. Para as regulares, existe a teoria de ondas regulares, que descreve ondas com comportamento bem definido e constante no tempo e no espaço. Já, as ondas irregulares, são descritas a partir da soma de pequenas ondas regulares com altura e período distintos [33]. Vale destacar que, neste estudo são consideradas tanto as ondas regulares, quanto as irregulares.

2.1 Ondas Regulares

As características das ondas regulares podem ser observadas na listagem a seguir, além disso, a Figura 2.1 ilustra algumas dessas características [13]:

- **Nível Médio da Água (NMA)** - é o nível da água em repouso.
- **Elevação da Superfície Livre (η)** - representa a distância instantânea da superfície livre da onda ao NMA.
- **Crista** - é o ponto mais alto atingido pela superfície livre da onda em relação ao NMA.
- **Cava** - é o ponto mais baixo atingido pela superfície livre da onda em relação ao NMA.
- **Altura da onda (H)** - é a distância entre a crista e a cava.
- **Amplitude (A)** - é a distância entre a crista (ou cava) ao NMA.
- **Comprimento da onda (λ)** - é a distância entre duas cristas ou cavas consecutivas.
- **Celeridade (C)** - representa a velocidade de propagação da onda.
- **Período (T)** - é o tempo de uma oscilação completa, ou ainda, o tempo necessário para que um ponto qualquer da onda percorra uma distância igual ao comprimento de onda.
- **Frequência (f)** - é número de oscilações por unidade de tempo.
- **Profundidade (h)** - é a distância vertical entre o NMA e o fundo do mar.

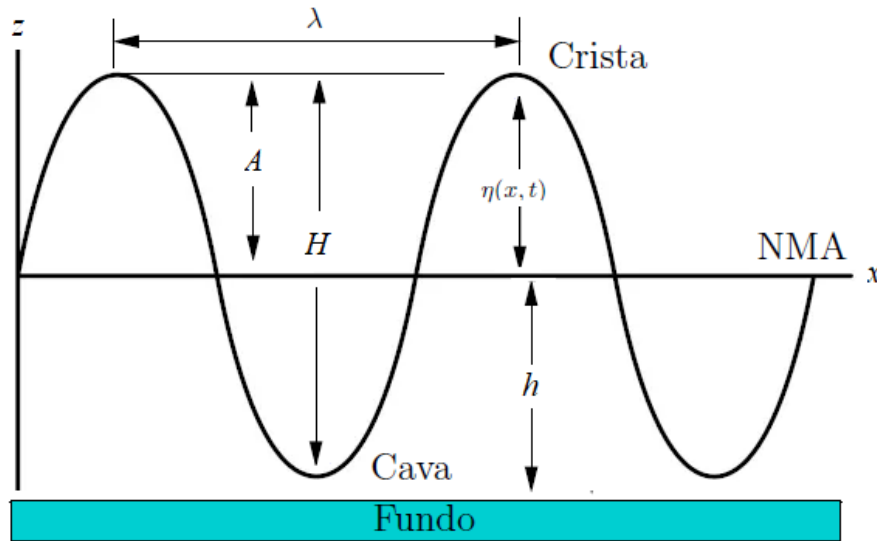


Figura 2.1: Características de uma onda regular.

Os principais fatores a serem considerados na determinação da teoria de ondas, são: a altura da onda (H), o comprimento da onda (λ) e a profundidade (h). Os seguintes parâmetros adimensionais são compostos por esses fatores [23]:

- Declividade ($\frac{H}{\lambda}$)
- Profundidade relativa ($\frac{h}{\lambda}$)
- Altura de onda relativa ($\frac{H}{h}$)
- Número de Ursell (U_r) $U_r = \left(\frac{\lambda^2 H}{h^3}\right)$

Com relação às teorias de ondas, a Teoria Linear é a mais simples e é válida quando a declividade, a profundidade relativa e a altura de onda relativa são pequenas. Enquanto as demais teorias de ondas, que são não lineares, obtêm uma representação mais próxima de ondas realísticas, permitindo assim, a análise de ondas mais altas em menores profundidades. A Teoria de Stokes, por exemplo, se aplica para ondas de maior amplitude em águas intermediárias e profundas. A partir da Teoria de Stokes de 2^a ordem as ondas apresentam cristas mais altas e cavas mais

achatadas. A solução de Stokes é válida para $kh < 1$, $H/L \ll 1$ e $Ur < 26$. Já, a Teoria Cnoidal é aplicada para águas rasas e válida para valores $h/L < 1/8$ e $Ur > 20$, essas ondas possuem cristas finas separadas por uma larga e achatada cava. Por fim, quando o comprimento de onda se aproxima do infinito, a Teoria de Ondas Cnoidal se reduz a Teoria de Onda Solitária, onde são encontradas ondas não periódicas e que não possuem cavas [10, 11]. A forma da elevação da superfície livre encontrada em cada teoria de ondas pode ser observada na Fig. 2.2, enquanto, o gráfico que ilustra a aplicabilidade das teorias de ondas é apresentado na Fig. 2.3.

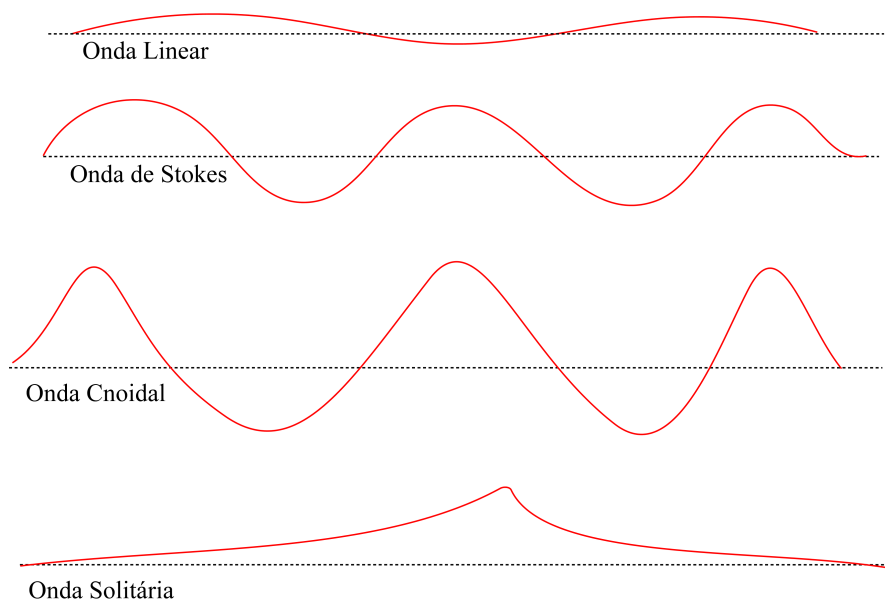


Figura 2.2: Formato das ondas de cada teoria (adaptado de Carneiro [10]).

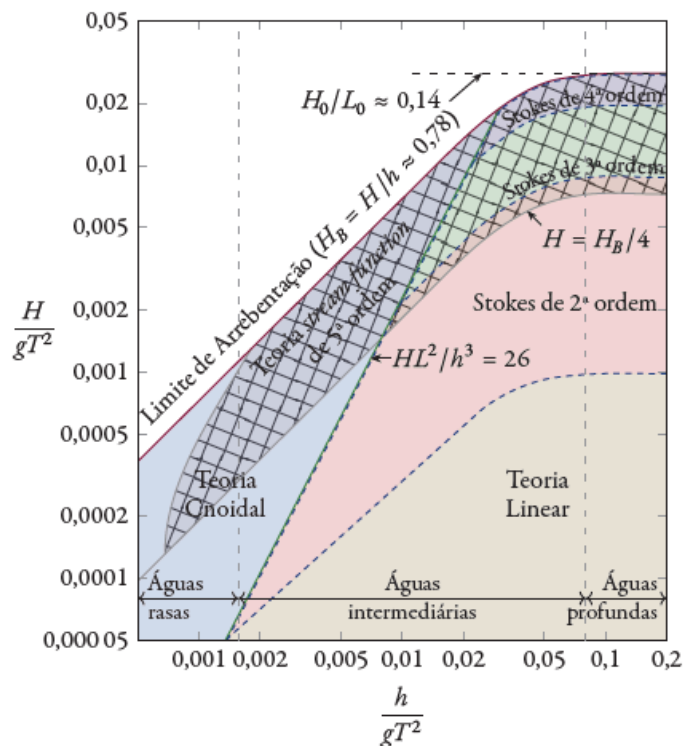


Figura 2.3: Aplicabilidade da teoria de ondas (adaptado de Chakrabarti [13]).

2.1.1 Equações Governantes

Segundo Carneiro [10], a Teoria Linear [1] ou Teoria de Airy, é a mais simples de todas as teorias de ondas e pode ser aplicada a um conjunto muito particular de ondas que não existem na natureza, porém, esse modelo é útil para a solução de problemas reais e para a compreensão de fenômenos físicos.

A Teoria Linear é válida para ondas de pequena amplitude, pequeno comprimento e grandes profundidades, ou seja, quando a declividade, profundidade relativa e a altura da onda são pequenas. Ainda, são utilizadas as seguintes simplificações: massa específica da água constante (fluido incompressível); altura da onda pequena quando comparada ao seu comprimento e à profundidade da água; profun-

didade da água constante; efeitos da turbulência, viscosidade e tensão superficial desconsiderados; e escoamento bidimensional e irrotacional (vorticidade nula) [23].

Para a formulação do modelo matemático, baseado em Dean e Dalrymple [23] e Farina [29], supondo um escoamento 2D, o vetor velocidade \vec{u} é dado por:

$$\vec{u}(x, z, t) = u\vec{i} + w\vec{k} \quad (2.1)$$

onde, u e w representam a velocidade nas direções de x e z , respectivamente, e t é o tempo. Quando o fluido está em movimento, a massa deve ser conservada, ou seja, o vetor velocidade \vec{u} deve satisfazer a equação da conservação de massa (ou equação da continuidade):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

Suponha que o escoamento é irrotacional, isto é, $\nabla \times \vec{u} = \vec{0}$. Como o rotacional do gradiente de qualquer função potencial é sempre zero, então existe uma função ϕ , chamada de potencial de velocidade, tal que:

$$\vec{u} = -\nabla\phi, \quad (2.3)$$

ou seja,

$$u = -\frac{\partial\phi}{\partial x} \quad (2.4)$$

e

$$w = -\frac{\partial\phi}{\partial z} \quad (2.5)$$

Substituindo as Eqs. (2.4) e (2.5) na Eq. (2.2), chegamos na equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.6)$$

Na sequência, as seguintes condições de contorno são assumidas:

- Condição de contorno cinemática na superfície de fundo, considerando-a rígida e impermeável, onde a velocidade vertical é nula:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad \text{em } z = -h \quad (2.7)$$

- Condição de contorno cinemática na superfície livre:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\partial \eta}{\partial t} - (\vec{u} \cdot \nabla)\eta = 0, \quad \text{em } z = \eta(x, t) \quad (2.8)$$

Para a condição de contorno dinâmica na superfície livre, a equação de Bernoulli é aplicada em $z = \eta(x, t)$:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta + \frac{1}{2}|\nabla\phi|^2 = -\frac{p}{\rho}, \quad \text{em } z = \eta(x, t) \quad (2.9)$$

onde, p é a pressão logo abaixo da superfície da água, supondo que seja igual à pressão atmosférica; g é a aceleração da gravidade e ρ a massa específica.

2.1.2 Teoria Linear de Ondas

Considerando que a amplitude da onda é muito pequena, os termos de segunda ordem e de ordem superior podem ser desprezados. Portanto, supondo $p = 0$ em $z = 0$, as Eqs. (2.8) e (2.9) são reescritas como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (2.10)$$

e

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0. \quad (2.11)$$

Logo, a condição de contorno dinâmica na superfície livre é dada por:

$$\eta = \frac{1}{g} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \Big|_{z=0} \quad (2.12)$$

Dessa forma, utilizando a separação de variáveis na Equação de Laplace, o potencial de velocidade ϕ é dado por:

$$\phi = -\frac{H g}{2 \sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \text{sen}(kx - \sigma t) \quad (2.13)$$

onde k é o número de onda e σ a frequência angular, dados, respectivamente, por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.14)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (2.15)$$

Considerando as Eqs. (2.12) e (2.13), é encontrada a expressão para elevação da superfície livre de uma onda linear, ou seja, a onda classificada na Teoria Linear (ou Teoria de Airy):

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.16)$$

A velocidade horizontal e vertical da partícula de água é dada, substituindo a Eq. (2.13) nas Eq. (2.4) e (2.5), respectivamente:

$$u = \frac{H g k}{2 \sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.17)$$

$$w = \frac{H g k}{2 \sigma} \frac{\text{senh}k(h+z)}{\cosh kh} \text{sen}(kx - \sigma t) \quad (2.18)$$

2.1.3 Teoria de Stokes de 2ª Ordem

Segundo McCormick [56], a Teoria de Stokes de 2ª ordem é baseada em duas suposições: assume-se que o escoamento abaixo da superfície livre é irrotacional e que as propriedades das ondas podem ser representadas por uma série de perturbações.

A fim de descrever essa teoria, apresenta-se as equações governantes e condições de fronteira na forma adimensional seguindo os passos conforme Stokes [68]. Para isso, define-se as seguintes variáveis adimensionais:

$$x' = kx, \quad z' = kz, \quad \eta' = \frac{\eta}{a}, \quad \phi' = \frac{k\phi}{a\sqrt{gk}}, \quad t' = \sqrt{gk}t, \quad h' = kh \quad \text{e} \quad p' = \frac{kp}{\rho g}.$$

Dessa forma, a equação de Laplace (2.6) e as condições de contorno (2.7), (2.8), (2.9) são reescritas como:

$$\frac{\partial^2 \phi'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \phi'}{\partial z'^2} = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial \phi'}{\partial z'} = 0, \quad \text{em } z' = -h' \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial \phi'}{\partial z'} - \frac{\partial \eta'}{\partial t'} - ka \left(\frac{\partial \phi'}{\partial x'} \frac{\partial \eta'}{\partial x'} \right) \eta = 0, \quad \text{em } z' = ka\eta'(x, t) \quad (2.21)$$

$$ka \frac{\partial \phi'}{\partial t'} + z' + (ka)^2 \frac{1}{2} |\nabla \phi'|^2 = -p', \quad \text{em } z' = ka\eta'(x', t'). \quad (2.22)$$

Na teoria de perturbação, assumimos que a solução irá depender do parâmetro pequeno $\epsilon = ka$. Assim, decompos as quantidades em séries de potências

de ϵ , tais como:

$$\phi' = \phi'_1 + \epsilon\phi'_2 + \epsilon^2\phi'_3 + \dots \quad (2.23)$$

$$\eta' = \eta'_1 + \epsilon\eta'_2 + \epsilon^2\eta'_3 + \dots \quad (2.24)$$

Substituindo essas expansões em (2.6), (2.7), (2.8), (2.9), tomando as soluções das equações de ordem 0 e ordem 1, e retornando para as variáveis adimensionais, o potencial de velocidade e a elevação da superfície livre na teoria de Stokes de 2ª ordem são dadas, respectivamente, por [23]:

$$\phi = -\frac{H}{2} \frac{g}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \text{sen}(kx - \sigma t) - \frac{3}{32} H^2 \sigma \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \text{sen}2(kx - \sigma t) \quad (2.25)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{H^2 k}{16} \frac{\cosh kh}{\sinh^3 kh} (2 + \cosh 2kh) \cos 2(kx - \sigma t) \quad (2.26)$$

Derivando-se a Eq. (2.25), em relação a x e z , é possível encontrar as componentes de velocidade de propagação da partícula de água, respectivamente, como [23]:

$$u = \frac{H}{2} \frac{gk}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3}{16} H^2 \sigma k \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \cos 2(kx - \sigma t) \quad (2.27)$$

$$w = \frac{H}{2} \frac{gk}{\sigma} \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \text{sen}(kx - \sigma t) + \frac{3}{16} H^2 \sigma k \frac{\sinh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \text{sen}2(kx - \sigma t) \quad (2.28)$$

Destaca-se que a formulação de Stokes de 2ª Ordem será utilizada para descrever as ondas regulares apresentadas na Seção 4.4.

2.2 Ondas Irregulares

2.2.1 Metodologia WaveMIMO

Machado et al. [48] propuseram a metodologia WaveMIMO, validada e verificada por Maciel et al. [50] e utilizada neste trabalho para a geração das ondas irregulares realísticas. O primeiro passo da metodologia WaveMIMO consiste em obter-se um espectro de ondas a partir do TOMAWAC¹ (*Telemac-based Operational Model Addressing Wave Action Computation*). Os dados espectrais do TOMAWAC são obtidos a partir da solução da equação que representa a situação geral de propagação de ondas em um meio instável e não homogêneo, onde a densidade de ação de onda se conserva no termo fonte, dada por [2]:

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{x}N_e)}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{z}N_e)}{\partial z} + \frac{\partial(\dot{k}_x N_e)}{\partial k_x} + \frac{\partial(\dot{k}_z N_e)}{\partial k_z} = Q(k_x, k_z, x, z, t) \quad (2.29)$$

onde N_e é o espectro direcional de densidade ação da onda, k_x e k_z são, respectivamente, as componentes em x e z do vetor número de onda; \dot{x} , \dot{z} , \dot{k}_x e \dot{k}_z são as derivadas temporais; e Q é o termo fonte.

Na sequência, esses dados espectrais são transformados em séries temporais de elevações da superfície livre, de onde são obtidos (utilizando-se as Eq. (2.17) e (2.18)) os dados discretos transientes das velocidades orbitais de propagação das ondas [58]. Por fim, esses dados discretos são impostos como condição de contorno em um canal de ondas numérico, viabilizando a geração numérica das ondas. Destaca-se que, neste estudo, este procedimento foi adotado na geração das ondas irregulares realísticas.

Para caracterizar e identificar o clima de ondas mais frequente na localidade definida para o estudo, é elaborado um histograma bivariado (vide Fig.

¹www.opentelemac.org

2.4) que relaciona as combinações mais frequentes de período médio (T_m) e altura significativa (H_s) das ondas. Para tal, são consideradas as ondas que causam maior agitação na superfície e desconsideradas as ondas menores, que causam um desvio na média aritmética [57]. Assim, H_s é calculada através da média do terço das maiores ondas consideradas [40]:

$$H_s = \frac{1}{M/3} \sum_j^{M/3} H_j \quad (2.30)$$

onde, j indica a j -ésima maior onda registrada e M o número de ondas registradas.

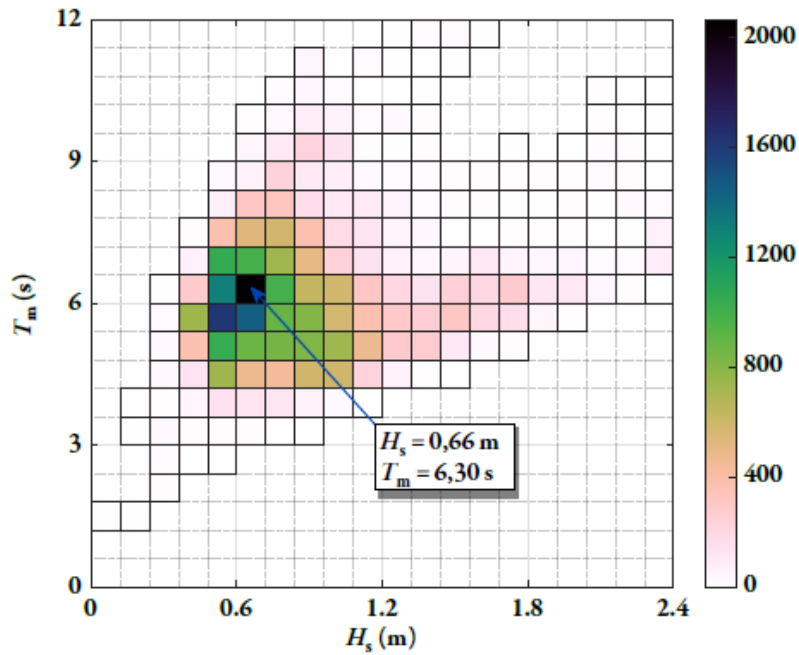


Figura 2.4: Exemplo de histograma bivariado que relaciona H_s e T_m [57].

Com base nessas características das ondas (T_m e H_s) e na profundidade (h) do local de estudo, é possível estabelecer as ondas regulares representativas deste estado de mar. Para isso, o comprimento de onda é determinado através da equação da dispersão [56]:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (2.31)$$

Destaca-se que, independente do clima de ondas considerado no estudo, se faz necessária a determinação das características das ondas regulares representativas do estado de mar. Tendo em vista que, neste estudo, as características dessas ondas são utilizadas para a determinação do comprimento do canal de ondas e para a discretização espacial do domínio computacional.

Por fim, na Fig. 2.5 é possível visualizar o organograma com o funcionamento de cada etapa da metodologia WaveMIMO:

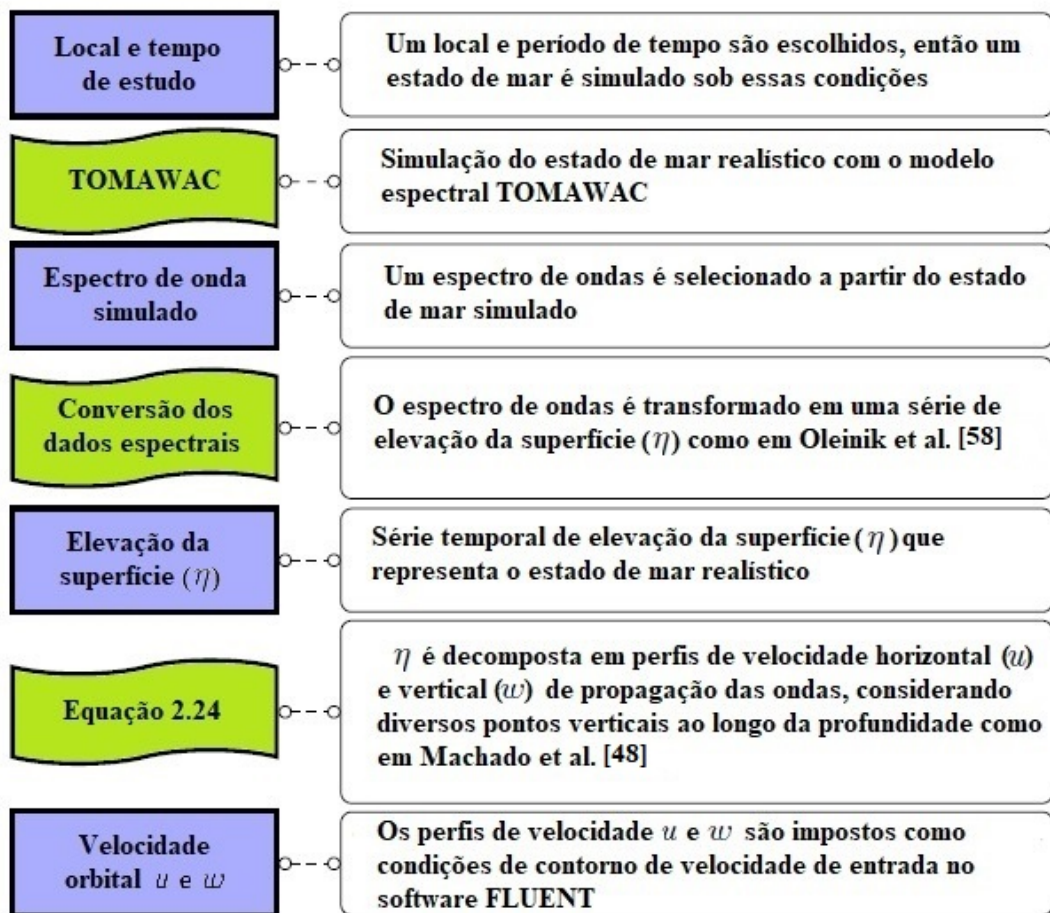


Figura 2.5: Etapas da metodologia WaveMIMO (adaptado de Machado et al. [48]).

3 TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO E TEORIA CONSTRUTAL

3.1 Tecnologias de Conversão

De acordo com Cruz e Sarmento [17], existem diferentes soluções para o desafio tecnológico apresentado na conversão da energia proveniente das ondas do mar em energia elétrica. Devido a isso, existem diversas tecnologias que se encontram em estágios diferentes de desenvolvimento e apresentam distintas concepções e princípios físicos de funcionamento. Logo, é fundamental estabelecer critérios para classificá-las de acordo com suas diferenças e similaridades.

Uma das classificações aplicadas aos conversores de energia das ondas é de acordo com a distância dos dispositivos em relação à costa, onde os dispositivos podem ser classificados como [17]:

- *Onshore*: mais conhecidos como dispositivos costeiros, são aqueles que possuem acesso por terra;
- *Nearshore*: são dispositivos localizados próximos a costa;
- *Offshore*: são dispositivos afastados da costa.

Também é possível classificá-los quanto ao princípio físico de funcionamento em [17]:

- **Corpos Oscilantes**, podendo ser de absorção pontual (*Point Absorbers*) ou progressivos (*Surging Devices*), estes dispositivos podem ser flutuantes ou submersos. Na absorção pontual, o flutuador se move em relação à uma estrutura fixa no fundo do mar, podendo ser instalado parcialmente ou totalmente submerso. Nos progressivos, os componentes

acompanham o movimento oscilatório das ondas, tendo seu movimento relativo a própria estrutura [26].

- Galgamento (*Overtopping Devices*): são estruturas fixas ou flutuantes e parcialmente submersas. Seu princípio físico de funcionamento ocorre com captura da água por uma rampa inclinada que a conduz ao reservatório, que é localizado acima do nível do mar; quando a água deixa este reservatório, passa por uma turbina hidráulica acoplada a um gerador elétrico ocorrendo assim, a conversão de energia [26].
- Coluna de Água Oscilante (CAO) (OWC - *Oscillating Water Column*): escopo do presente trabalho, são estruturas ocas parcialmente submersas, que se encontram abertas para o mar abaixo da superfície livre da água. Seu princípio físico de funcionamento, vide Fig. 3.1, baseia-se no movimento das ondas, onde ocorre a pressurização e despressurização do ar dentro da câmara hidropneumática, fazendo com que o mesmo tenha uma passagem forçada através de uma turbina que está acoplada a um gerador elétrico [26].

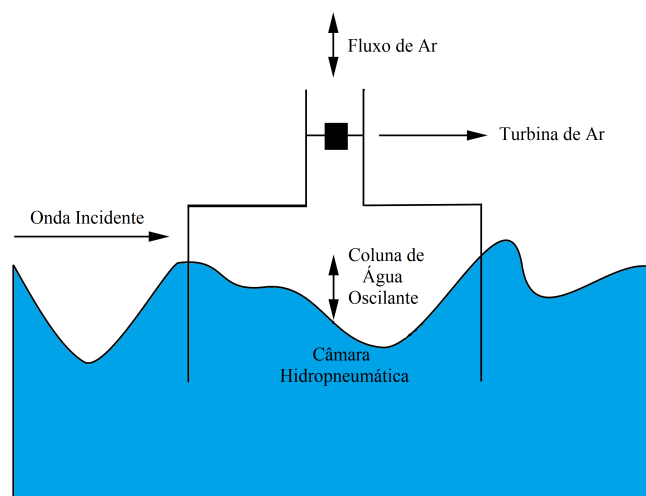


Figura 3.1: Princípio físico de funcionamento do CAO.

Dentre os dispositivos CAO instalados ao redor do mundo, a Figura 3.2 apresenta alguns exemplos, onde: (a) protótipo instalado em Islay na Escócia, operado pela WaveGen, possui capacidade de 75 kW; (b) conversor integrado a um quebra-mar construído no norte da Espanha, no porto de Mutriku. Possui 16 câmaras e turbinas, cada uma apresentando uma potência de 18,5 kW; (c) conversor com capacidade de 60 kW integrado a um quebra-mar no porto de Sakata, Japão; (d) conversor com capacidade de 500 kW, instalado em Yongsoo, a cerca de 1 km da costa da Ilha de Jeju, Coréia [27]. Por fim, destaca-se que as turbinas utilizadas nos dispositivos CAO apresentados na Fig. 3.2, assim como no apresentado na Fig. 3.3, são turbinas do tipo *Wells*. A característica principal desta turbina é manter a rotação das pás independente do sentido do fluxo de ar [17].



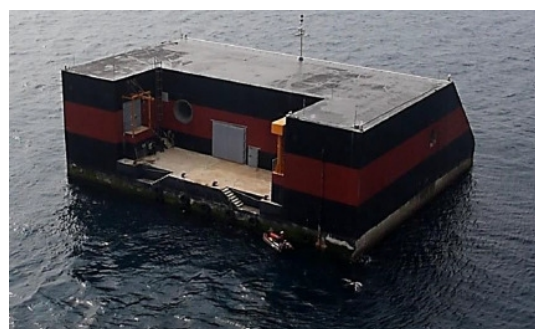
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.2: Dispositivos CAO [27, 63]: (a) Islay, Escócia; (b) Porto Quebra-mar Mutriku, Espanha; (c) Porto de Sakata, Japão e (d) Yongsoo, Coréia.

Em particular, na Figura 3.3 é possível observar o dispositivo CAO instalado na Ilha do Pico, este dispositivo localizado no arquipélago dos Açores, Portugal, foi utilizado como base para o presente estudo. O potencial energético local foi avaliado em 13,4 kW/m. O local escolhido para a instalação não possui plataforma continental extensa, então apresenta vantagem em relação ao clima de ondas, ou seja, possui pouca perda de energia devido ao atrito com o fundo e também baixa amplitude das marés [28].



Figura 3.3: Dispositivo instalado na Ilha do Pico [27].

A Figura 3.4 apresenta uma ilustração da seção transversal do CAO, construído com base no projeto Joule III [43], projeto que embasou a construção do dispositivo. A área de seção da coluna d'água é de 12 m \times 12 m na sua parte mais larga, o eixo da turbina fica a 10 m do nível de referência, o duto de ar possui 2,8

m de diâmetro e 11,3 m de comprimento e a profundidade média de submersão da parede do dispositivo é de 3,4 m [57].

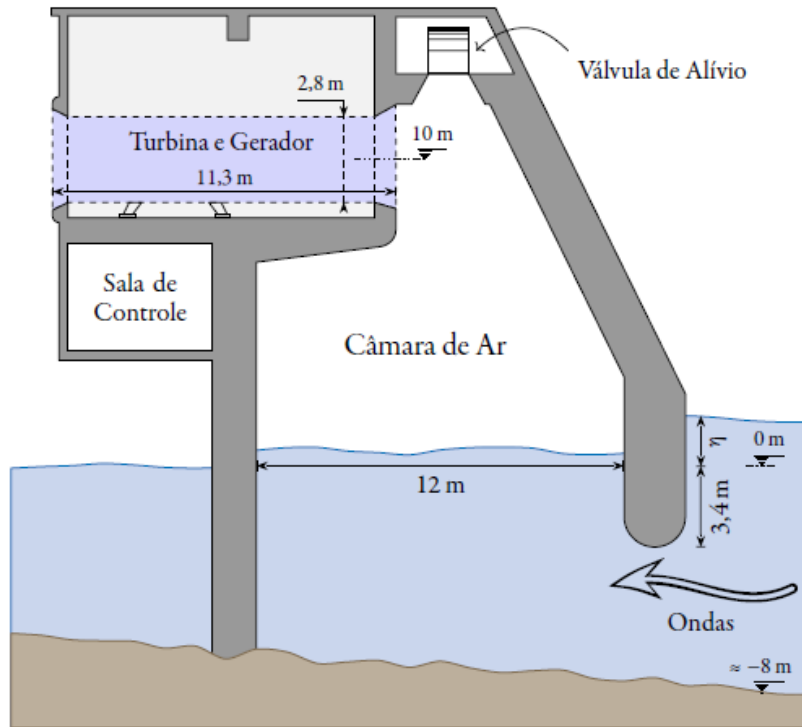


Figura 3.4: Ilustração da seção transversal do dispositivo CAO instalado na Ilha do Pico [57].

3.2 Teoria Construtal

A Teoria Construtal, desenvolvida por Adrian Bejan [5], explica como a geração de estruturas encontradas na natureza e submetidas a um fluxo/escoamento são geradas através de um princípio de acesso aos fluxos/escoamentos no tempo. Esse princípio, denominado Lei Construtal, afirma que: “Para um sistema de dimensões finitas, onde existe fluxo/escoamento, persistir no tempo (sobreviver) ele deve evoluir de uma maneira que propicie o mais fácil acesso possível às correntes que fluem/escoam através dele” [7]. De uma forma mais simples, essa lei é utilizada para

facilitar o acesso ao fluxo/escoamento no tempo, isto é, melhorando o desempenho do sistema.

Em relação à análise global dos fluxos/escoamentos que ocorrem na natureza (vide Fig. 3.5), observa-se que todos seguem uma tendência universal de sistemas abertos. Isso ocorre para melhorar ou maximizar os acessos ou diminuir as resistências ao fluxo/escoamento, por exemplo, os rios visam atingir o oceano, as veias visam atingir o coração e as pessoas querem sair de casa e se deslocar para seus locais de trabalho [64]. A Lei Construtal é responsável por apresentar a tendência da natureza e, com isso, permite obter uma melhor condição de fluxo/escoamento. Usando essa lei, é possível projetar processos de forma organizada e dinâmica para obter melhores ou mais eficientes resultados [8].

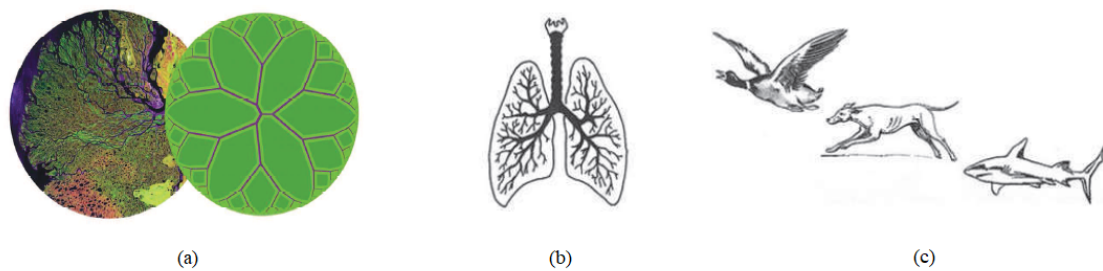


Figura 3.5: Exemplos de aplicação da Lei Construtal [5]: (a) rios; (b) pulmões e (c) animais.

Segundo Benjan [5, 6], para aplicar esta lei, utiliza-se o Design Construtal. Neste método, o fluxo/escoamento é adaptável e a geometria é deduzida a partir de um princípio de otimização enquanto é submetida a restrições, variando parâmetros de acordo com os graus de liberdade definidos. Para aplicar o Design Construtal na otimização geométrica de um sistema físico é preciso determinar um indicador de performance (grandeza a ser melhorada), graus de liberdade (parâmetros geométricos variados) e restrições geométricas (parâmetros geométricos mantidos constantes). As etapas desse método são observadas na Fig. 3.6.



Figura 3.6: Etapas da aplicação do método Design Construtal (adaptado de De Lima [19] e Barros [3]).

3.2.1 Design Construtal aplicado a um dispositivo CAO

Conforme mencionado na Seção 1.1, existem diversos estudos que utilizam o Design Construtal associado à Busca Exaustiva na otimização geométrica de dispositivos conversores da energia contida nas ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO. No presente estudo, o Design Construtal é associado à Busca Exaustiva para a obtenção da geometria que maximiza a potência obtida por um dispositivo CAO quando submetido às ondas regulares representativas e às ondas irregulares realísticas que representam o estado de mar ocorrido no município de Tramandaí, Litoral Norte do estado do RS.

Para isso, no que tange o Design Construtal, se faz necessária a definição do indicador de performance, do grau de liberdade e das restrições geométricas. Neste estudo, o indicador de performance é a potência hidropneumática disponível, que será maximizada. O grau de liberdade avaliado é a razão entre a altura e o

comprimento da câmara hidropneumática do dispositivo CAO, H_1/L . Serão mantidos constantes a razão entre a altura e o comprimento do duto da turbina, H_2/l , a profundidade de submersão do CAO, H_3 , e o volume do canal de ondas. Uma ilustração do dispositivo com as variáveis é observada na Fig. 3.7.

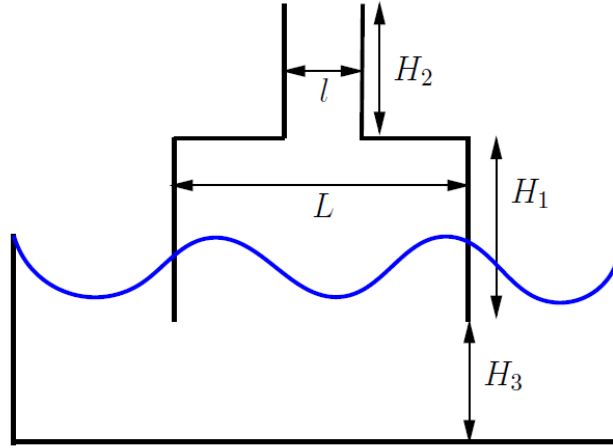


Figura 3.7: Ilustração do dispositivo CAO com as variáveis utilizadas.

As restrições geométricas são o volume da câmara hidropneumática (V_{ch}) e o volume total do CAO (V_t), as quais foram mantidas constantes, dadas por:

$$V_{ch} = H_1 L W \quad (3.1)$$

$$V_t = V_{ch} + H_2 l W \quad (3.2)$$

Destaca-se que a variável referente à terceira dimensão, W , é unitária, pois o problema estudado é 2D. Multiplicando e dividindo o lado direito da Eq. (3.1) por L e realizando manipulações algébricas é possível calcular o comprimento (L) da câmara hidropneumática:

$$V_{ch} = \frac{L H_1 L W}{L} \quad (3.3)$$

colocando em evidência H_1/L :

$$V_{ch} = L^2 \left(\frac{H_1}{L} \right) W \quad (3.4)$$

isolando o L^2 :

$$L^2 = \frac{V_{ch}}{\left(\frac{H_1}{L} \right) W} \quad (3.5)$$

elevando os dois lados da equação por $1/2$:

$$L = \sqrt{\frac{V_{ch}}{\left(\frac{H_1}{L} \right) W}} \quad (3.6)$$

Na sequência, a altura da câmara hidropneumática (H_1) é calculada em função do grau de liberdade H_1/L :

$$H_1 = H_1 \quad (3.7)$$

multiplicando ambos os lados por L :

$$LH_1 = LH_1 \quad (3.8)$$

isolando H_1 :

$$H_1 = L \left(\frac{H_1}{L} \right) \quad (3.9)$$

Destaca-se que, embora não avaliado nesse estudo, a partir da Eq. (3.2) é possível calcular o comprimento (l) e altura (H_2) do duto da turbina em função de um segundo grau de liberdade, H_2/l :

$$V_t - V_{ch} = H_2 l W \quad (3.10)$$

multiplicando e dividindo o lado direito por l :

$$V_t - V_{ch} = \frac{H_2 l^2 W}{l} \quad (3.11)$$

colocando em evidência H_2/l :

$$V_t - V_{ch} = \left(\frac{H_2}{l} \right) W l^2 \quad (3.12)$$

isolando l^2 :

$$l^2 = \frac{V_t - V_{ch}}{\left(\frac{H_2}{l} \right) W} \quad (3.13)$$

elevando os dois lados da equação por $1/2$:

$$l = \sqrt{\frac{V_t - V_{ch}}{\left(\frac{H_2}{l} \right) W}} \quad (3.14)$$

Na sequência,

$$H_2 = H_2 \quad (3.15)$$

multiplicando ambos os lados por l :

$$l H_2 = l H_2 \quad (3.16)$$

isolando H_2 :

$$H_2 = l \left(\frac{H_2}{l} \right) \quad (3.17)$$

Conforme mencionado e, assim como em Maciel [49], para todos os casos avaliados neste estudo, H_2 e l foram mantidos constantes e iguais a 11,30 m e 2,80 m, respectivamente, bem como o volume do canal de ondas. Destaca-se ainda, que

foram avaliadas as mesmas razões H_1/L de Maciel [49], porém, ressalta-se que a principal diferença entre os estudos é o estado de mar no qual o CAO é submetido, já que Maciel [49] estudou um CAO instalado no município de Rio Grande - RS. Conforme mencionado, assim como em Maciel [49], o CAO baseia-se nas dimensões do dispositivo instalado na Ilha do Pico, Açores, Portugal (vide Fig. 3.4).

Conforme realizado em Maciel [49], para simular o dispositivo CAO inserido em um canal de ondas, o modelo de dispositivo original da Ilha do Pico foi simplificado de modo a viabilizar a geração da malha no interior do CAO [57]. Destaca-se, que a simplificação realizada manteve as principais dimensões do CAO, porém: a câmara do CAO foi considerada retangular, diferente do original, que é trapezoidal; o duto de ar manteve as dimensões originais (11,30 m x 2,80 m), mas foi posicionado acima da câmara, na vertical; a largura e a altura da câmara foram mantidas constantes e igual a 12,00 m e 13,40 m, respectivamente, assim como a profundidade de submersão do CAO, 6,12 m [57].

Além disso, existe outra diferença entre o CAO da Ilha do Pico e o dispositivo modelado neste estudo, que é o fato do dispositivo original ser *onshore*, logo, uma das laterais da câmara hidropneumática age como uma barreira sólida que impede completamente a passagem das ondas; enquanto neste estudo o dispositivo é considerado *offshore*, deste modo, há a passagem livre das ondas por baixo do dispositivo. Destaca-se que esta alteração na localização de instalação do CAO evita a reflexão das ondas no interior do dispositivo [57]. Por fim, tomando como base essas configurações e as Eqs. (3.6) e (3.9), a Seção 4.4.2, a seguir, apresenta as variações geométricas investigadas neste estudo (Tabela 4.2).

4 MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA

Segundo Pletcher et al. [65], com o avanço da tecnologia e da velocidade de processamento no século XX, houve um grande efeito na forma como os princípios da mecânica dos fluidos e da transferência de calor são aplicados à problemas práticos de engenharia. Problemas que, com os métodos computacionais e computadores disponíveis há 50 anos, levariam anos a ser resolvidos, agora podem ser resolvidos a um baixo custo de processamento e curto intervalo de tempo. Estes avanços tecnológicos resultaram na criação da dinâmica dos fluidos computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*), uma metodologia para solução de problemas complexos em mecânica dos fluidos e transferência de calor. Nesta abordagem computacional (ou numérica), as equações que governam o problema abordado são resolvidas numericamente seguindo as leis de conservação da física.

Neste estudo, o software de CFD, FLUENT, foi empregado para simulação numérica do princípio físico de funcionamento do dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO. O FLUENT é um programa computacional, baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF), que permite a simulação numérica de escoamento de fluidos e de transferência de calor em geometrias complexas [54].

4.1 Método dos Volumes Finitos (MVF)

A tarefa do método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. Quando não é possível a solução analítica e decide-se pela aproximação numérica da equação diferencial, aceita-se a solução para um número mínimo

discreto de pontos, com um determinado erro, esperando que, quanto maior o número de pontos, mais perto da solução exata será a solução aproximada (ou numérica). Um método analítico com habilidade de resolver tais equações forneceria a solução em uma forma fechada, e seria possível, então, calcular os valores das variáveis dependentes em nível infinitesimal, isto é, para um número infinito de pontos [53].

Portanto, quanto mais preciso for o cálculo, maior será o número de variáveis do domínio envolvidas, o que, por sua vez, aumenta o número de incógnitas na mesma proporção. Para resolver este problema, haverá um sistema com proporções iguais de variáveis do domínio, incógnitas e equações. Quanto maior for esse valor, maior será o esforço computacional para resolvê-lo.

A Figura 4.1 ilustra o processo de discretização utilizado pelo método numérico que transforma uma equação, definida no domínio D , em um sistema algébrico de equações.

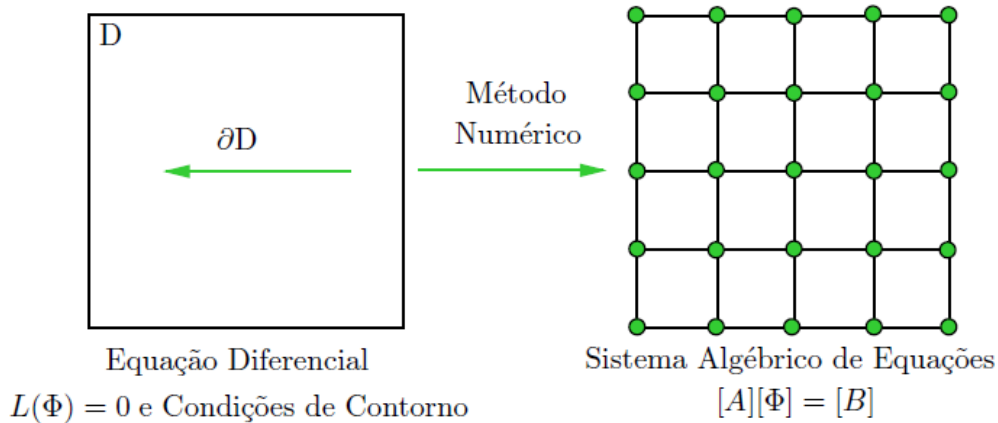


Figura 4.1: Função do método numérico (adaptado de Maliska [53]).

As derivadas da função existentes na equação diferencial devem ser substituídas pelos valores discretos da função. Transformar as derivadas em termos

que contém a função significa integrar a equação diferencial, e as diversas maneiras de fazê-lo são o que caracteriza o tipo do método numérico [53].

O MVF é uma forma de obter uma versão discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP). Diferentemente de outros métodos, fundamenta-se em uma abordagem física do problema representado pela EDP. De acordo com Maliska [53], as equações aproximadas no MVF podem ser obtidas de duas maneiras, que são equivalentes:

- Realização de balanços da propriedade em questão;
- Integração das equações na forma conservativa sobre o volume elementar no espaço e no tempo.

Segundo Maliska [53], é possível apresentar a relação entre as equações diferenciais na forma conservativa e as equações aproximadas utilizadas no MVF. Para isso, será considerado um elemento de fluido sujeito à um fluxo de massa em regime permanente (vide Fig. 4.2), que ilustra os balanços de conservação em um volume elementar, onde P indica o ponto central do volume de controle. Assim, realizando o equacionamento do balanço de massa no volume elementar [53]:

$$\dot{m}_l - \dot{m}_o + \dot{m}_n - \dot{m}_s = 0 \quad (4.1)$$

onde, \dot{m} representa o fluxo de massa no elemento de fluido enquanto os índices l , o , n , s representam, respectivamente, as direções leste, oeste, norte, sul.

Em termos de velocidade, a equação que descreve o volume elementar em coordenadas cartesianas é:

$$\rho u \Delta z|_l - \rho u \Delta z|_o + \rho w \Delta x|_n - \rho w \Delta x|_s = 0 \quad (4.2)$$

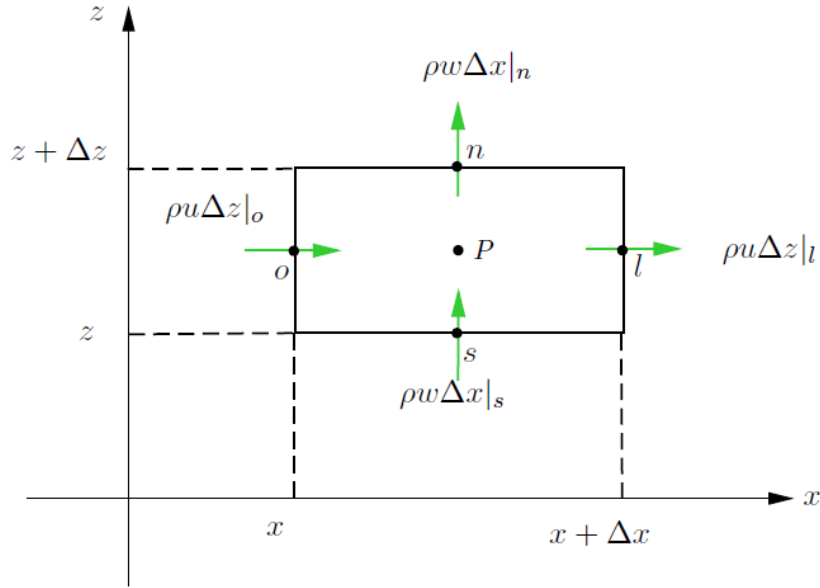


Figura 4.2: Balanço de massa no volume elementar (adaptado de Maliska [53]).

onde, Δx e Δz são, respectivamente, as variações da dimensão do elemento nas direções x e z .

Dividindo a Eq. (4.2) pelo produto $\Delta x \Delta z$, que denotam a área do volume elementar, encontra-se:

$$\frac{\rho u|_l - \rho u|_o}{\Delta x} + \frac{\rho w|_n - \rho w|_s}{\Delta z} = 0 \quad (4.3)$$

na sequência, aplicando $\lim_{\Delta x, \Delta z \rightarrow 0}$ na Eq. (4.3) encontra-se:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (4.4)$$

Destaca-se que a equação está na forma conservativa, pois existem os produtos ρu e ρw dentro do sinal de derivação. Portanto, a equação de conservação para um volume finito é um passo intermediário para a obtenção da equação de conservação em nível infinitesimal. Logo, a Eq. (4.4) será resolvida através de integração numérica no volume elementar, como pode-se observar onde:

$$\int_o^l \int_s^n \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \right] dx dz = 0 \quad (4.5)$$

Separando as integrais e integrando em x , depois em z , tem-se:

$$\int_s^n [\rho u|_l - \rho u|_o] dz + \int_o^l [\rho w|_n - \rho w|_s] dx = 0 \quad (4.6)$$

Considerando que o fluxo de massa avaliado no meio da face do volume de controle representa a média da variação na face, a Eq. (4.6) é dada como:

$$\rho u \Delta z|_l - \rho u \Delta z|_o + \rho w \Delta x|_n - \rho w \Delta x|_s = 0 \quad (4.7)$$

que é a Eq. (4.2) obtida através da realização do balanço da Eq. (4.1). O que evidencia que os processos para obtenção das equações aproximadas, através do balanço da propriedade ou da integração na forma conservativa da equação diferencial, são equivalentes.

4.2 *Volume of Fluid (VoF)*

O *Volume of Fluid* (VoF) é um modelo multifásico proposto por Hirt e Nichols [39], utilizado para tratar a interface entre dois ou mais fluidos imiscíveis. No presente estudo são consideradas duas fases, a água e o ar, portanto se faz necessário o conceito de fração volumétrica (α). Vale salientar que em cada volume de controle, a soma da fração volumétrica de todas as fases é sempre unitária. Portanto, cada célula computacional pode se apresentar em três diferentes estados, ou seja, contendo a interface das duas fases, neste caso:

$$\alpha_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} = 1 \quad (4.8)$$

contendo apenas a fase água, neste caso:

$$\alpha_{\acute{a}gua} = 1 \quad (4.9)$$

ou, ainda, contendo apenas a fase ar, neste caso:

$$\alpha_{ar} = 1 \quad (4.10)$$

Destaca-se, ainda, que, como o VoF é utilizado apenas para fluidos imiscíveis, tem-se:

$$\alpha_{\acute{a}gua} = 1 - \alpha_{ar} \quad (4.11)$$

No VoF, um único conjunto de equações, composto pelas equações de conservação de massa, fração volumétrica e quantidade de movimento, são resolvidos. Nessa seção, será apresentada a dedução das equações do modelo. Ainda, é importante ressaltar que, em todos os casos, o regime transiente é considerado, isto significa que varia com o tempo. A dedução das equações segue conforme desenvolvido em Versteeg e Malalasekera [70]. Nesse sentido, partindo pela equação da conservação de massa (Eq. (2.2)), a taxa de aumento de massa no elemento é dada por:

$$\text{taxa} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta x \Delta z \quad (4.12)$$

É necessário considerar a taxa líquida de fluxo de massa através das fronteiras do elemento de fluido, conforme ilustrado na Fig. 4.3.

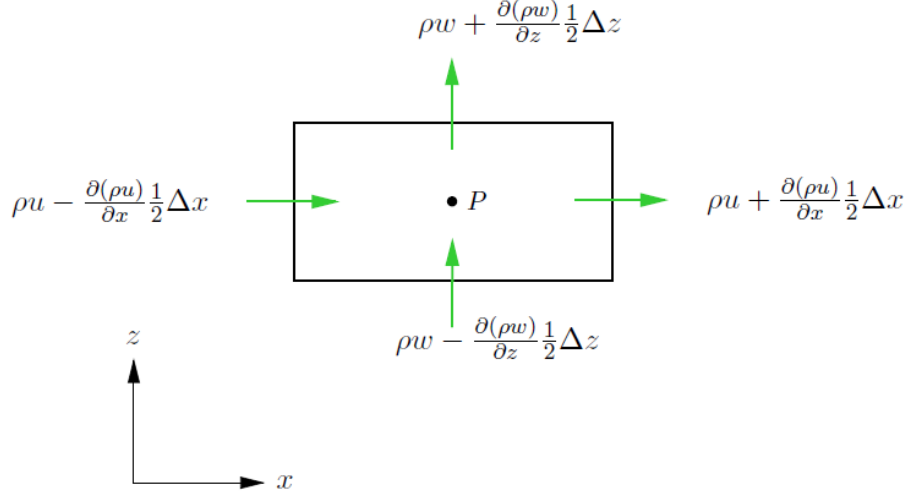


Figura 4.3: Fluxo de massa no elemento de fluido (adaptado de Versteeg e Malalasekera [70]).

De acordo com a Figura 4.3, a taxa líquida de fluxo de massa é dada por:

$$\begin{aligned} \text{taxa} = & \left[\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \Delta z - \left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \Delta z \\ & + \left[\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{\Delta z}{2} \right] \Delta x - \left[\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{\Delta z}{2} \right] \Delta x \end{aligned} \quad (4.13)$$

Que é equivalente a:

$$\left[-\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \Delta z + \left[-\frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{\Delta z}{2} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{\Delta z}{2} \right] \Delta x \quad (4.14)$$

Por fim:

$$\text{taxa} = \left[-\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] \Delta x \Delta z \quad (4.15)$$

Assim, conforme Versteeg e Malalasekera [70], igualando as Eqs. (4.12) e (4.15), tem-se:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta x \Delta z = \left[-\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] \Delta x \Delta z \quad (4.16)$$

Dividindo todos os termos da Eq. (4.16) por $\Delta x \Delta z$, tem-se:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \quad (4.17)$$

logo,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4.18)$$

Deste modo, a Eq. (4.18) equivale à equação de conservação de massa (Eq. (2.2)):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (4.19)$$

onde \vec{V} é o vetor de velocidades, dado por:

$$\vec{V} = (u, w) \quad (4.20)$$

A dedução da equação da conservação da fração volumétrica (α) ocorre de forma análoga a da conservação de massa, o fluxo de massa em um elemento está relacionado ao fluxo das fases neste elemento. Desse modo é suficiente substituir o termo ρ por α , pois, a função obedece a forma de uma equação de transporte [67]. Assim, a equação de conservação da fração volumétrica na forma vetorial é dada por:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla(\alpha \vec{V}) = 0 \quad (4.21)$$

Com relação à equação da quantidade de movimento, a segunda Lei de Newton afirma que a taxa de variação de quantidade de movimento de uma partícula de fluido é igual a soma das forças sobre a partícula. As taxas de aumento das

quantidade de movimentos x e z por unidade de volume de uma partícula de fluido são dadas por:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (4.22)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] \quad (4.23)$$

Ou, na forma vetorial:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{V}) \vec{V} \right] \quad (4.24)$$

Segundo Versteeg e Malalasekera [70] é comum destacar as contribuições das forças de superfície como termos separados na equação de quantidade de movimento e incluir os efeitos de forças corporais como termos fonte. O estado de tensão de um elemento de fluido é definido em termos da pressão e das componentes de tensão viscosa, τ , onde vale que:

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} \quad (4.25)$$

Deste modo, o tensor $\bar{\bar{\tau}}$ é uma matriz simétrica dada por:

$$\bar{\bar{\tau}} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{zx} \\ \tau_{zx} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Para fluidos newtonianos, os componentes do tensor tensão são dados por [70]:

$$\tau_{xz} = \mu \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (4.27)$$

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \gamma \nabla \vec{V} \quad (4.28)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \gamma \nabla \vec{V} \quad (4.29)$$

onde, μ é a viscosidade dinâmica e γ é uma viscosidade que relaciona as tensões com a deformação volumétrica. Assim, a atuação dos componentes de tensão sobre o elemento de fluido é mostrada na Fig 4.4.

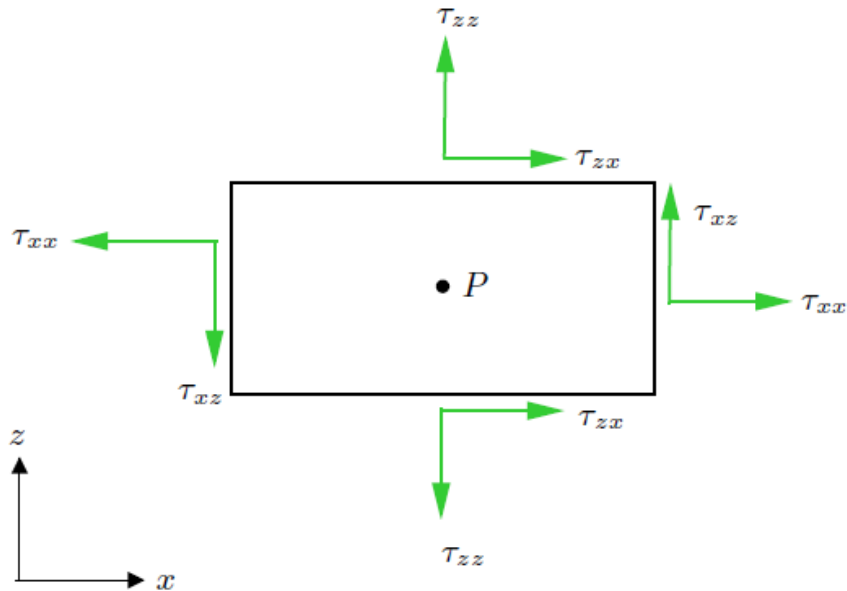


Figura 4.4: Componentes de tensão no elemento de fluido (adaptado de Versteeg e Malalasekera [70]).

Primeiro, considerando as forças de pressão e as componentes τ_{xx} , τ_{zx} e τ_{zz} apresentadas na Fig. 4.5, tem-se a magnitude de uma força resultante de uma tensão de superfície, que é o produto da tensão e da área. De acordo com Segundo Versteeg e Malalasekera [70], as forças alinhadas com a direção de um eixo de coordenadas recebem um sinal positivo e aquelas na direção oposta um sinal

negativo. A força resultante na direção x é a soma das componentes da força que atuam nessa direção no elemento de fluido, que são apresentadas na Fig. 4.5.

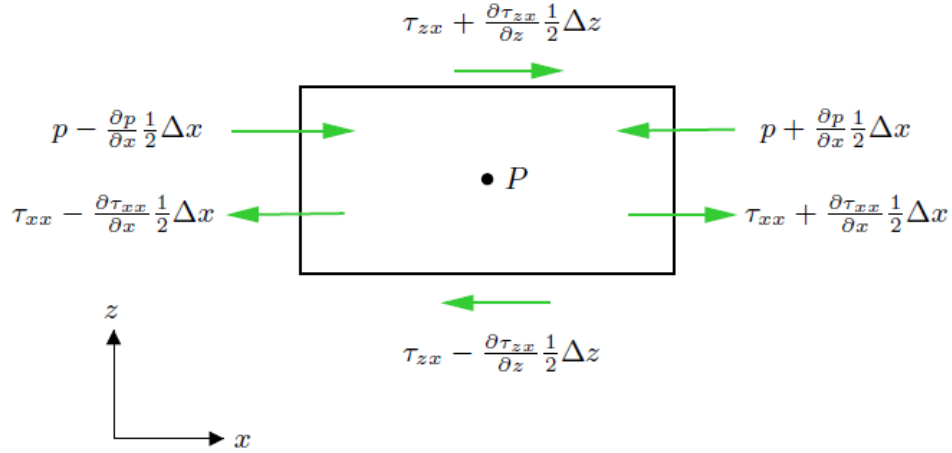


Figura 4.5: Forças de pressão e componentes de tensão na direção x (adaptado de Versteeg e Malalasekera [70]).

Assim, considerando as faces leste (l) e oeste (o), a soma das forças é dada por:

$$\begin{aligned}
 f_{l,o} = & \left[\left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right] \Delta z \\
 & + \left[- \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) + \left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right] \Delta z
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

logo:

$$f_{l,o} = \left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \Delta x \Delta z \tag{4.31}$$

Considerando as faces norte (n) e sul (s), tem-se a soma das forças dada por:

$$f_{n,s} = - \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{\Delta z}{2} \right) \Delta x + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{\Delta z}{2} \right) \Delta x \tag{4.32}$$

logo:

$$f_{n,s} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \Delta x \Delta z \quad (4.33)$$

Assim, a força total por unidade de volume no fluido na direção x é dada pela soma das Eqs. (4.31) e (4.33) dividida pela área ($\Delta x \Delta z$):

$$F_x = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (4.34)$$

Deste modo, igualando as Eqs. (4.22) e (4.34) e adicionando o termo fonte S_{Mx} , o componente x da equação da conservação da quantidade de movimento é dado por:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (4.35)$$

Analogamente, considerando a Eq. (4.23) e as forças de pressão e componentes de tensão na direção z , assim como o termo fonte S_{Mz} , tem-se o componente z da equação da conservação da quantidade de movimento:

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + S_{Mz} \quad (4.36)$$

Na sua forma vetorial, a equação de conservação da quantidade de movimento é dada por:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{S}_M \quad (4.37)$$

Como o termo fonte, S_M , inclui apenas forças de corpo, neste caso, a força gravitacional (g), temos [70]:

$$S_M = (0, -\rho g) \quad (4.38)$$

definindo o vetor \vec{g} como:

$$\vec{g} = (0, g) \quad (4.39)$$

Deste modo, a Eq. (4.37) é reescrita como:

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho(\nabla \cdot \vec{V})\vec{V} = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} - \rho \vec{g} \quad (4.40)$$

Ainda, destaca-se que, para viabilizar a simulação numérica da geração e propagação das ondas presentes nessa dissertação, foi utilizada a ferramenta de praia numérica, utilizada para a absorção da energia das ondas e, conseqüentemente, redução dos efeitos da reflexão das ondas que incidem no final do canal de ondas. Para utilizá-la, adiciona-se um termo sumidouro (S) à Eq. (4.40):

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho(\nabla \cdot \vec{V})\vec{V} = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} - \rho \vec{g} + S \quad (4.41)$$

onde, o termo S é dado por [45]:

$$S = - \left[C_1 \rho V + \frac{1}{2} C_2 \rho |V|V \right] \left(1 - \frac{z - z_{fs}}{z_b - z_{fs}} \right) \left(\frac{x - x_s}{x_e - x_s} \right)^2 \quad (4.42)$$

onde C_1 e C_2 são, respectivamente, os coeficientes de amortecimento linear e quadrático; V é o módulo da velocidade do fluido no ponto analisado; z_{fs} e z_b são, respectivamente, as posições verticais da superfície livre e do fundo do canal de ondas e, por fim, x_s e x_e são as posições de início e de fim da praia numérica, respectivamente. Ainda, seguindo as recomendações de Lisboa et al. [45], o coeficiente de amortecimento linear é definido como $C_1 = 20 \text{ s}^{-1}$, enquanto o coeficiente de amortecimento quadrático, é $C_2 = 0 \text{ m}^{-1}$.

Por fim, destaca-se que, como as equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas para a mistura das fases no volume de controle, é necessário obter a massa específica e viscosidade dinâmica para a mistura

de água e ar, que são descritas, respectivamente, como [67]:

$$\rho = \alpha_{\acute{a}gua}\rho_{\acute{a}gua} + \alpha_{ar}\rho_{ar} \quad (4.43)$$

$$\mu = \alpha_{\acute{a}gua}\mu_{\acute{a}gua} + \alpha_{ar}\mu_{ar} \quad (4.44)$$

4.3 Procedimentos Numéricos

Como citado, o software utilizado para a realização das simulações numéricas é o FLUENT, com isso, os seguintes parâmetros de simulação foram adotados para o controle da solução [19, 54]:

- *Upwind* de primeira ordem: utilizado para a discretização da equação da quantidade de movimento, assume que o valor da variável no centro do volume de controle pode ser considerado como o valor médio de todo o volume.
- PRESTO (*Pressure Staggering Option*): utilizado para a discretização da pressão, utiliza o balanço discreto da continuidade para um volume de controle inercial sobre a face para computar a pressão na face.
- *Geo reconstruct*: utilizado para a discretização da fração volumétrica, esse esquema assume que a interface entre dois fluidos tem uma inclinação linear dentro de cada célula, o que é utilizado para calcular a advecção do fluido através das faces da célula.
- PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*): utilizado para o acoplamento pressão-velocidade, baseia-se no grau mais alto da relação de aproximação entre as correções para a pressão e velocidade. O al-

goritmo possui duas correlações adicionais: correção das vizinhanças e correção *skewness*, com isso aumenta a eficiência do cálculo.

De acordo com Patankar [62], na solução iterativa das equações algébricas ou do esquema iterativo geral empregado para lidar com a não linearidade, muitas vezes é desejável acelerar ou diminuir as mudanças nas variáveis avaliadas de iteração em iteração. Segundo Versteeg e Malalasekera [70], o emprego de fatores de sub-relaxação, valores entre 0 e 1, permitem mover o processo iterativo adiante enquanto mantém-se a estabilidade dos cálculos. Nesse sentido, assim como em Machado [47], foram impostos fatores de sub-relaxação de 0,3 e 0,7 para as equações de pressão e da quantidade de movimento, respectivamente.

Além disso, considerou-se que o escoamento é transiente e ocorre no regime laminar. Quanto às soluções, estas foram consideradas convergidas quando os resíduos para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento foram menores do que 10^{-3} .

Por fim, todas as simulações numéricas foram realizadas em um computador com 4 processadores Intel Core de 3,40 GHz de clock e 16,00 Gb de memória RAM. Além do mais, a versão do FLUENT utilizada foi a 19.2. Assim, para todos os estudos foram considerados 900 s de geração e propagação das ondas, porém o tempo de processamento de cada simulação que considerou as ondas regulares foi de aproximadamente 48 h, enquanto, para os casos onde as ondas irregulares foram consideradas, o tempo de processamento foi de aproximadamente 12 h.

4.4 Descrição dos Casos

Na presente subseção serão apresentados os casos estudados, que são: a análise da influência da batimetria na geração e na propagação das ondas regulares representativas e irregulares realísticas e os estudos de avaliação geométrica

do CAO quando submetido às ondas regulares representativas e quando submetido às ondas irregulares realísticas. Para ambos os estudos foi considerado o estado de mar ocorrido em Tramandaí - RS no ponto de coordenadas geográficas $50^{\circ}06'18''\text{O}$ $29^{\circ}59'52''\text{S}$ (vide Fig. 4.6), situado a 2094,33 m da costa.

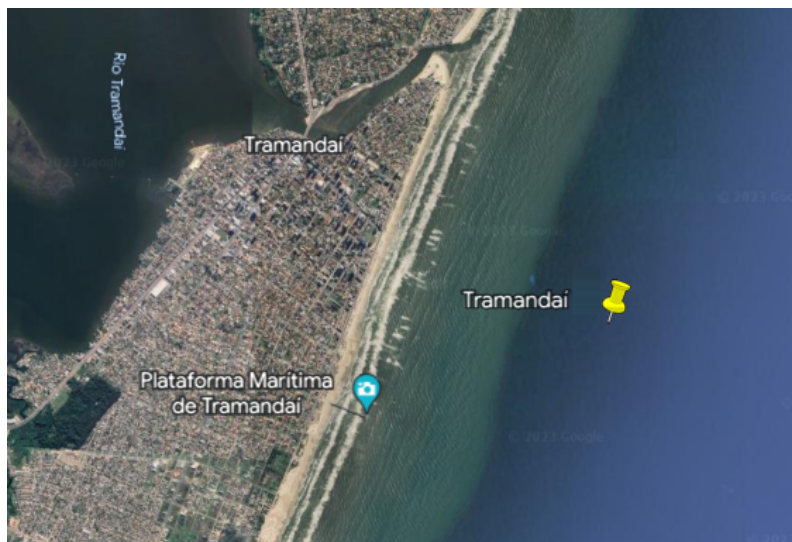


Figura 4.6: Ilustração do local de estudo.

O terceiro passo na aplicação da metodologia WaveMIMO [48] (vide Fig. 2.5) é a definição do espectro de ondas do local definido para o estudo, neste caso, Tramandaí. Como o banco de dados é oriundo de uma simulação realizada no TOMAWAC que considerou o ano de 2018 e um passo de tempo de 900 s, existem 35.040 espectros de ondas que contêm 900 s de dados estatísticos do estado de mar realístico e que correspondem à altura significativa (H_s) e ao período médio (T_m) das ondas que ocorreram no local determinado para este estudo.

Com isso, objetivando identificar o clima de ondas mais frequente nesta região e definir o estado de mar que o representa, foi elaborado um histograma bivariado que relaciona as ocorrências de H_s e T_m . Desse modo, na Fig. 4.7, são apresentadas as combinações mais frequentes para o estado de mar ocorrido em Tramandaí ao longo do ano de 2018.

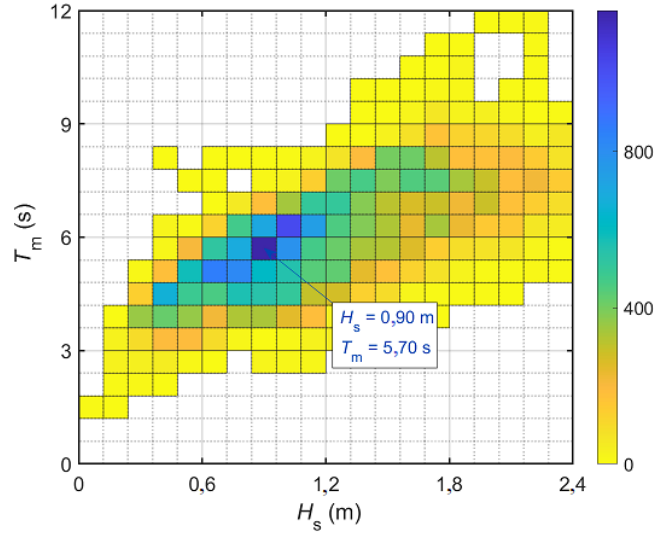


Figura 4.7: Histograma bivariado de H_s e T_m .

Sabendo que as ondas mais frequentes do estado de mar ocorrido em Tramandaí possuem $H_s = 0,90$ m e $T_m = 5,70$ s, utilizou-se a série de elevações que ocorreu no dia 28 de maio de 2018 das 10 h 14 min às 10 h 29 min. Através das características dessas ondas e da profundidade (h) da região escolhida para o estudo, utilizou-se a Eq. (2.31) para determinar o comprimento das ondas regulares que representam este estado de mar. Assim, as características das ondas regulares representativas são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características das ondas regulares representativas.

Característica	Nomenclatura	Medida
Altura Significativa	H_s (m)	0,90
Período Médio	T_m (s)	5,70
Comprimento de Onda	λ (m)	45,91
Profundidade	h (m)	10,98

Destaca-se que, no presente estudo, a geração das ondas regulares representativas ocorre através da imposição das velocidades u e w , descritas através

das Eqs. (2.27) e (2.28), como condição de contorno de entrada no FLUENT; enquanto, para as irregulares realísticas, foi utilizada a metodologia WaveMIMO, onde a série de elevações escolhida para o estudo foi decomposta em velocidades orbitais de propagação das partículas de água através das Eqs. (2.17) e (2.18).

4.4.1 Análise da Influência da Batimetria na Geração e na Propagação de Ondas Regulares Representativas e Irregulares Realísticas

O objetivo do presente estudo é analisar se há influência da batimetria na geração e na propagação de ondas regulares representativas e irregulares realísticas do estado de mar. Para isto, foram considerados dois domínios computacionais, o primeiro, denominado sem batimetria, apresenta o fundo horizontal (Fig. 4.8(a)), e o segundo, denominado com batimetria, apresenta a batimetria local, que foi obtida através das cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia¹ e Navegação da Marinha Brasileira e catalogadas por Cardoso [9] e inserida no domínio computacional através da inclinação encontrada em 11 pontos: $x = 0$ m; 10,45 m; 20,91 m; 31,36 m; 41,82 m; 50,18 m; 71,09 m; 81,55 m; 92,00 m e 102,46 m.

As dimensões de ambos os canais de ondas são: comprimento, $L_t = 229,56$ m, que corresponde a 5λ , de acordo com a recomendação de Gomes et al. [31]; altura, $H_t = 15,00$ m; e profundidade, h (vide Tabela 4.1), que é constante para os casos onde considera-se o fundo horizontal, e variável para os casos em que é considerada a batimetria, onde a lateral esquerda do canal de ondas possui dimensão h , enquanto, a lateral direita $h_1 = 10,52$ m (vide Fig. 4.8(b)). Quanto ao comprimento da praia numérica, seguindo a recomendação de Lisboa et al. [45], o mesmo é igual a 2λ .

¹www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-nauticas/cartas.html

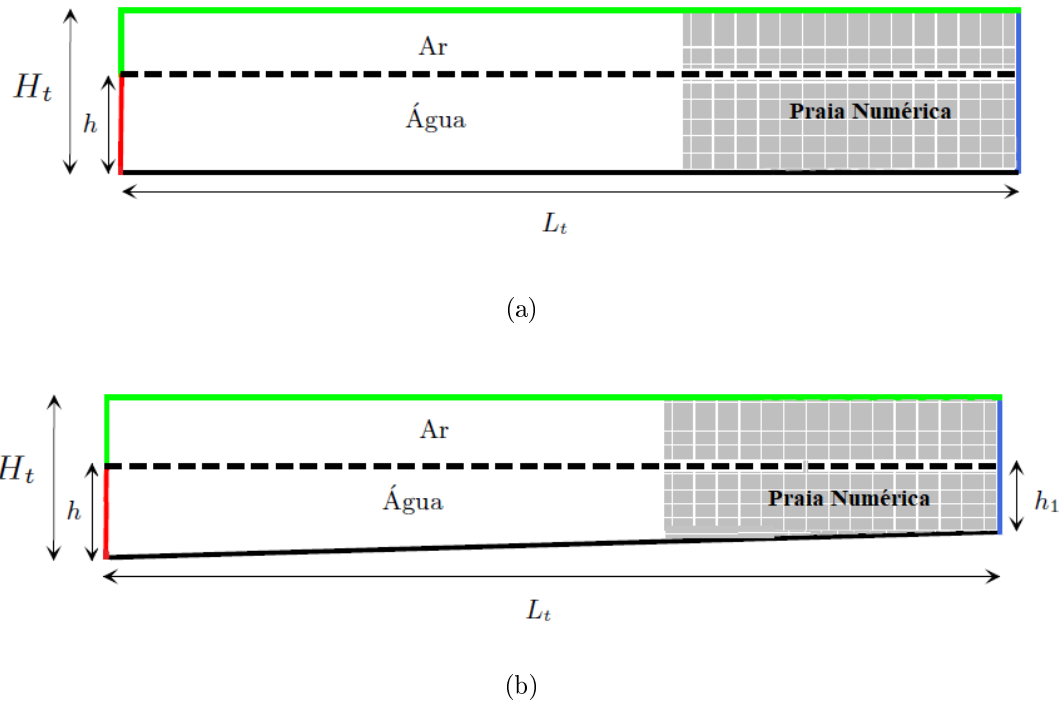


Figura 4.8: Domínios computacionais para a análise da influência da batimetria.

Com relação às condições de contorno, em ambos os casos foram consideradas: pressão atmosférica (linha verde); não deslizamento e impermeabilidade (linha contínua preta), onde as velocidades são nulas, ou seja, $u = 0$ m/s e $w = 0$ m/s; perfil hidrostático (linha azul), que é composta pela condição de contorno de pressão de saída, caracterizando um canal de escoamento aberto e pelo nível médio da água mantido constante e igual a h (no caso do canal sem batimetria - Fig. 4.8(a)) e h_1 (no caso do canal com batimetria - Fig. 4.8(b)), evitando, assim, que o canal de ondas esvazie. Ainda, conforme mencionado, a praia numérica (região cinza na Fig. 4.8) é utilizada para absorção da energia das ondas, evitando os efeitos da reflexão quando as ondas incidem no final do canal.

Além disso, tem-se a velocidade prescrita (linha vermelha), que é um segmento contínuo quando considerada a geração das ondas regulares representativas, neste caso as velocidades u e w (Eqs. (2.27) e (2.28)) são inseridas. Enquanto, nos casos onde é considerada a geração das ondas irregulares realísticas este seg-

mento é subdividido em 14 subsegmentos de tamanho $h/14$, conforme recomendado por Machado et al. [48] e ilustrado na Fig. 4.9.

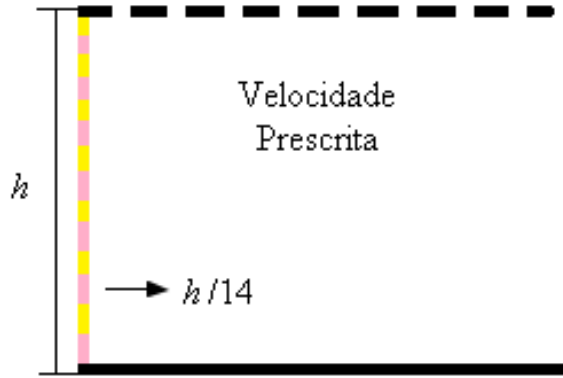


Figura 4.9: Ilustração da subdivisão dos segmentos.

Com relação à discretização espacial, utilizou-se uma malha do tipo *stretched* [30], vide Fig. 4.10, onde o domínio computacional foi subdividido, verticalmente, em 3 regiões: R_1 , a região que contém apenas o ar, foi discretizada em 20 células computacionais; R_2 , a região da superfície livre, ou seja, a interface ar/água, foi discretizada em 40 células computacionais; e R_3 , a região que contém apenas a água, foi discretizada em 60 células computacionais. Horizontalmente tem-se a região R_4 , subdividida em 50 células computacionais por comprimento de onda, ou seja, ao todo foram empregadas 250 células computacionais nesta direção.

Por fim, com relação à discretização temporal, nas simulações onde foi considerada a geração das ondas regulares representativas empregou-se um passo de tempo $T/500$, equivalente a $\Delta t = 0,0114$ s, conforme recomendado por Gomes [33]. Por outro lado, nas simulações onde foram consideradas as ondas irregulares realísticas, utilizou-se $\Delta t = 0,05$ s, conforme recomendado por Machado et al. [48]. Para todas as simulações realizadas considerou-se 900 s de geração e propagação das ondas.

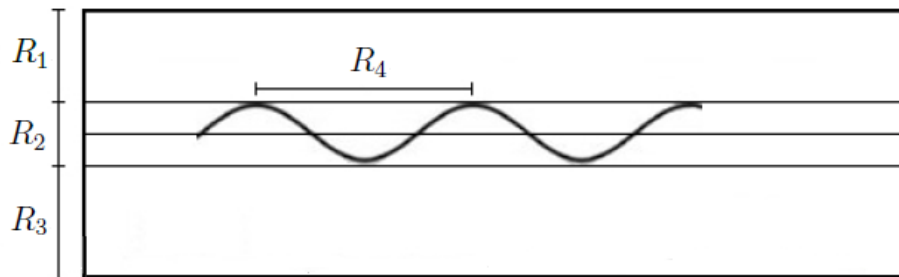


Figura 4.10: Ilustração da malha *stretched* considerando o canal de ondas sem batimetria (adaptado de Gomes et al. [30]).

4.4.2 Otimização Geométrica do CAO Submetido às Ondas Regulares Representativas e às Ondas Irregulares Realísticas

Nestes estudos é considerado o dispositivo CAO, utilizado para conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica. Para tanto, os domínios computacionais consistem, basicamente, em um dispositivo CAO situado no centro do canal de ondas numérico. A principal diferença entre estes estudos é o clima de ondas no qual o dispositivo CAO é submetido e avaliado geometricamente, no primeiro, é considerada a incidência das ondas regulares representativas e, no segundo, a incidência das ondas irregulares realísticas.

Os domínios computacionais são apresentados na Figura 4.11, e consistem na inserção do dispositivo CAO no domínio computacional apresentado na Fig. 4.8(b). Com isso, as dimensões do canal de ondas não se alteram, logo: $L_t = 229,56$ m; $H_t = 15,00$ m; $h = 10,98$ m; e $h_1 = 10,52$ m, assim como o comprimento da praia numérica de 2λ , conforme recomendado por Lisboa et al. [45]. Com relação ao CAO, conforme recomendado por De Lima [19], o dispositivo foi inserido a $1,5\lambda$ do início do canal de ondas, ou seja, da zona de geração das ondas e a espessura das suas laterais é $e = 0,1$ m.

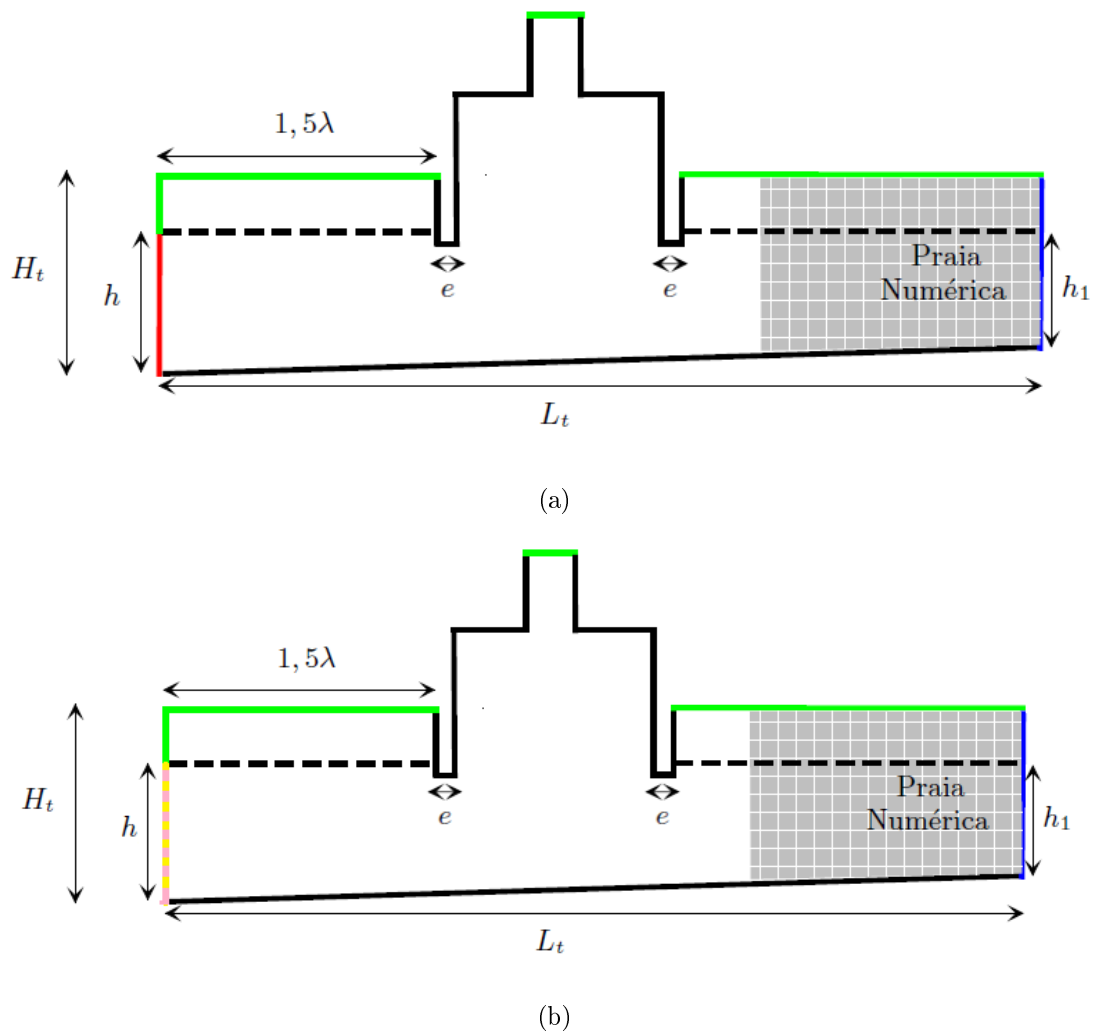


Figura 4.11: Domínio computacional: (a) para ondas regulares representativas e (b) para ondas irregulares realísticas.

Com relação às condições de contorno do canal de ondas, foram mantidas: pressão atmosférica (linha verde); não deslizamento ou impermeabilidade (linha contínua preta); perfil hidrostático (linha azul); e velocidade de entrada, onde, na Fig. 4.11(a) é caracterizada pela linha contínua vermelha e, neste segmento, as velocidades u e w (Eqs. (2.27) e (2.28)) são inseridas; e, na Fig. 4.11(b), é caracterizada pela linha pontilhada rosa e amarela, onde, conforme recomendado por Machado et al. [48], em cada um dos 14 subsegmentos as velocidades discretas de propagação das ondas irregulares são inseridas.

No que tange a avaliação geométrica do dispositivo CAO, conforme mencionado, na Seção 3.2.1, a adaptação do CAO instalado na Ilha do Pico ($H_1/L = 1,1167$), foi tomada como base para este estudo, ou seja, foram avaliadas diferentes razões do grau de liberdade H_1/L no entorno desta. A partir disto e das Eqs. (3.6) e (3.9), a Tabela 4.2 apresenta as configurações geométricas avaliadas em Maciel [49] e no presente estudo. Ainda, destaca-se que, H_3 se mantém constante e igual a 6,12 m e que a razão $H_1/L = 0,1985$ foi o caso ótimo encontrado em Maciel [49], ou seja, aquele onde houve maior aproveitamento da energia contida nas ondas.

Tabela 4.2: Configurações das geometrias avaliadas.

H_1/L	H_1 (m)	L (m)
0,1985	5,65	28,46
0,4297	8,31	19,34
0,6608	10,31	15,16
0,8920	11,98	13,43
1,1167	13,40	12,00
1,3543	14,76	10,90
1,5854	15,97	10,07
1,8166	17,09	9,41
2,0478	18,15	8,86
2,2789	19,14	8,40

Ainda, na Figura 4.12 é possível observar uma ilustração das configurações geométricas dos casos extremos avaliados neste estudo: $H_1/L = 0,1985$ (Fig. 4.12(a)) e $H_1/L = 2,2789$ (Fig. 4.12(c)) assim como o caso intermediário (Fig. 4.12(b)), $H_1/L = 1,1167$. Por fim, destaca-se que o caso intermediário é uma adaptação do dispositivo instalado na Ilha do Pico.

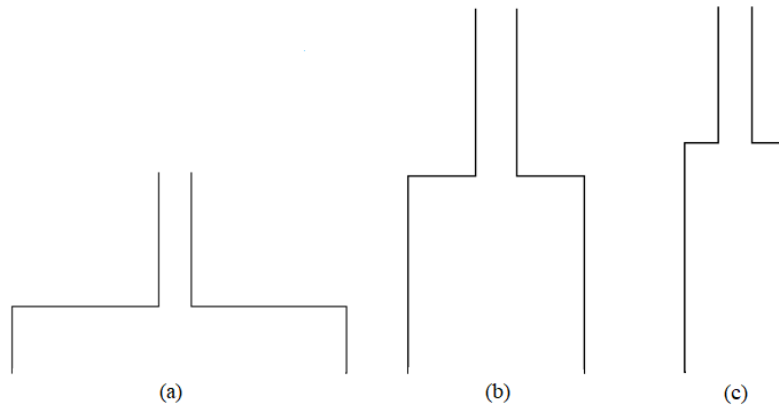


Figura 4.12: Ilustração da variação que a geometria do CAO sofre ao longo do processo de avaliação geométrica.

Quanto à discretização espacial do canal de ondas, assim como nos estudos anteriores, utilizou-se uma malha do tipo *stretched* [30] tanto para as regiões à montante quanto à jusante do dispositivo. Já o CAO foi discretizado, conforme a recomendação de De Lima [19], em células quadradas de 0,1 m. Destaca-se que esta discretização do domínio computacional foi empregada para todos os casos avaliados. Ainda, na Fig. 4.13 é possível observar a malha considerando o caso $H_1/L = 0,1985$.

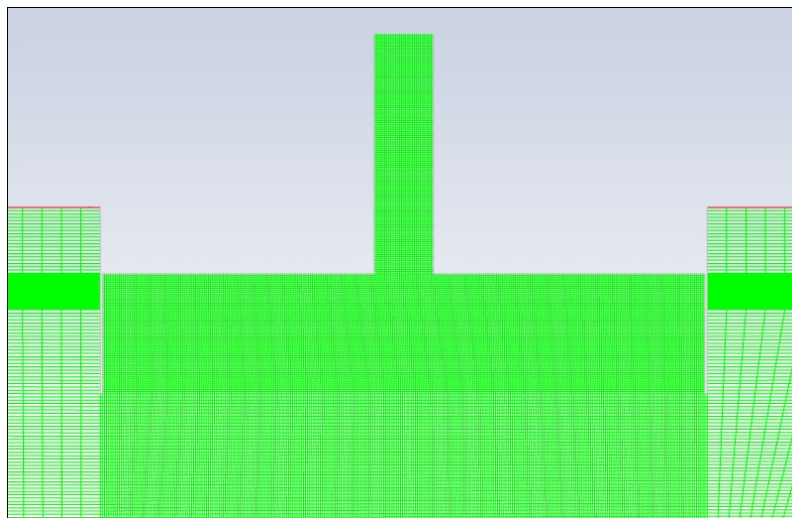


Figura 4.13: Ilustração da discretização do domínio no dispositivo CAO considerando o caso $H_1/L = 0,1985$.

Por fim, com relação à discretização temporal, os mesmos passos de tempo do estudo anterior foram adotados, bem como o tempo total de simulação.

4.5 Monitoramento e Análise dos Resultados

Para avaliar os resultados das simulações numéricas realizadas nos estudos de avaliação da influência da batimetria na geração e propagação das ondas (apresentados na Seção 4.4.1) foram utilizadas sondas de monitoramento da elevação da superfície livre, dadas através de linhas verticais inseridas do fundo ao topo do canal de ondas. Essas sondas calculam a elevação da superfície livre através de [54]:

$$\int \Phi dA = \sum_{i=1}^n \Phi_i |A_i| \quad (4.45)$$

onde Φ_i a quantidade de água em cada volume de controle (m); A_i é a área de cada volume de controle, que, por se tratar de um caso bidimensional, representa a altura de cada volume; n o número de volumes de controle.

No estudo da influência da batimetria e na verificação da geração das ondas regulares representativas e irregulares realísticas, a fim de monitorar os resultados obtidos, foram utilizadas sondas nas posições $x = 0; 10,45; 20,91; 31,36; 41,82; 50,18; 71,09; 81,55; 92,00$ e $102,46$ m. Quanto aos estudos de otimização geométrica do CAO submetido às ondas regulares representativas e irregulares realísticas (apresentados na Seção 4.4.2), foi utilizada uma sonda (s) para monitorar a pressão estática e a vazão mássica do ar, através das integrais dadas, respectivamente, por [54]:

$$\frac{1}{A} \int \Phi dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \Phi_i |A_i| \quad (4.46)$$

$$\int \rho_{ar} \vec{v} \cdot d\vec{A} = \sum_{i=1}^n \rho_{ar,i} \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \quad (4.47)$$

onde \vec{v} representa o vetor velocidade na direção vertical; ρ_{ar} a massa específica do ar e A_i a área da superfície que é atravessada pelo escoamento de ar. Para tanto, a sonda s foi inserida no centro do duto da turbina do CAO, como ilustrado na 4.14.

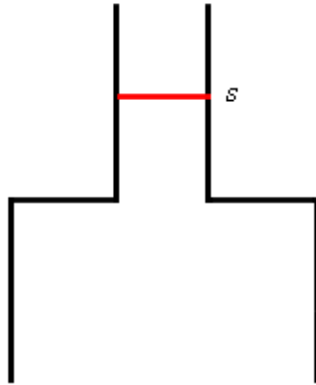


Figura 4.14: Ilustração da sonda horizontal para monitoramento no dispositivo CAO.

Com isso, foi possível calcular a potência hidropneumática, dada através de [24]:

$$P_H = \left(p + \frac{1}{2} \rho_{ar} v_{ar}^2 \right) v_{ar} \frac{\pi l^2}{4} \quad (4.48)$$

onde v_{ar} é a velocidade do ar no duto e l o diâmetro do duto da turbina.

A vazão mássica do ar pode ser calculada através da equação:

$$\dot{m} = v_{ar} A_{duto} \rho_{ar} \quad (4.49)$$

onde A_{duto} é a área do duto da turbina, dada por:

$$A_{\text{duto}} = \frac{\pi l^2}{4} \quad (4.50)$$

Portanto, a Eq. (4.48) pode ser reescrita como:

$$P_H = \left(p + \frac{1}{2} \rho_{ar} v_{ar}^2 \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (4.51)$$

Devido ao fato de que os dados monitorados são dados discretos, para a análise dos resultados do estudo da influência da batimetria na geração e na propagação das ondas regulares representativas e irregulares realísticas, foram consideradas as métricas MAE (*Mean Absolute Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*), dadas, respectivamente, por [12]:

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - P_i|}{N} \quad (4.52)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (4.53)$$

onde, O_i representa o valor encontrado numericamente, P_i representa o valor usado como referência e N representa o número total de dados.

Ainda, no estudo de otimização geométrica do CAO submetido às ondas regulares representativas e às ondas irregulares realísticas, a fim de avaliar as geometrias estudadas e determinar a razão H_1/L que maximiza a potência hidropneumática obtida, bem como a pressão estática e a vazão mássica do ar, foi utilizada a média RMS (*Root Mean Square*) [40]:

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N X_k^2}{N}} \quad (4.54)$$

onde X representa a grandeza a ser calculada.

5 RESULTADOS

5.1 Análise da Influência da Batimetria na Geração e na Propagação de Ondas Regulares Representativas

Conforme mencionado, este estudo tem como objetivo avaliar se há influência da batimetria do canal de ondas na geração e na propagação das ondas regulares representativas. Para avaliar as diferenças no que tange a geração e a propagação das ondas nos canais de ondas com e sem batimetria, foram consideradas duas análises. Na primeira, os resultados numéricos monitorados em 11 pontos da batimetria ($x = 0$ m; 10,45 m; 20,91 m; 31,36 m; 41,82 m; 50,18 m; 71,09 m; 81,55 m; 92,00 m e 102,46 m) foram comparados com os resultados da solução analítica (dada através da Eq. (2.26)).

Na segunda análise, os resultados numéricos encontrados nas simulações dos canais de ondas com e sem batimetria foram comparados. Para isso, foram tomados como referência os resultados obtidos para o canal de ondas com batimetria, considerando os 11 pontos utilizados no estudo anterior. Tendo em vista que o fundo do canal com batimetria representa o fundo oceânico encontrado no local do estudo, em Tramandaí.

Ainda, destaca-se que além da discussão acerca da influência da batimetria na elevação da superfície livre das ondas, o primeiro estudo é utilizado para a verificação da geração das ondas regulares representativas. Assim, na Tabela 5.1 são apresentados os resultados da primeira análise, onde as métricas MAE e RMSE, obtidas, respectivamente, através das Eqs. (4.52) e (4.53), são consideradas para comparar quantitativamente os resultados das simulações numéricas com o resultado analítico.

Tabela 5.1: Resultados das simulações do estudo de influência da batimetria comparados à equação da elevação da superfície livre (Eq. 2.26).

Posição da Sonda (m)	Com Batimetria		Sem Batimetria	
	MAE (m)	RMSE (m)	MAE (m)	RMSE (m)
0	0,0235	0,0302	0,0235	0,0302
10,45	0,0340	0,0445	0,0340	0,0446
20,91	0,0461	0,0581	0,0463	0,0583
31,36	0,0332	0,0470	0,0336	0,0474
41,82	0,0458	0,0601	0,0468	0,0611
50,18	0,0521	0,0678	0,0536	0,0693
60,64	0,0396	0,0567	0,0412	0,0583
71,09	0,0521	0,0700	0,0550	0,0727
81,55	0,0698	0,0874	0,0738	0,0912
92,01	0,0527	0,0728	0,0573	0,0770
102,46	0,0699	0,0896	0,0761	0,0955

Conforme pode ser observado na Tabela 5.1, quando comparada aos resultados analíticos, a elevação da superfície livre monitorada em cada um dos 11 pontos da batimetria não apresenta diferenças consideráveis para as simulações realizadas nos canais de ondas com ou sem batimetria. De todo modo, observa-se resultados ligeiramente mais precisos quando considerada a batimetria no canal de ondas. Conforme esperado, destaca-se que não foram encontradas diferenças nas elevações da superfície livre monitorada na zona de geração ($x = 0$ m), já que este ponto da batimetria não apresenta inclinação. Já, para os resultados monitorados na sonda localizada em $x = 41,82$ m, as diferenças entre as elevações considerando as métricas MAE e RMSE são, respectivamente, 2,13% e 1,63%.

A fim de considerar o local onde o dispositivo CAO deve ser alocado, a $1,5\lambda$ da zona de geração das ondas, conforme De Lima [19], avaliou-se os resultados

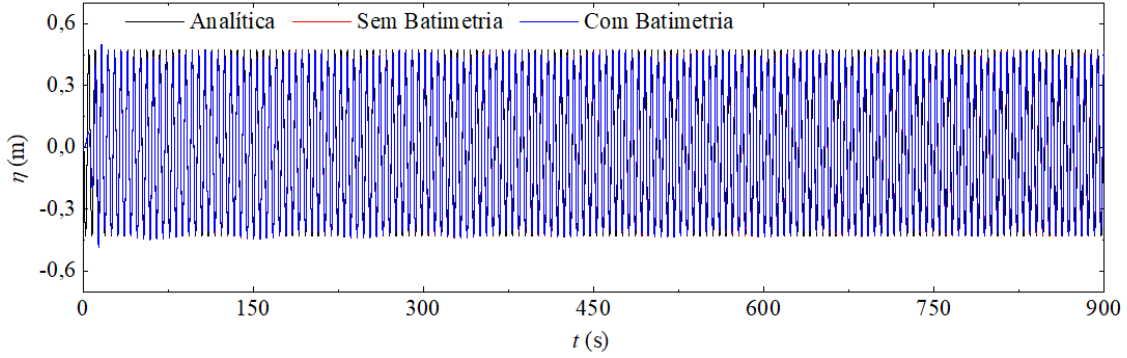
monitorados na sonda localizada em $x = 71,09$ m, onde encontrou-se diferenças de 5,56% e 3,85%, respectivamente, quando comparadas às métricas MAE e RMSE encontradas nas simulações considerando o canal de ondas com e sem batimetria. Ainda, foi possível observar que a diferença entre as métricas MAE e RMSE encontradas para os canais de ondas com e sem batimetria é diretamente proporcional à posição das sondas de monitoramento, ou seja, quanto maior a inclinação do fundo do canal de ondas, maior a diferença entre as métricas.

A Figura 5.1 apresenta a elevação da superfície livre obtida em $x = 41,82$ m quando consideradas as ondas regulares representativas geradas nos canais de ondas com e sem batimetria, assim como a elevação da superfície livre calculada analiticamente que, junto dos resultados apresentados na Tabela 5.1, permite a verificação da geração das ondas. Destaca-se que, essa sonda foi avaliada pelo fato de que em $x = 41,82$ m têm-se, aproximadamente, um comprimento de onda ($\lambda = 45,91$ m).

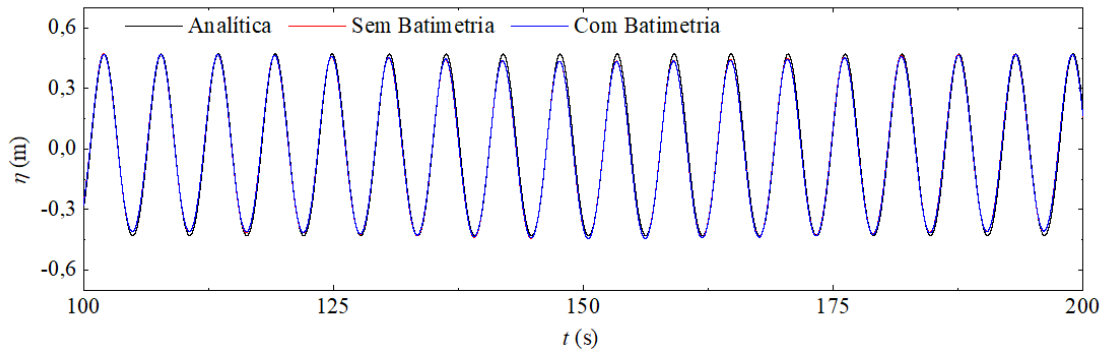
Qualitativamente, na Fig. 5.1(a) observa-se que as ondas regulares representativas são geradas adequadamente, fato este que pode ser observado com maiores detalhes na Fig. 5.1(b), que considera $100 \text{ s} \leq t \leq 200 \text{ s}$. Na Fig. 5.1(a), para $t \leq 20 \text{ s}$, nota-se uma diferença entre os resultados numéricos e analítico, que se dá devido ao fato de que o escoamento parte do repouso e, em função da inércia, as primeiras ondas geradas no canal numérico são amortecidas, o que leva a desvios na comparação com os resultados analíticos. Conforme pode ser observado, esse amortecimento diminui com o avanço do tempo de simulação.

Quantitativamente, as métricas MAE e RMSE apresentadas na Tabela 5.1 foram utilizadas para confirmar os resultados observados. Considerando o canal de ondas sem batimetria, as diferenças MAE e RMSE foram de 0,0468 m e 0,0611 m, respectivamente; enquanto, no canal de ondas com batimetria as diferenças MAE e RMSE foram de 0,0458 m e 0,0601 m, respectivamente. Assim, esses resultados

confirmam a geração apropriada de ondas regulares representativas nos canais de ondas com e sem batimetria.



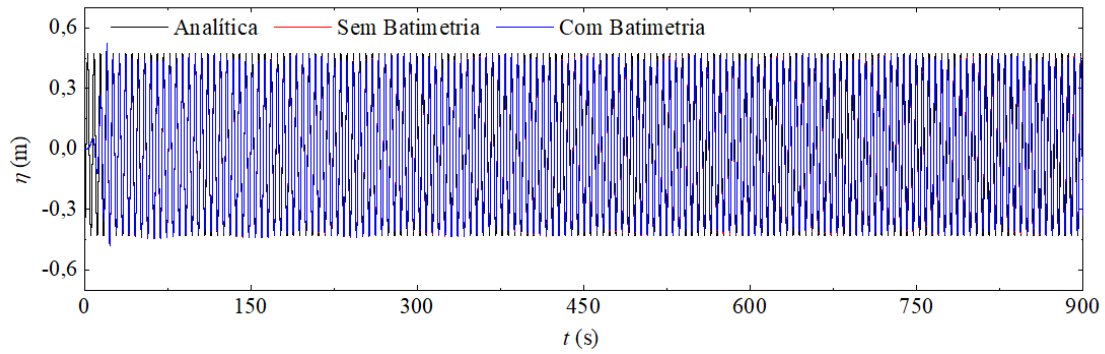
(a)



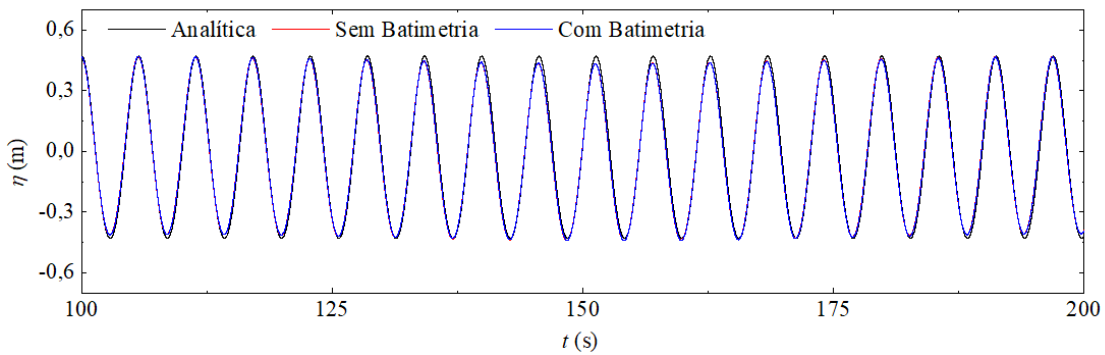
(b)

Figura 5.1: Elevação da superfície livre monitorada pela sonda posicionada em $x = 41,82$ m em: (a) $t \leq 900$ s e (b) $100 \text{ s} \leq t \leq 200$ s.

Já na Figura 5.2, é apresentada a elevação da superfície livre das ondas regulares representativas geradas nos canais de ondas com e sem batimetria e a elevação da superfície livre calculada analiticamente na posição $x = 71,09$ m. Destaca-se que essa sonda foi escolhida para a avaliação pelo fato de ser próxima à localização do canal de ondas recomendada para inserção do CAO [19].



(a)



(b)

Figura 5.2: Elevação da superfície livre monitorada pela sonda posicionada em $x = 71,09$ m em: (a) $t \leq 900$ s e (b) $100 \text{ s} \leq t \leq 200$ s.

Qualitativamente, através da Fig. 5.2(a), também é permitido perceber que as ondas regulares representativas são geradas adequadamente, o que é possível observar em maiores detalhes na Fig. 5.2(b), onde é considerado $100 \text{ s} \leq t \leq 200$ s. Os efeitos da condição inicial de inércia do escoamento podem ser visualizados na Fig. 5.2(a) em $t \leq 20$ s. Quantitativamente, assim como no caso anterior, as métricas MAE e RMSE apresentadas na Tabela 5.1 foram utilizadas para confirmar os resultados observados, onde as diferenças MAE e RMSE foram de 0,0550 m e 0,0727 m, respectivamente, quando considerando o canal de ondas sem batimetria; e de 0,0521 m e 0,0700 m, respectivamente, considerando o canal de ondas com batimetria. Novamente, confirma-se a geração e a propagação apropriada das ondas regulares representativas nos canais de ondas com e sem batimetria.

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados da segunda análise, onde as métricas MAE e RMSE são consideradas na comparação dos resultados referentes à elevação da superfície livre obtidos para os canais de ondas com e sem batimetria. Conforme mencionado, para a análise destes resultados, foram tomados como referência os resultados encontrados para o caso onde a batimetria é considerada no canal de ondas.

Tabela 5.2: Resultados MAE e RMSE considerando os casos de batimetria submetidos a ondas regulares representativas onde o caso com batimetria é tomado como referência.

Posição da Sonda (m)	MAE (m)	RMSE (m)
0	0,0010	0,0013
10,45	0,0034	0,0042
20,91	0,0034	0,0042
31,36	0,0034	0,0042
41,82	0,0035	0,0043
50,18	0,0036	0,0044
60,64	0,0038	0,0047
71,09	0,0043	0,0053
81,55	0,0048	0,0059
92,01	0,0059	0,0070
102,46	0,0069	0,0081

Conforme observado na Tabela 5.2, as menores diferenças são encontradas nas 7 primeiras sondas, isso se deve ao fato de que a batimetria praticamente não interfere nesta região, devido à pouca diferença na inclinação do fundo, que varia de $0,098^\circ$ à $0,094^\circ$. Além disso, observa-se que as métricas MAE e RMSE são diretamente proporcionais à inclinação do fundo do canal, ou seja, as maiores diferenças são encontradas na sonda localizada em $x = 102,46$ m. Ainda, quando comparadas

as métricas MAE e RMSE com H_s nas posições $x = 0$ m, 71,09 m e 102,46 m, são encontradas diferenças de 0,12% e 0,15%; 0,48% e 0,59%; e, 0,77% e 0,90%, respectivamente. Por fim, os resultados das duas análises indicam a utilização da batimetria no canal de ondas quando consideradas ondas regulares representativas.

5.2 Análise da Influência da Batimetria na Geração e na Propagação das Ondas Irregulares Realísticas

Como mencionado, este estudo objetiva avaliar se há influência da batimetria do canal de ondas na geração e na propagação das ondas irregulares realísticas. Para avaliar as diferenças, no que tange a geração e a propagação das ondas irregulares realísticas nos canais de ondas com e sem batimetria, na Tabela 5.3 são apresentados os resultados numéricos obtidos para ambos os casos, que foram monitorados e comparados considerando os 11 pontos da batimetria. Salienta-se que foram considerados como referência os resultados obtidos para o canal de ondas com batimetria, pois o fundo deste canal representa o fundo oceânico encontrado no local do estudo e considerado na simulação realizada na TOMAWAC que originou as condições de contorno impostas no FLUENT.

Conforme observado na Tabela 5.3, as menores diferenças MAE e RMSE ocorrem nas sondas centrais, especialmente, próximo à região do canal de ondas onde é recomendada a inserção do CAO ($x = 71,09$ m). Considerando esta sonda, e comparando as métricas MAE e RMSE com H_s , são encontradas diferenças de 0,48% e 0,59%. Destaca-se, que as maiores diferenças na elevação da superfície livre ocorrem na posição $x = 102,46$ m e, ao comparar as métricas MAE e RMSE com H_s , foram encontradas diferenças de 0,67% e 0,87%, respectivamente.

Tabela 5.3: Resultados MAE e RMSE considerando os casos de batimetria submetidos a ondas irregulares realísticas onde o caso com batimetria é tomado como referência.

Posição da Sonda (m)	MAE (m)	RMSE (m)
0	0,0057	0,0076
10,45	0,0054	0,0071
20,91	0,0048	0,0063
31,36	0,0045	0,0059
41,82	0,0045	0,0059
50,18	0,0044	0,0057
60,64	0,0042	0,0053
71,09	0,0043	0,0053
81,55	0,0046	0,0059
92,01	0,0054	0,0069
102,46	0,0060	0,0078

A Figura 5.3 apresenta a elevação da superfície livre das ondas irregulares realísticas monitoradas em $x = 71,09$ m considerando os canais de ondas sem e com batimetria. Na Fig. 5.3(a) observa-se, integralmente, os 900 s de ondas irregulares geradas e propagadas; enquanto, a Fig. 5.3(b) destaca o intervalo $100 \text{ s} \leq t \leq 200 \text{ s}$ com o objetivo de viabilizar a visualização e a comparação dos resultados. Qualitativamente, é possível identificar que a elevação da superfície livre das ondas irregulares realísticas não é afetada de maneira considerável pela batimetria do canal de ondas, devido às métricas MAE e RMSE permanecerem baixas. Deste modo, e com base nos resultados apresentados na Tabela 5.3, é indicada a utilização da batimetria no canal de ondas quando consideradas as ondas irregulares realísticas.

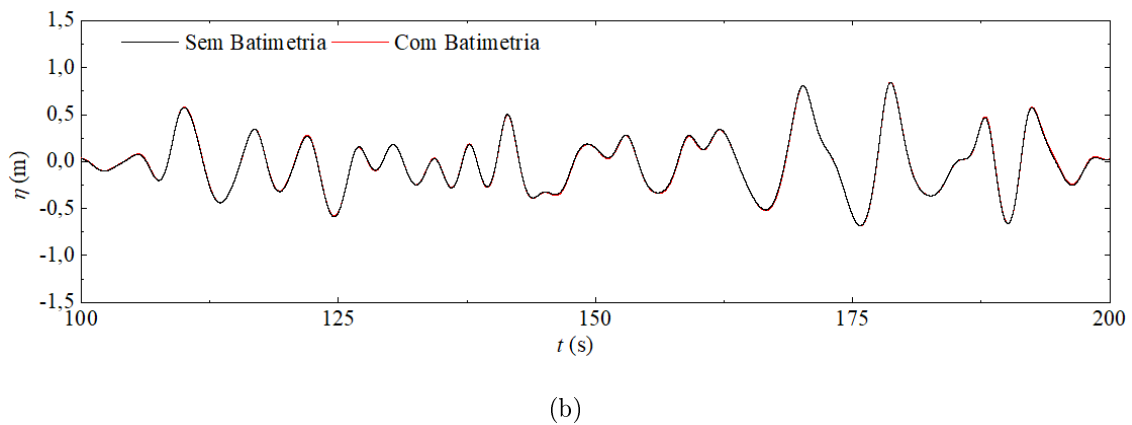
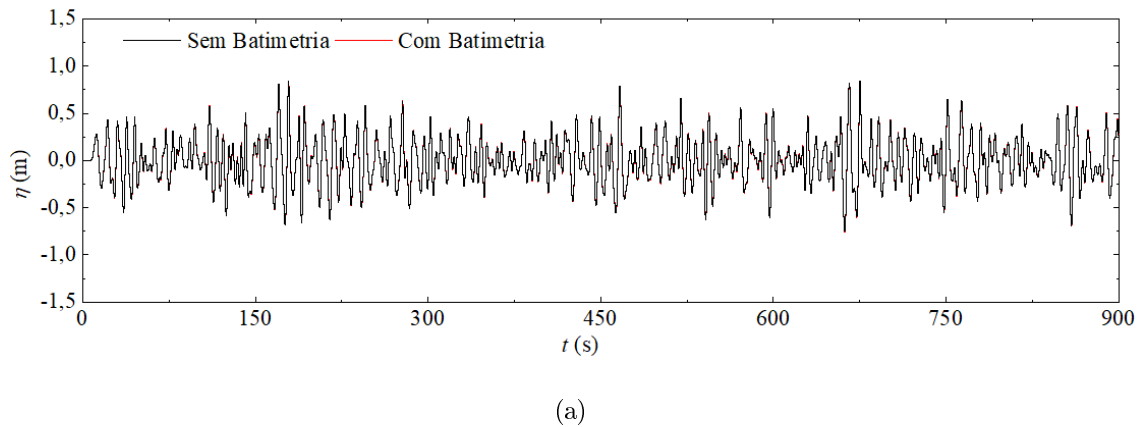
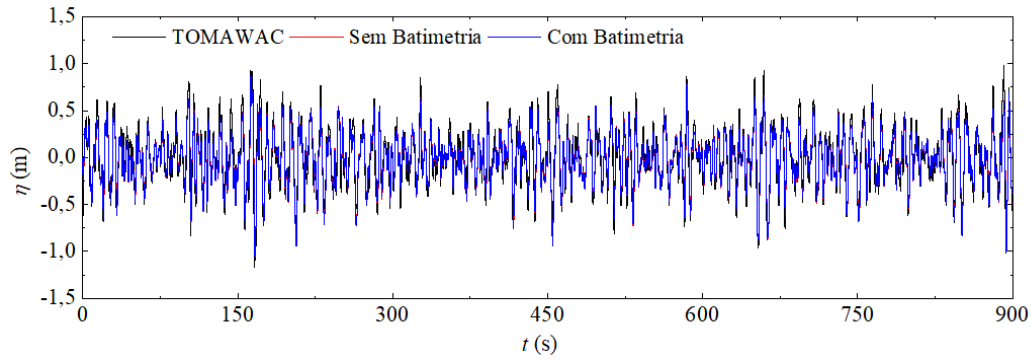
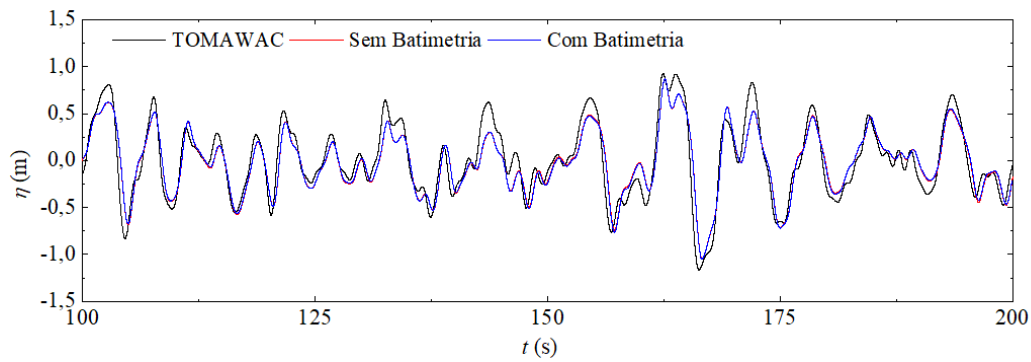


Figura 5.3: Elevação da superfície livre monitorada pela sonda posicionada em $x = 71,09$ m em: (a) $t \leq 900$ s e (b) 100 s $\leq t \leq 200$ s.

Na Figura 5.4, são apresentadas, considerando $x = 0$ m, a elevação da superfície livre das ondas geradas numericamente nos canais de ondas com e sem batimetria, além da elevação da superfície livre obtida no TOMAWAC, o que permite verificar a geração das ondas irregulares realísticas. Destaca-se que esta verificação é realizada na zona de geração devido a uma restrição da metodologia WaveMIMO [48], uma vez que o TOMAWAC fornece dados apenas do local escolhido para o estudo, não sendo possível obter a série de elevações da superfície livre em outras posições do canal de ondas.



(a)



(b)

Figura 5.4: Elevação da superfície livre monitorada pela sonda posicionada em $x = 0$ m em: (a) $t \leq 900$ s e (b) $100 \text{ s} \leq t \leq 200$ s.

Como pode ser observado na Fig. 5.4(a), as ondas geradas numericamente em ambos os canais de ondas (com e sem batimetria) reproduzem adequadamente a série de elevações da superfície livre obtida no TOMAWAC, o que pode ser observado com maiores detalhes na Fig. 5.4(b). As métricas MAE e RMSE foram utilizadas para confirmar os resultados qualitativos, para isso, foram comparadas as elevações da superfície livre obtidas nos dois canais de ondas (com e sem batimetria) simulados FLUENT com a elevação da superfície livre obtida no TOMAWAC.

Considerando o canal de ondas sem batimetria, foram obtidas métricas MAE e RMSE, respectivamente, iguais a 0,0892 m e 0,1144 m; enquanto, quando considerado o canal de ondas com batimetria, as diferenças foram de 0,0889 m e

0,1141 m, respectivamente. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Paiva et al. [61], Maciel et al. [51], Maciel et al. [52], Cisco et al. [15] e Machado et al. [48] e verificam a geração das ondas irregulares realísticas, encontradas em Tramandaí – RS, através da metodologia WaveMIMO. Além disso, esta análise corrobora a indicação da utilização do canal de ondas com batimetria, já que as diferenças MAE e RMSE encontradas para este canal, considerando a zona de geração, são ligeiramente inferiores às encontradas quando considerado o canal de ondas com fundo plano.

5.3 Estudo de Otimização Geométrica do CAO Submetido às Ondas Regulares Representativas

Com base nos resultados obtidos no estudo acerca da influência da batimetria na geração de ondas regulares representativas (Seção 5.1), o dispositivo CAO foi inserido no canal de ondas com batimetria. Na sequência, foram consideradas diversas geometrias para o CAO com o objetivo de realizar a otimização geométrica da câmara hidropneumática do dispositivo, através do Design Construtal associado à Busca Exaustiva, e, com isso, maximizar a potência hidropneumática disponível quando o CAO é submetido às ondas regulares representativas do estado de mar encontrado em Tramandaí. Para tanto, foi considerado o domínio computacional apresentado na Fig. 4.11(a) e o grau de liberdade H_1/L , que é a razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática do CAO, foi variado conforme apresentado na Tabela 4.2.

A Figura 5.5 apresenta os resultados obtidos para potência hidropneumática, calculados através da Eqs. (4.51) e (4.54), conforme variado o grau de liberdade H_1/L . É possível observar o valor máximo dentre as potências hidropneumáticas disponíveis, ou seja, o caso ótimo, que ocorre quando $(H_1/L)_o = 0,4297$ ($H_1 = 8,31$ m e $L = 19,34$ m), onde é encontrada uma $P_{H(RMS)}$ de 53,15 W. Para o caso

intermediário, que possui as dimensões do dispositivo instalado na Ilha do Pico e com $H_1/L = 1,1167$ ($H_1 = 13,40$ m e $L = 12,00$ m), encontrou-se uma $P_{H(\text{RMS})} = 43,06$ W, que é aproximadamente 19% inferior à $P_{H(\text{RMS})}$ encontrada para o caso ótimo. Quanto ao pior caso, que ocorreu quando $H_1/L = 0,1985$ ($H_1 = 5,65$ m e $L = 28,46$ m), encontrou-se uma $P_{H(\text{RMS})} = 28,19$ W, que é aproximadamente 47% inferior à encontrada no caso ótimo.

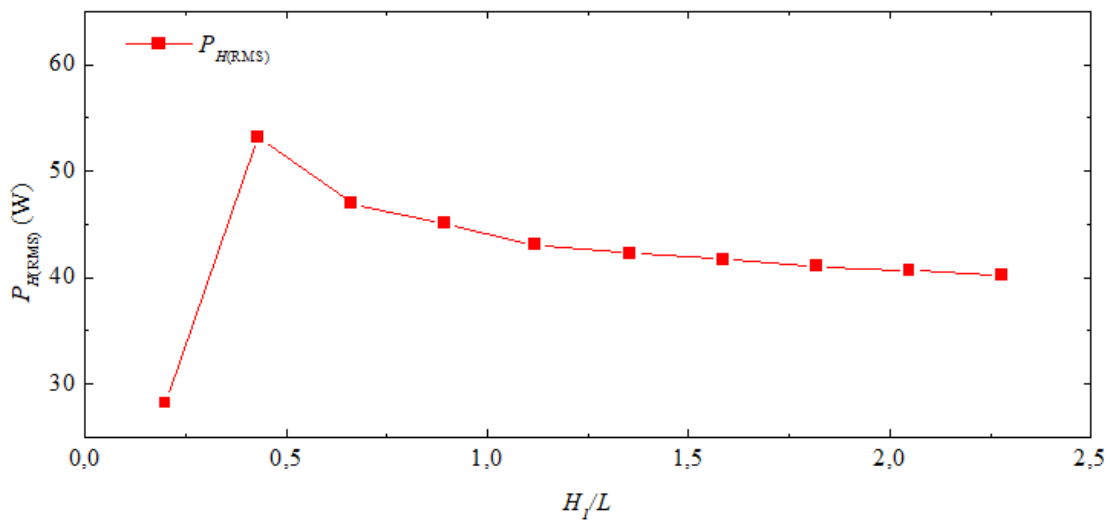
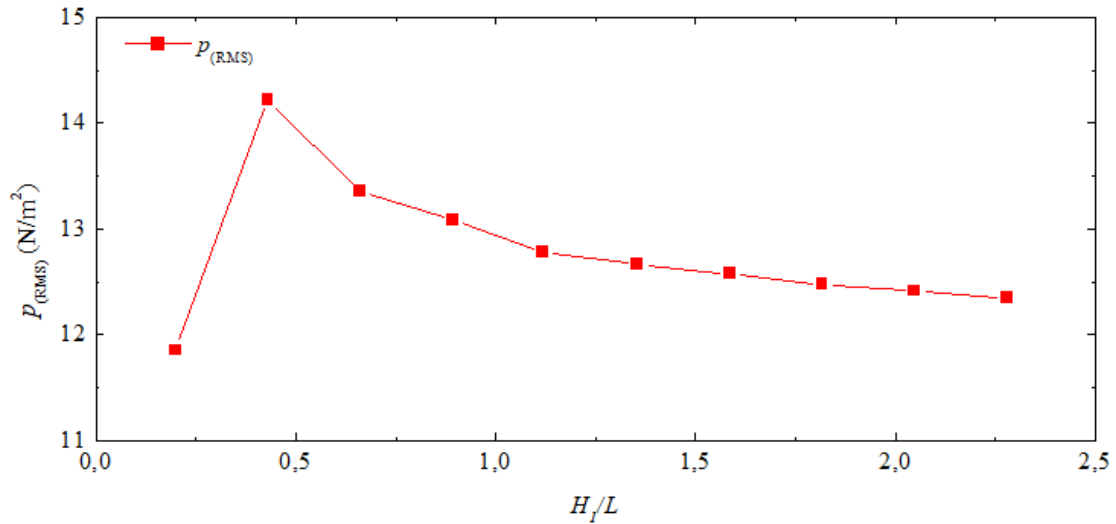


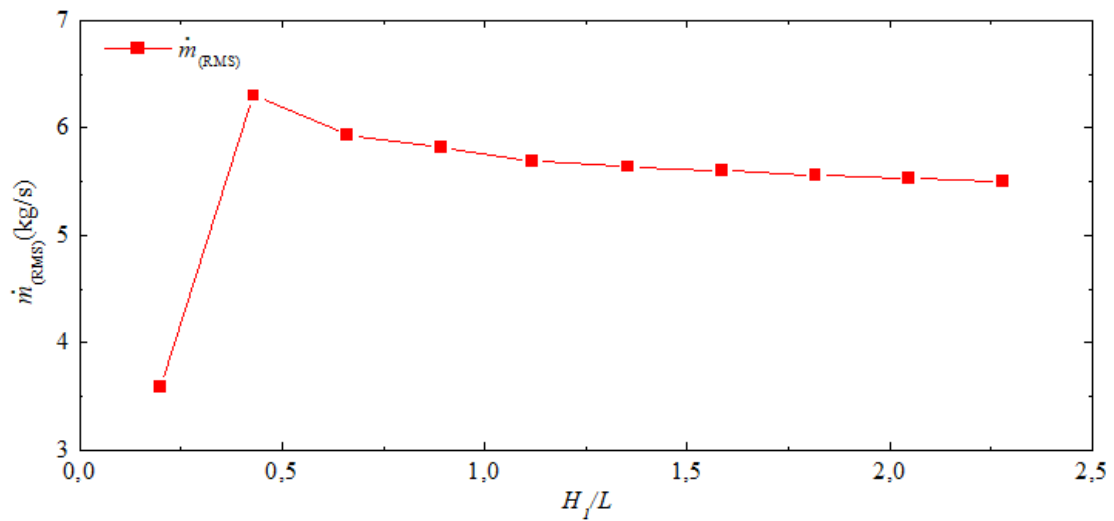
Figura 5.5: $P_{H(\text{RMS})}$ encontrada para o dispositivo CAO quando variado o grau de liberdade H_1/L e submetido às ondas regulares representativas.

As Figuras 5.6(a) e 5.6(b) apresentam, respectivamente, os resultados obtidos, através da Eq. (4.54), para a pressão (p) e a vazão mássica (\dot{m}) conforme variado o grau de liberdade H_1/L . Conforme esperado e assim como em De Lima [19] e Gomes [33], os gráficos de pressão e vazão mássica apresentam comportamento semelhante ao da potência hidropneumática, já que são grandezas diretamente proporcionais. Na Figura 5.6(a), observa-se que a razão ótima $(H_1/L)_o = 0,4297$ apresenta a maior $p_{(\text{RMS})}$ encontrada, $14,22$ N/m² e a razão $H_1/L = 0,1985$, apresenta a menor $p_{(\text{RMS})}$, $11,85$ N/m². Já, na Figura 5.6(b) observa-se que a razão ótima $(H_1/L)_o = 0,4297$ apresenta a maior $\dot{m}_{(\text{RMS})}$ encontrada, $6,29$ kg/s e a razão

$H_1/L = 0,1985$, apresenta a menor $\dot{m}_{(RMS)}$, 3,58 kg/s. Ou seja, comparando os casos extremos, encontra-se uma melhoria de 20% na pressão e de 75,7% na vazão mássica.



(a)



(b)

Figura 5.6: Resultados encontrados para: (a) $p_{(RMS)}$ e (b) $\dot{m}_{(RMS)}$ quando variado o grau de liberdade H_1/L e o CAO é submetido às ondas regulares representativas.

Ainda, nas Figuras 5.6(a) e 5.6(b), nota-se que em relação à razão $H_1/L = 1,1167$, que apresenta as dimensões do dispositivo CAO instalado na Ilha do Pico, encontrou-se $p_{(RMS)} = 12,78$ N/m² e $\dot{m}_{(RMS)} = 5,68$ kg/s. Ou seja, foram encontrados

resultados que são, respectivamente, 10% e 9,7% inferiores à $p_{(RMS)}$ e $\dot{m}_{(RMS)}$ obtidos para o caso ótimo ($(H_1/L)_o = 0,4297$).

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam, respectivamente, as topologias das fases para a razão ótima ($(H_1/L)_o = 0,4297$) e para a pior razão ($H_1/L = 0,1985$). Destaca-se que a água e o ar são representados, respectivamente, nas cores vermelha e azul. Além disso, as topologias foram obtidas para os seguintes instantes de tempo: $t = 0$ s, 300 s, 600 s e 900 s, representados, respectivamente, pelas Figs. 5.7 (a) – (d) e 5.8 (a) – (d).

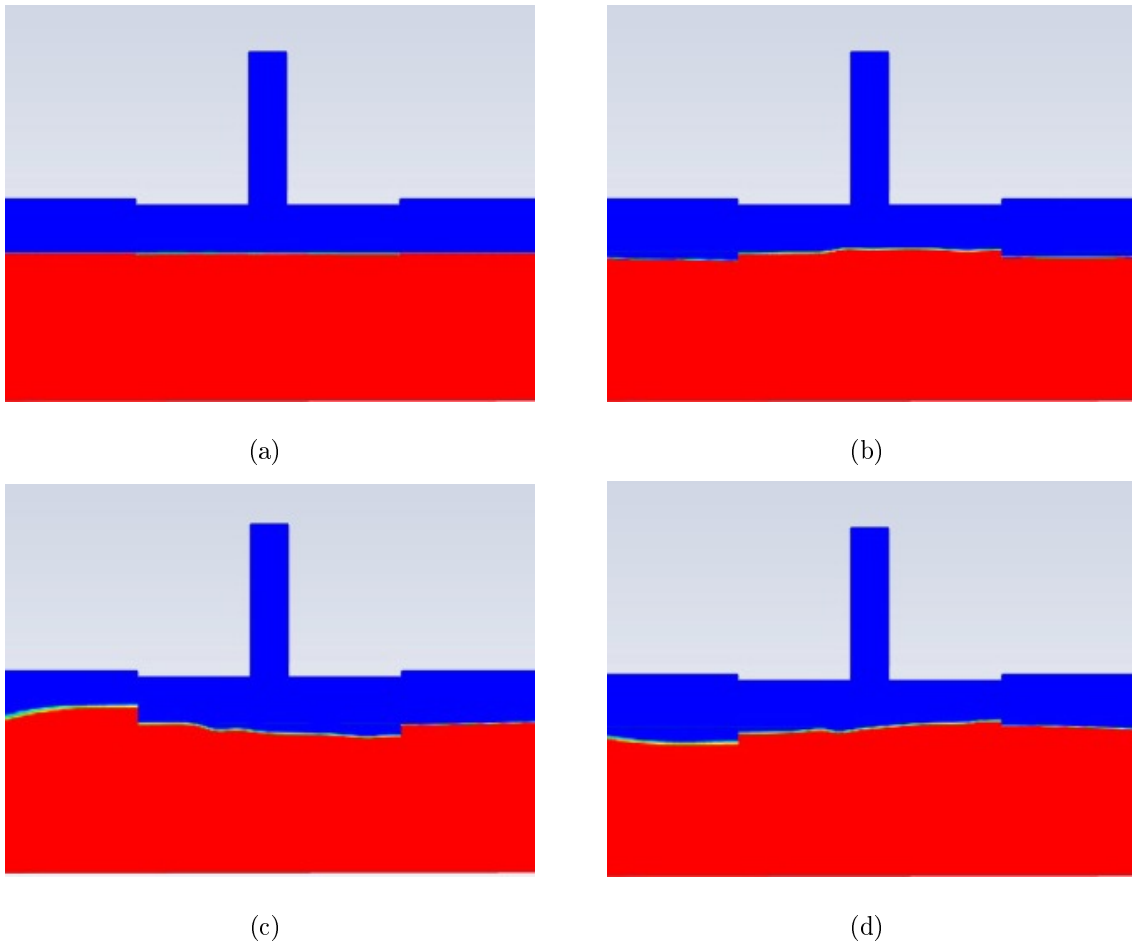


Figura 5.7: Topologia das fases quando o CAO é submetido às ondas regulares representativas para o caso ótimo, $(H_1/L)_o = 0,4297$, considerando: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 300$ s, (c) $t = 600$ s e (d) $t = 900$ s.

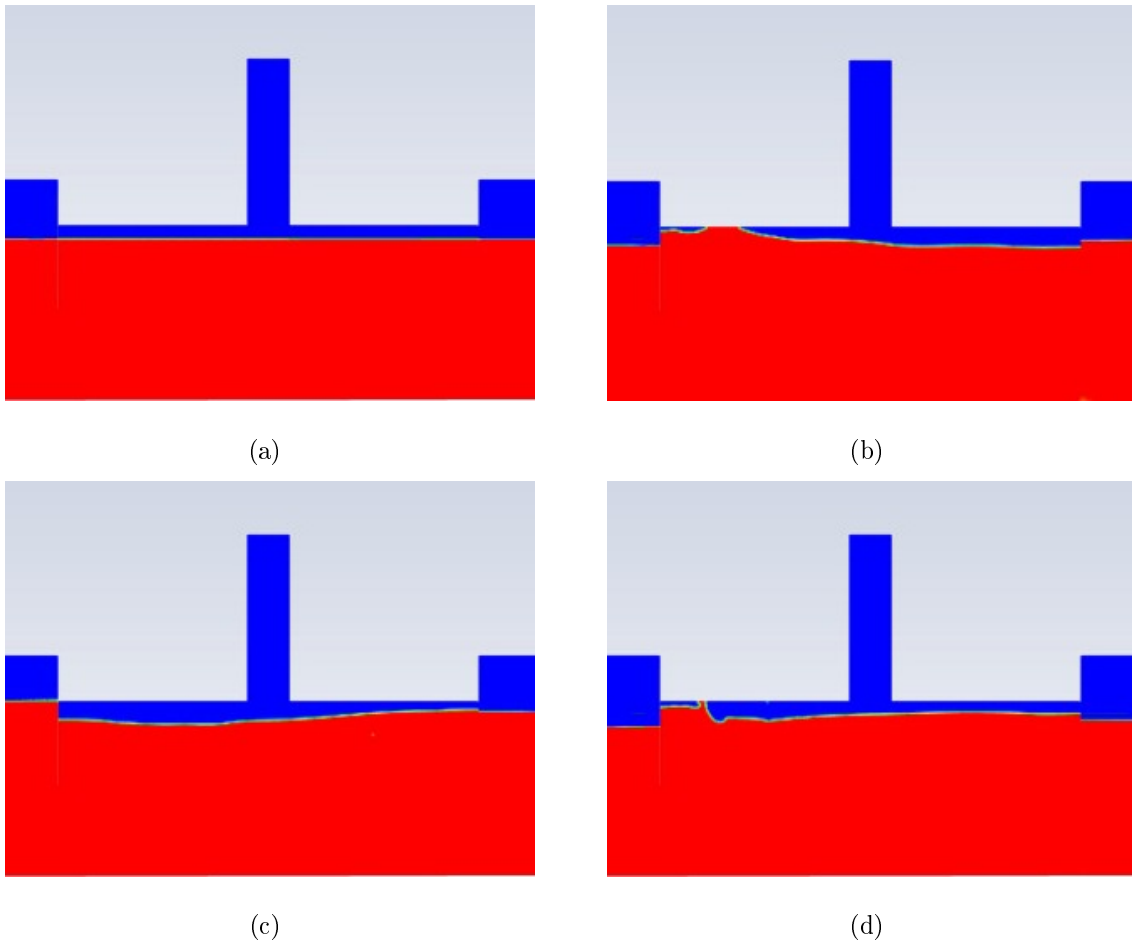


Figura 5.8: Topologia das fases quando o CAO é submetido às ondas regulares representativas para o pior caso, $H_1/L = 0,1985$, considerando: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 300$ s, (c) $t = 600$ s e (d) $t = 900$ s.

Nas Figs. 5.7(a) e 5.8(a), é apresentado o instante inicial da simulação, $t = 0$ s, onde não há incidência de ondas na câmara hidropneumática do dispositivo devido à condição inicial do escoamento em repouso. A seguir, as Figs. 5.7(b) e 5.8(b) apresentam o comportamento do escoamento em $t = 300$ s, momento onde pode-se visualizar, na Fig. 5.7(b), o movimento oscilatório dentro da câmara do dispositivo para o caso ótimo $(H_1/L)_o = 0,4297$, por outro lado, no caso de pior razão $H_1/L = 0,1985$ (Fig. 5.8(b)), observa-se que movimento oscilatório sofre interferência da estrutura do dispositivo, o que ocorre devido à reduzida altura da câmara ($H_1 = 5,65$ m).

Já as Figuras 5.7(c) e 5.8(c) apresentam as topologias das fases para $t = 600$ s, onde é possível observar a oscilação das ondas no interior da câmara hidropneumática. Além disso, observa-se que a lâmina de água apresenta maior altura na lateral esquerda do CAO, o que se justifica pela presença de uma crista de onda. Por fim, as Figs. 5.7(d) e 5.8(d) apresentam o instante final da simulação, $t = 900$ s, onde observa-se a presença de uma crista no interior do CAO e, com isso, um maior volume de água no interior da câmara. Na Fig. 5.8(d) observa-se, mais uma vez, que há interferência da estrutura no movimento oscilatório das ondas para o dispositivo onde $H_1/L = 0,1985$.

5.4 Estudo de Otimização Geométrica do CAO Submetido às Ondas Irregulares Realísticas

Baseado nos resultados obtidos no estudo acerca da influência da batimetria na geração de ondas irregulares realísticas (Seção 5.2), o CAO foi inserido no canal de ondas com batimetria. Desse modo, a seguir, é feita uma análise análoga à realizada na Seção 5.3.

Na Figura 5.9 são apresentados os resultados obtidos para potência hidropneumática, calculados através da Eqs. (4.51) e (4.54), conforme variado o grau de liberdade H_1/L . Observa-se no grau de liberdade $(H_1/L)_o = 0,1985$ o valor máximo encontrado nas potências hidropneumáticas disponíveis, ou seja, este é o caso ótimo, que ocorre quando $H_1 = 5,65$ m e $L = 28,46$ m e onde é encontrada uma $P_{H(\text{RMS})}$ de 25,44 W. Ainda, destaca-se que no caso $H_1/L = 1,1167$ ($H_1 = 13,40$ m e $L = 12,00$ m), que apresenta as dimensões do dispositivo instalado na Ilha do Pico, encontrou-se uma $P_{H(\text{RMS})} = 14,88$ W, que é 41,5% inferior à $P_{H(\text{RMS})}$ encontrada para o caso ótimo. Enquanto no pior caso, $H_1/L = 2,2789$ ($H_1 = 19,14$ m e $L = 8,40$ m), encontrou-se uma $P_{H(\text{RMS})} = 11,15$ W, que é aproximadamente 56% inferior à encontrada para o caso ótimo.

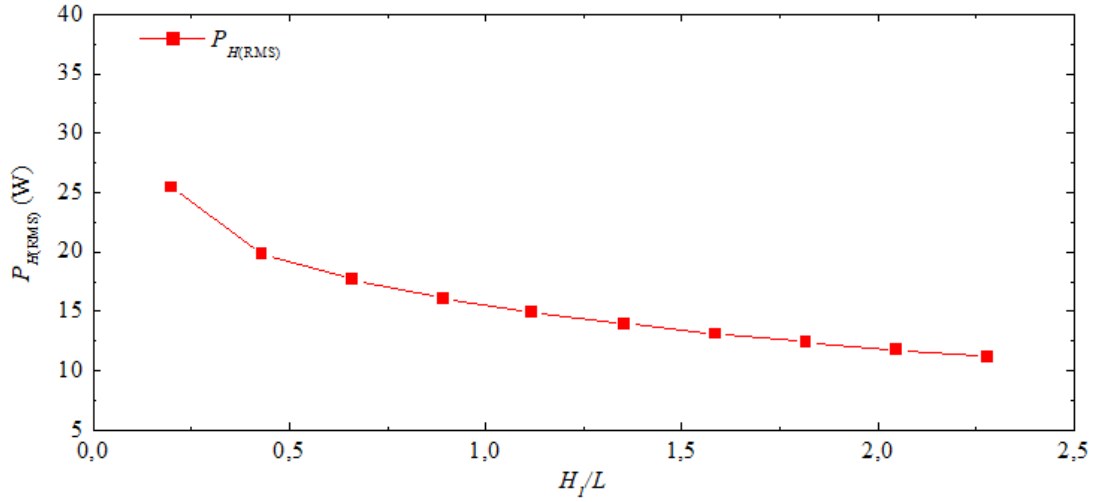
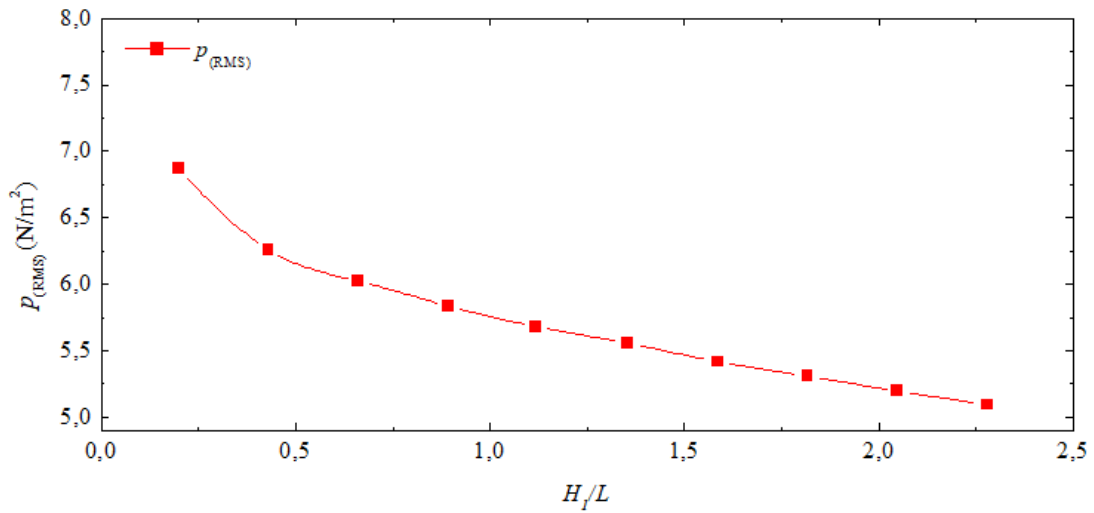


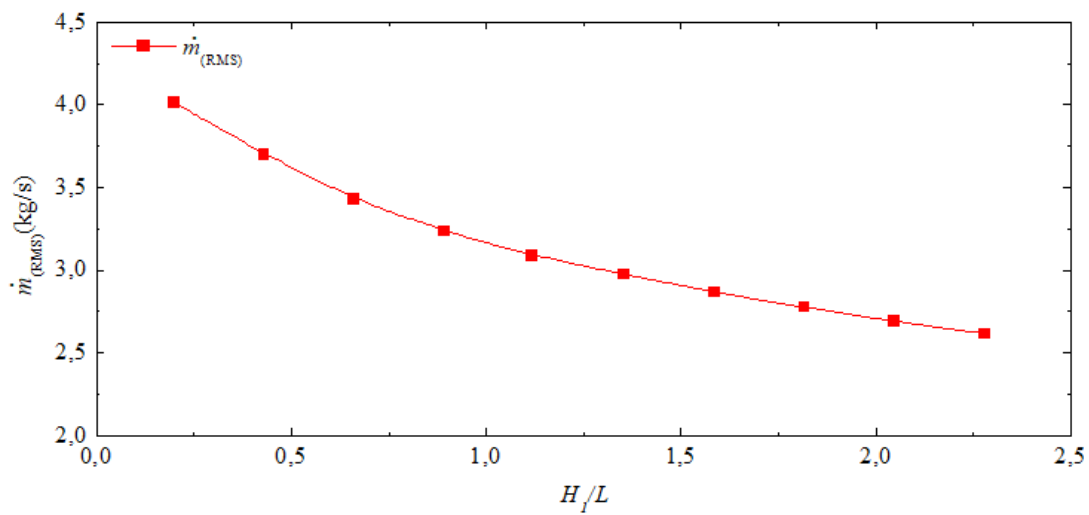
Figura 5.9: $P_{H(RMS)}$ encontrada para o dispositivo CAO quando variado o grau de liberdade H_1/L e submetido às ondas irregulares realísticas.

As Figuras 5.10(a) e 5.10(b) respectivamente, apresentam os resultados obtidos, através da Eq. (4.54), para a pressão e a vazão mássica conforme variado o grau de liberdade H_1/L . Assim como no estudo anterior, os gráficos de pressão e vazão mássica apresentam uma tendência central semelhante ao da potência hidropneumática, por se tratarem de grandezas diretamente proporcionais.

Na Figura 5.10(a), observa-se que a razão ótima $(H_1/L)_o = 0,1985$ apresenta a maior $p_{(RMS)}$ encontrada, $6,86 \text{ N/m}^2$ e a razão $H_1/L = 2,2789$, apresenta a menor $p_{(RMS)}$, $5,09 \text{ N/m}^2$. Já, na Figura 5.10(b) observa-se que a razão ótima $(H_1/L)_o = 0,1985$ apresenta a maior $\dot{m}_{(RMS)}$ encontrada, $4,01 \text{ kg/s}$ e a razão $H_1/L = 2,2789$, apresenta a menor $\dot{m}_{(RMS)}$, $2,61 \text{ kg/s}$. Ou seja, comparados o melhor e o pior caso, há uma melhoria de $34,8\%$ na pressão e de $53,6\%$ na vazão mássica. Ainda, com relação à razão $H_1/L = 1,1167$, que apresenta as dimensões do dispositivo CAO instalado na Ilha do Pico, encontrou-se $p_{(RMS)} = 5,68 \text{ N/m}^2$ e $\dot{m}_{(RMS)} = 3,08 \text{ kg/s}$, que, respectivamente, são $17,2\%$ e $23,2\%$ inferiores à $p_{(RMS)}$ e $\dot{m}_{(RMS)}$ obtidos para o caso ótimo ($(H_1/L)_o = 0,1985$).



(a)



(b)

Figura 5.10: Resultados encontrados para: (a) $p_{(RMS)}$ e (b) $\dot{m}_{(RMS)}$ quando variado o grau de liberdade H_1/L e o CAO é submetido às ondas irregulares realísticas.

As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam a topologia das fases para o melhor e o pior caso, onde a água e o ar são representados, respectivamente, nas cores vermelha e azul. Na Fig. 5.11 é mostrado o caso ótimo $(H_1/L)_o = 0,1985$, enquanto, na Fig. 5.12 é apresentado o caso que apresenta a pior configuração geométrica dentre os casos avaliados, $H_1/L = 2,2789$. As topologias das fases foram obtidas

para os seguintes instantes de tempo: $t = 0$ s, 300 s, 600 s e 900 s, representados, respectivamente, pelas Figs. 5.11 (a) – (d) e 5.12 (a) – (d).

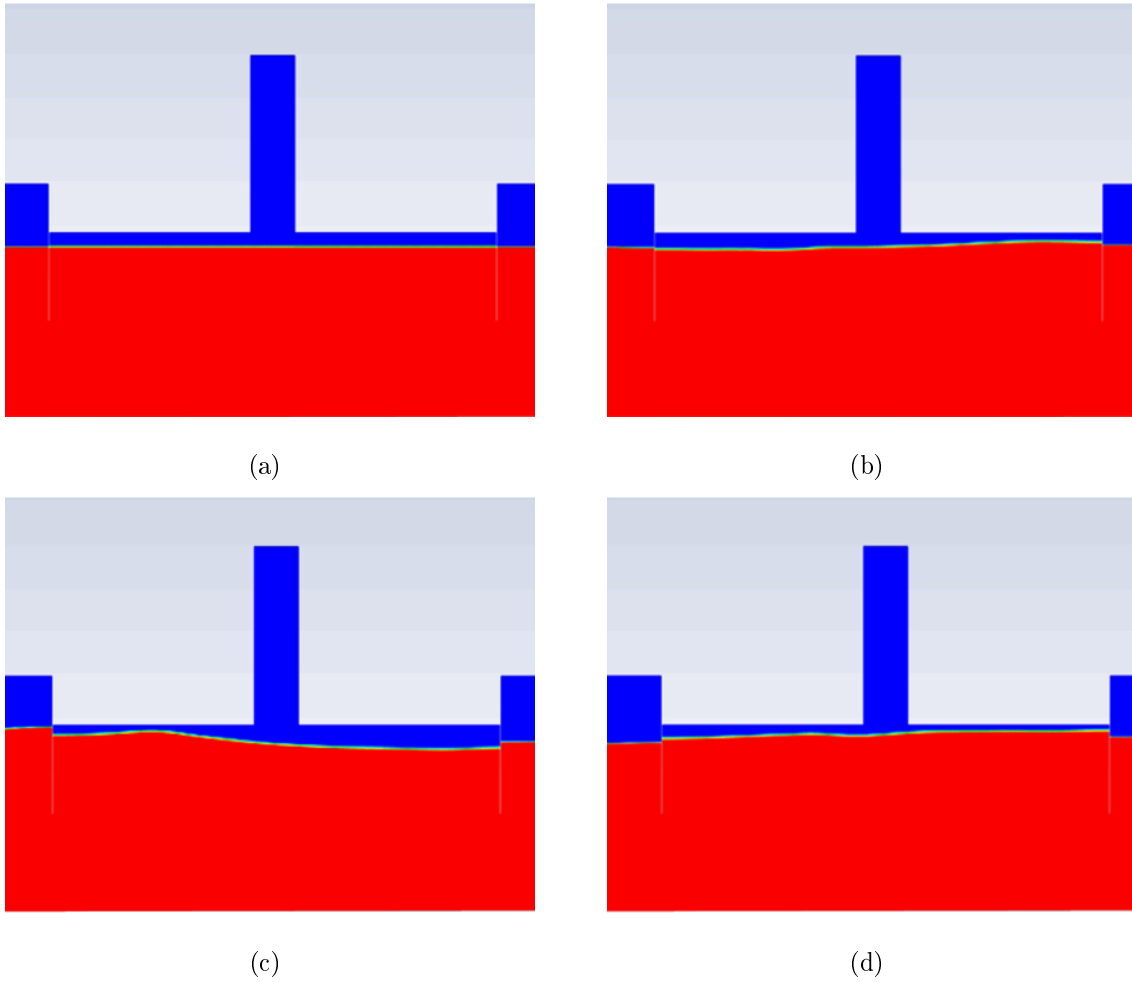


Figura 5.11: Topologia das fases quando o CAO é submetido às ondas irregulares realísticas para o caso ótimo, $(H_1/L)_o = 0,1985$, considerando: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 300$ s, (c) $t = 600$ s e (d) $t = 900$ s.

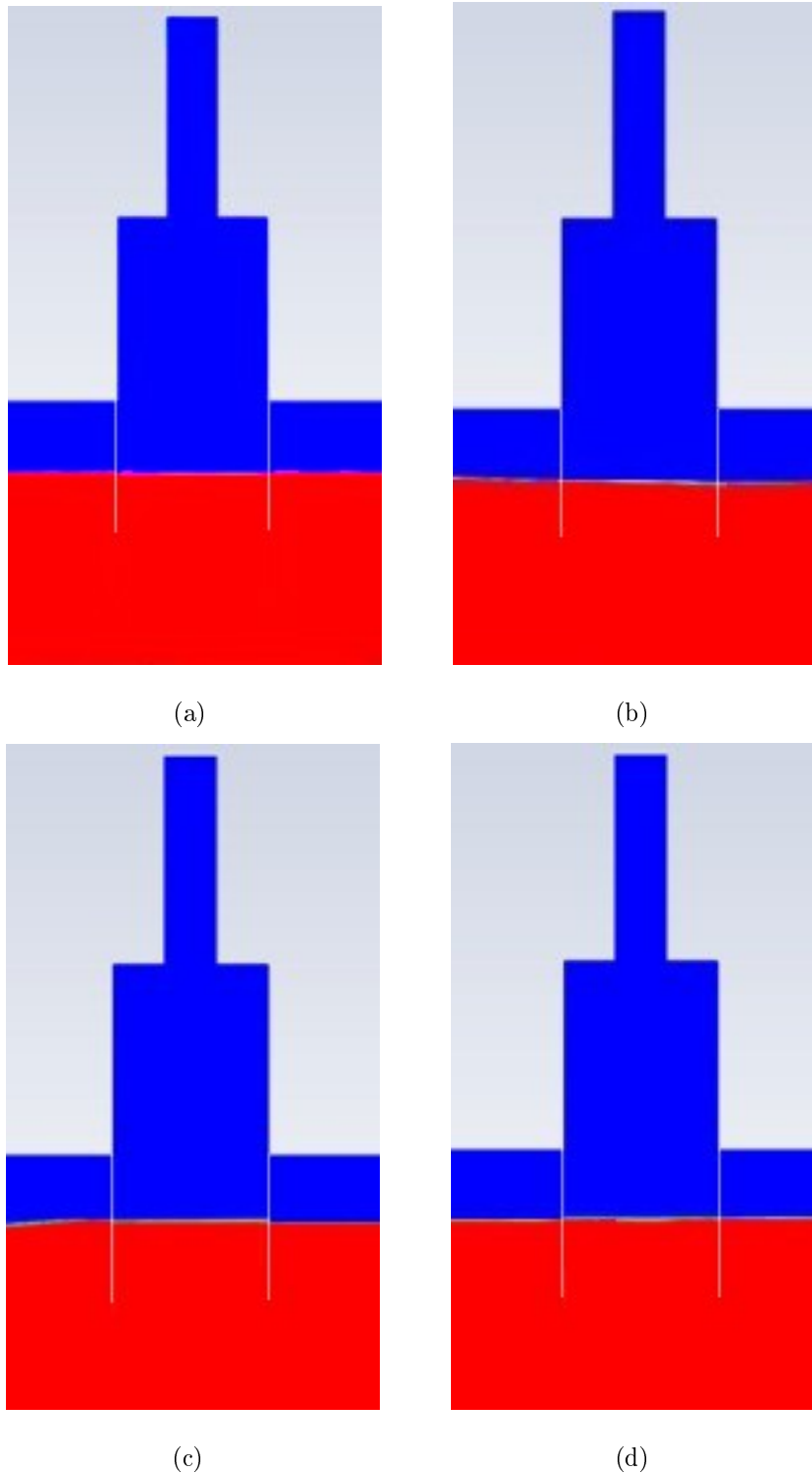


Figura 5.12: Topologia das fases quando o CAO é submetido às ondas irregulares realísticas para o pior caso, $H_1/L = 2,2789$, considerando: (a) $t = 0$ s, (b) $t = 300$ s, (c) $t = 600$ s e (d) $t = 900$ s.

Nas Figs. 5.11(a) e 5.12(a), observa-se o instante inicial ($t = 0$ s) da simulação, onde o fluxo estava em repouso e, portanto, não houve incidência de ondas irregulares na câmara hidropneumática do CAO. A seguir, as Figs. 5.11(b) e 5.12(b) apresentam o comportamento do escoamento em $t = 300$ s, momento onde um maior volume de água pode ser observado dentro da câmara do dispositivo para o caso ótimo $(H_1/L)_o = 0,1985$ (Fig 5.11(b)), em contraste com o pior razão $H_1/L = 2,2789$ (Fig 5.12(b)), onde houve menor movimento oscilatório da massa de água.

Esse mesmo comportamento pode ser observado nos instantes $t = 600$ s e 900 s, representados, respectivamente, nas Figs. 5.11(c) - (d) e 5.12 (c) - (d), o que se deve ao fato de que o dispositivo onde $(H_1/L)_o = 0,1985$ possui menor altura quando comparado ao dispositivo onde $H_1/L = 2,2789$. Além disso, o dispositivo $H_1/L = 2,2789$ possui $H_1 = 19,14$ m, que é 29 vezes superior à altura significativas das ondas presentes no estado de mar considerado, fato este que dificulta a visualização das ondas no interior do dispositivo. Por fim, é importante ressaltar que durante a compressão, as cristas das ondas podem ser observadas no interior do dispositivo, enquanto durante a descompressão, as cavas das ondas são visíveis. Ou seja, o movimento alternado das ondas dentro da câmara hidropneumática do dispositivo leva a um fluxo de ar alternado no duto da turbina.

Comparando os casos de otimização do CAO, o caso ótimo encontrado quando consideradas as ondas regulares representativas, $(H_1/L)_o = 0,4297$, obteve-se uma $P_{H(RMS)}$ 52,13% superior do que a encontrada no caso ótimo quando são consideradas as ondas irregulares realísticas, $(H_1/L)_o = 0,1985$. Em relação aos piores casos, que, para as ondas regulares representativas ocorre quando $H_1/L = 0,1985$, encontrou-se uma $P_{H(RMS)}$ 60,44% superior a encontrada no pior caso quando são consideradas as ondas irregulares realísticas, $H_1/L = 2,2789$. Ainda, para o caso que apresenta as dimensões do CAO instalado na Ilha do Pico, $H_1/L = 1,1167$, a $P_{H(RMS)}$ encontrada para o caso submetido às ondas regulares representativas

é 65,44% superior do que quando o dispositivo é submetido às ondas irregulares realísticas.

Por fim, a Figura 5.13 relaciona os valores de $P_{H(RMS)}$ obtidos no presente estudo com os encontrados no estudo de Maciel [49]. Conforme pode ser observado, em ambos os estudos, o caso que otimizou a potência hidropneumática disponível é $(H_1/L)_o = 0,1985$.

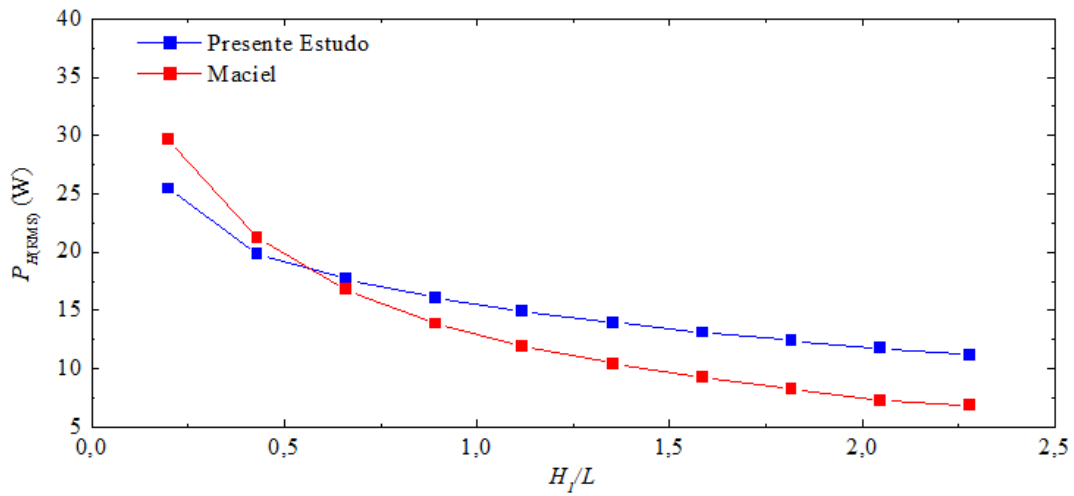


Figura 5.13: Comparação das $P_{H(RMS)}$ encontradas pelo CAO neste estudo quando o grau de liberdade H_1/L é variado e o dispositivo submetido às ondas irregulares realísticas com as $P_{H(RMS)}$ encontradas por Maciel [49].

A $P_{H(RMS)}$ encontrada no presente estudo representa uma perda de 14,14% na potência do dispositivo em comparação à potência encontrada por Maciel [49]. Quanto ao pior aproveitamento, em ambos os estudos, foi encontrado para $H_1/L = 2,2789$. Porém, neste estudo, constatou-se uma $P_{H(RMS)}$ mínima 38,74% superior à encontrada em Maciel [49], que foi de 6,83 W. Por fim, destaca-se a razão $H_1/L = 1,1167$, caso que apresenta as dimensões do CAO instalado na Ilha do Pico, onde obteve-se uma $P_{H(RMS)} = 14,88$ W, 20,09% maior que a encontrada por Maciel [49]. Ainda é possível observar que as curvas referentes à análise da potência encontradas

em ambos os estudos apresentam comportamentos semelhantes, ou seja, à medida que o grau de liberdade H_1/L aumenta, a $P_{H(\text{RMS})}$ diminui.

6 CONCLUSÃO

No presente trabalho, foram realizados estudos numéricos objetivando avaliar as geometrias que conduzem ao melhor desempenho do dispositivo CAO quando submetido às ondas regulares representativas e às ondas irregulares realísticas do estado de mar encontrado no município de Tramandaí – RS, no dia 28 de maio de 2018 das 10 h e 14 min às 10 h e 29 min. Para tanto, foi resolvido um escoamento transiente de uma mistura ar-água em regime laminar. A solução numérica das equações de conservação da massa e quantidade de movimento foi resolvida através do MVF. O modelo VoF foi empregado no tratamento da interface entre as fases ar e água. No que tange a otimização geométrica da câmara hidropneumática do CAO, foi utilizado o Design Construtal aliado à Busca Exaustiva.

A presente dissertação foi subdividida em dois estudos. No primeiro, realizou-se um estudo para analisar se há influência da batimetria do canal de ondas na geração e propagação das ondas regulares representativas e das ondas irregulares realísticas. No segundo, otimizou-se a geometria da câmara hidropneumática do CAO quando o dispositivo é submetido às ondas regulares representativas e quando é submetido às ondas irregulares realísticas.

No que tange o primeiro estudo, considerou-se dois modelos 2D de canais de ondas, onde: o primeiro, apresentava fundo plano (sem batimetria) e o segundo, apresentava a batimetria encontrada no local de estudo. No primeiro momento, os canais de ondas foram utilizados para simular a geração e a propagação das ondas regulares representativas do estado de mar, onde constatou-se que as ondas geradas no canal com batimetria apresentaram ligeira melhora na acurácia quando comparadas aos resultados analíticos. Além disso, foi possível verificar o modelo numérico. No segundo momento, os canais foram utilizados para a geração das ondas irregulares realísticas, o que foi realizado por meio da metodologia WaveMIMO [48]. Neste caso, a reprodução da batimetria também acarretou em re-

sultados ligeiramente melhores e houve a verificação da geração das ondas. Desse modo, concluiu-se que foi possível reproduzir de maneira adequada o estado de mar realístico, dado através das ondas regulares representativas e irregulares realísticas, encontrado em Tramandaí.

Quanto ao segundo estudo, o CAO foi inserido no canal de ondas com batimetria (Fig. 4.8), onde foi possível realizar o estudo de otimização geométrica da câmara hidropneumática do dispositivo, para isso, o conversor foi submetido: primeiro, às ondas regulares representativas; e, segundo, às ondas irregulares realísticas. No que tange o resultado da otimização geométrica do CAO submetido às ondas regulares representativas do estado de mar, a geometria ótima, ou seja, aquela que maximiza a potência hidropneumática disponível é $(H_1/L)_o = 0,4297$, onde $H_1 = 8,31$ m e $L = 19,34$ m. A potência encontrada para o caso ótimo é 53,15 W, que é 1,88 vezes maior do que o pior caso, $H_1/L = 0,1985$ e 1,23 vezes maior do que o dispositivo instalado na Ilha do Pico, $H_1/L = 1,1167$, que foi tomado como base para este estudo.

Por outro lado, a geometria ótima que maximiza a potência hidropneumática disponível no conversor submetido às ondas irregulares realísticas é $(H_1/L)_o = 0,1985$, onde $H_1 = 5,65$ m e $L = 28,46$ m. A potência encontrada no caso ótimo é 25,44 W, que é 2,28 vezes maior do que o pior caso, $H_1/L = 2,2789$ e 1,71 vezes maior do que o dispositivo instalado na Ilha do Pico, $H_1/L = 1,1167$. Além disso, observou-se que o grau de liberdade analisado, H_1/L , é inversamente proporcional à potência hidropneumática disponível pelo CAO.

Ao comparar os estudos de otimização geométrica realizados nesta dissertação (CAO submetido às ondas regulares representativas e às ondas irregulares realísticas) observou-se que as ondas regulares representativas superestimam a potência teórica obtida pelo CAO. Além disso, quando consideradas as ondas irregulares, os casos analisados apresentam um comportamento com maior conformidade, à medida que H_1/L aumenta, a potência disponível reduz, enquanto que, quando

consideradas as ondas regulares, a pior geometria é obtida com o menor valor de H_1/L .

Portanto, o uso das ondas irregulares realísticas permitiu a obtenção de um estudo de otimização geométrica com resultados mais coerentes. Fato este que também foi observado em Hübner [41], e destaca a importância de se considerar, nos estudos de otimização geométrica do CAO, as ondas irregulares realísticas, que, como realizado neste estudo, podem ser geradas através da metodologia WaveMIMO.

Ainda, comparando os resultados acerca da otimização geométrica do dispositivo CAO submetido às ondas irregulares realísticas, obtidos na presente dissertação, com os resultados encontrados por Maciel [49], que realizou um estudo semelhante, onde o CAO foi submetido às ondas irregulares realísticas que ocorreram no município de Rio Grande – RS em 23/08/2014, nota-se que $H_1/L = 0,1985$ é a geometria ótima e que $H_1/L = 2,2789$ é a pior geometria para ambos os estudos. Porém, há diferenças a se considerar no que tange a potência hidropneumática disponível, uma vez que o dispositivo submetido às ondas irregulares realísticas que ocorreram em Tramandaí apresentam uma potência 0,85 vezes menor do que a encontrada em Maciel [49]. Fato este, que, para realização de uma estimativa teórica do desempenho do CAO, destaca a importância de se considerar nas simulações numéricas o estado de mar onde almeja-se instalar o dispositivo.

Por fim, destaca-se que recomendações teóricas sobre formas geométricas ótimas, que permitem o melhor aproveitamento da energia contida nas ondas incidentes ao dispositivo, foram obtidas com a utilização do Design Construtal aliado à busca exaustiva. Ou seja, comprovou-se, mais uma vez, a eficiência deste método na otimização geométrica de dispositivos do tipo CAO, utilizados para a conversão da energia contida nas ondas do mar em energia elétrica. De uma forma geral, os resultados encontrados nesta dissertação foram promissores e encorajam a realização de novas pesquisas na área.

6.1 Estudos Futuros

Com relação a estudos futuros, sugere-se:

- Otimizar geometricamente o dispositivo CAO avaliando as mesmas razões abordadas neste estudo, porém, considerando, outros estados de mar ocorridos em Tramandaí e em outros municípios do RS;
- Realizar a otimização geométrica do CAO avaliando mais de um grau de liberdade, como, por exemplo, a razão entre a altura e o comprimento do duto da turbina;
- Otimizar geometricamente dispositivos CAO acoplados submetidos às ondas irregulares realísticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AIRY, G. B. *Tides and Waves*. Encyclopædia Metropolitana, 1845.
- [2] AWK, T. *TOMAWAC User Manual Version 7.2. 7.2.3*. The Telemac-Mascaret Consortium, 2017.
- [3] BARROS, A. S. Avaliação geométrica de uma estrutura acoplada a um conversor de energia das ondas onshore do tipo galgamento aplicando o design construtal. Dissertação de mestrado em engenharia oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, 2020.
- [4] BARROS, A. S., FRAGASSA, C., PAIVA, M. D. S., ROCHA, L. A., MACHADO, B. N., ISOLDI, L. A., GOMES, M. N., AND DOS SANTOS, E. D. Numerical study and geometrical investigation of an onshore overtopping device wave energy converter with a seabed coupled structure. *Journal of Marine Science and Engineering* 11 (2023), 412.
- [5] BEJAN, A. *Shape and Structure, from Engineering to Nature*. Cambridge University Press, 2000.
- [6] BEJAN, A. *The Physics of Life: The Evolution of Everything*. St. Martin's Press, 2016.
- [7] BEJAN, A., AND LORENTE, S. The constructal law and the thermodynamics of flow systems with configuration. *Int. J. Heat Mass Transfer* 47 (2004).
- [8] BEJAN, A., AND ZANE, J. *Design in nature*. Doubleday, USA, 2012.
- [9] CARDOSO, S. D., MARQUES, W. C., KIRINUS, E. D. P., AND STRINGARI, C. E. Levantamento batimétrico usando cartas náuticas. In *13th Mostra da Produção Universitária* (Rio Grande: Universidade Federal do Rio Grande, 2014), p. 2.

- [10] CARNEIRO, M. L. Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaios de estruturas oceânicas. Dissertação de mestrado engenharia mecatrônica e de sistemas mecânicos, Universidade Federal de São Paulo, 2007.
- [11] CEM. *Coastal Engineering Manual*. Army Corps of Engineers, Washington, Estado Unidos, 2002.
- [12] CHAI, T., AND DRAXLER, R. R. Root mean square error (rmse) or mean absolute error (mae)? – arguments against avoiding rmse in the literature. *Geoscientific Model Development* 7 (2014), 1247–1250.
- [13] CHAKRABARTI, S. K. *Handbook of Offshore Engineering*. Elsevier, 2005.
- [14] CISCO, L. A., KOCH, A. H. S., CONDOTTA, M. P., HOFSTATTER, R., HARRAS, L. M., OLEINIK, P. H., PAIVA, M. S., ISOLDI, L. A., AND MACHADO, B. N. O oceano como fonte de energia: uma revisão da literatura. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia* 6 (2020), 23–33.
- [15] CISCO, L. A., MACIEL, R. P., OLEINIK, P. H., DOS SANTOS, E. D., GOMES, M. N., ROCHA, L. A. O., ISOLDI, L. A., AND MACHADO, B. N. Constructal design applied to an oscillating water column wave energy converter device under realistic sea state conditions. *Fluids* 7 (2022), 359.
- [16] CRUZ, J. *Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives*, 1 ed. Springer, 2008.
- [17] CRUZ, J. M. B. P., AND SARMENTO, A. J. N. A. *Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais*. Alfragide: Instituto do Ambiente, 2004.
- [18] DE DEUS, M. J., SOUZA, L. C., DA SILVA, M. O. A., DO AMARAL, C. H. A. P., DOS SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A., AND GOMES, M. N. Aplicação de design construtal para a análise geométrica de um dispositivo cao com formato

de duplo trapézio submetido a um espectro do tipo pierson-moskowitz. *RETEC - Revista de Tecnologia 12* (2019), 55–67.

- [19] DE LIMA, Y. T. B. *Análise geométrica através do design construtal de conversores de energia das ondas do mar do tipo coluna de água oscilante com câmaras hidropneumáticas acopladas*. Tese de doutorado em engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.
- [20] DE LIMA, Y. T. B., DAS NEVES GOMES, M., ISOLDI, L. A., DOS SANTOS, E. D., LORENZINI, G., AND ROCHA, L. A. O. Geometric analysis through the constructal design of a sea wave energy converter with several coupled hydropneumatic chambers considering the oscillating water column operating principle. *Applied Sciences 11* (2021), 8630.
- [21] DE LIMA, Y. T. B., GOMES, M. D. N., CARDOZO, C. F., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D., AND ROCHA, L. A. O. Analysis of geometric variation of three degrees of freedom through the constructal design method for a oscillating water column device with double hidropneumatic chamber. *Defect and Diffusion Forum 396* (2019), 22–31.
- [22] DE LIMA, Y. T. B., ROCHA, L. A. O., GOMES, M. D. N., AND DOS SANTOS, E. D. Aplicação do método design construtal na avaliação numérica da potência hidropneumática de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar do tipo coluna de Água oscilante com região de transição trapezoidal. *Revista Brasileira de Energias Renováveis 6* (2017), 376–396.
- [23] DEAN, R. G., AND DALRYMPLE, R. A. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. world scientific publishing company, 1991.
- [24] DIZADJI, N., AND SAJADIAN, S. E. Modeling and optimization of the chamber of owc system. *Energy 36* (2011), 2360–2366.

- [25] EPE. *Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional*. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso: 04/10/2023.
- [26] FALCAO, A. F. O. Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and sustainable energy reviews 14* (2010), 899–918.
- [27] FALCÃO, A. F. O., AND HENRIQUES, J. C. C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renewable Energy 85* (2016), 1391–1424.
- [28] FALCÃO, A. F. O., SARMENTO, A. J. N. A., GATO, L. M. C., AND BRITOMELO, A. The pico owc wave power plant: Its lifetime from conception to closure 1986–2018. *Applied Ocean Research 98* (2020), 102104.
- [29] FARINA, L. *Ondas Oceânicas de Superfície*. Notas em Matemática Aplicada, SBMAC, São Carlos, 2006.
- [30] GOMES, M. D. N., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D. D., AND ROCHA, L. A. O. Análise de malhas para geração numérica de ondas em tanques. In *Anais do VII do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica* (Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2012).
- [31] GOMES, M. D. N., NASCIMENTO, C. D. D., BONAFINI, B. L., SANTOS, E. D. D., ISOLDI, L. A., AND ROCHA, L. A. O. Two-dimensional geometric optimization of an oscillating water column converter in laboratory scale. *Revista de Engenharia Térmica 11* (2012), 30–36.
- [32] GOMES, M. D. N., SALVADOR, H., MAGNO, F., RODRIGUES, A. A., SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A., AND ROCHA, L. A. O. Constructal design applied to geometric shapes analysis of wave energy converters. *Defect and Diffusion Forum 407* (2021), 147–160.

- [33] GOMES, M. N. *Constructal Design de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante*. Tese de doutorado em engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
- [34] GOMES, M. N., DE DEUS, M. J., DOS SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A., AND ROCHA, L. A. O. Analysis of the geometric constraints employed in constructal design for oscillating water column devices submitted to the wave spectrum through a numerical approach. *Defect and Diffusion Forum* 390 (2019), 193–210.
- [35] GOMES, M. N., LORENZINI, G., ROCHA, L. A. O., DOS SANTOS, E. D., AND 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* 27 (2018), 173–190.
- [36] GOMES, M. N., OLEINIK, P. H., MARQUES, W. C., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D., AND ROCHA, L. A. O. Constructal design for numerical evaluation of a rectangular shape oscillating water column device subject to a jonswap wave spectrum. In *Constructal Law & Second Law Conference (CLC 2019)* (2019), pp. 208–211.
- [37] GOMES, M. N., ROCHA, L. A., WAESS, K. R., ISOLDI, L. A., AND SANTOS, E. D. Modelagem computacional e otimização geométrica 2d com constructal design de um dispositivo do tipo coluna de Água oscilante em escala real – comparação onshore e offshore. In *Proceedings of the XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering* (Pirenópolis, 2013), pp. 1–20.
- [38] GOMES, M. N., SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A., AND ROCHA, L. A. O. Two-dimensional geometric optimization of an oscillating water column converter of

- real scale. In *22nd International Congress of Mechanical Engineering* (Ribeirão Preto, 2013), p. 3468–3479.
- [39] HIRT, C. W., AND NICHOLS, B. D. Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics* 39 (1981), 201–225.
- [40] HOLTHUIJSEN, L. H. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [41] HÜBNER, R. G. Comparação numérica de um conversor do tipo galgamento sob a incidência de ondas regulares ou irregulares baseadas em estados de mar realísticos da costa do rio grande do sul. Dissertação de mestrado em engenharia oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, 2020.
- [42] IPCC. *Renewable energy sources and climate change mitigation: special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2012.
- [43] JOULE III, N. N. E. P. *European Wave Energy Pilot Plant on the Island of Pico, Azores, Portugal. Phase Two: Equipment*. Disponível em: https://cordis.europa.eu/docs/projects/files/JOR/JOR3950012/47698021-6_en.pdf.
- [44] LETZOW, M., LORENZINI, G., BARBOSA, D. V. E., HÜBNER, R. G., ROCHA, L. A. O., GOMES, M. N., ISOLDI, L. A., AND DOS SANTOS, E. D. Numerical analysis of the influence of geometry on a large scale onshore oscillating water column device with associated seabed ramp. *Int. J. Des. Nat. Ecodynamics* 15 (2020), 873–884.
- [45] LISBOA, R. C., TEIXEIRA, P. R., AND DIDIER, E. Regular and irregular wave propagation analysis in a flume with numerical beach using a navier-stokes based model. *Defect and Diffusion Forum* 372 (2017), 81–90.

- [46] LORENZINI, G., LARA, M. F. E., ROCHA, L. A. O., GOMES, M. D. N., DOS SANTOS, E. D., AND ISOLDI, L. A. Constructal design applied to the study of the geometry and submergence of an oscillating water column. *International journal of heat and technology* 33 (2015), 31–38.
- [47] MACHADO, B. N. *Estudo numérico tridimensional de um dispositivo de galgamento para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica aplicando o método Constructal Design*. Tese de doutorado em engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.
- [48] MACHADO, B. N., OLEINIK, P. H., KIRINUS, E. P., DOS SANTOS, E. D., ROCHA, L. A. O., GOMES, M. D. N., CONDE, J. M. P., AND ISOLDI, L. A. Wavemimo methodology: Numerical wave generation of a realistic sea state. *Journal of Applied and Computational Mechanics* 7 (2021), 2129–2148.
- [49] MACIEL, R. P. Constructal design applied to an oscillating water column wave energy converter device subjected to a realistic sea state. Dissertação de mestrado em engenharia oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, 2022.
- [50] MACIEL, R. P., FRAGASSA, C., MACHADO, B. N., ROCHA, L. A., DOS SANTOS, E. D., GOMES, M. N., AND 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 and Engineering* 9 (2021), 896.
- [51] MACIEL, R. P., MACHADO, B. N., OLEINIK, P. H., DOS SANTOS, E. D., GOMES, M. N., AND ISOLDI, L. A. Investigation of numerical irregular wave generation using transient discrete data as boundary conditions of prescribed velocity. *Defect and Diffusion Forum* 427 (2023), 227–235.
- [52] MACIEL, R. P., OLEINIK, P. H., DOS SANTOS, E. D., ROCHA, L. A. O., MACHADO, B. N., GOMES, M. N., AND ISOLDI, L. A. Constructal design applied to an oscillating water column wave energy converter device under

- realistic sea state conditions. *Journal of Marine Science and Engineering* 11 (2023), 2174.
- [53] MALISKA, C. R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2004.
- [54] MANUAL, U. D. F. *ANSYS FLUENT 15.0. Theory Guide*. 2013.
- [55] MARTINS, J. C., FRAGASSA, C., GOULART, M. M., DOS SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A., GOMES, M. N., AND ROCHA, L. A. O. Constructal design of an overtopping wave energy converter incorporated in a breakwater. *Journal of Marine Science and Engineering* 10 (2022), 471.
- [56] MCCORMICK, M. E. *Ocean engineering mechanics: with applications*. Cambridge University Press, 2009.
- [57] 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. Dissertação de mestrado em engenharia oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, 2020.
- [58] OLEINIK, P. H., TAVARES, G. P., MACHADO, B. N., AND ISOLDI, L. A. Transformation of water wave spectra into time series of surface elevation. *Earth* 2 (2021), 997–1005.
- [59] OLIVEIRA, J. F. G. D., AND TRINDADE, T. C. G. Sustainability performance evaluation of renewable energy technologies. In *Sustainability Performance Evaluation of Renewable Energy Sources: The Case of Brazil*. Springer, 2018.
- [60] OLIVEIRA, M. R., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., SANTOS, E. D., AND GOMES, M. N. Avaliação numérica e geométrica do efeito da inserção de um anteparo triangular na parede frontal de um conversor de energia das ondas do mar do tipo coluna de Água oscilante. *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia (RIPE)* 6 (2020), 44–61.

- [61] PAIVA, M. S., MOCELLIN, A. P. G., KOCH, A. H. S., OLEINIK, P. H., ISOLDI, L. A., AND MACHADO, B. N. Investigation on the discretization of the realistic irregular wave generation region through the wavemimo methodology. *Engenharia Térmica* 22 (2023), 03–10.
- [62] PATANKAR, S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill, 1980.
- [63] PECHER, A., AND KOFOED, J. P. *Handbook of ocean wave energy*. Springer Nature, 2017.
- [64] PEPE, V. R. Estudo de redes vasculares aplicadas aos materiais multifuncionais. Projeto de graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio Grande, 2008.
- [65] PLETCHER, R. H., TANNEHILL, J. C., AND ANDERSON, D. *Computational fluid mechanics and heat transfer*. CRC press, 2012.
- [66] SEIBT, F. M., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D., AND ROCHA, L. A. O. Study of the effect of the relative height on the efficiency of a submerged horizontal plate type wave energy converter applying constructal design. In *XXXVIII IberianLatin American Congress on Computational Methods in Engineering* (Florianópolis, 2017).
- [67] SRINIVASAN, V., SALAZAR, A. J., AND SAITO, K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (vof) methodology. *Applied mathematical modelling* 35 (2011), 3710–3730.
- [68] STOKES, G. G. On the theory of oscillatory waves. In *Transactions of the Cambridge Philosophical Society VIII* (1847), pp. 441–455.
- [69] TOLMASQUIM, M. T. *Energia Renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2006.

[70] VERSTEEG, H. K., AND MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited, 2007.

[71] WEC. *World energy resources*. London, 2016.