

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO

ESMAEL THUMS

**ESTUDO NUMÉRICO DE UM DISPOSITIVO DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE
PARA APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS DO MAR**

**São Leopoldo
2023**

ESMAEL THUMS

**ESTUDO NUMÉRICO DE UM DISPOSITIVO DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE
PARA APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS DO MAR**

Dissertação apresentado como pré-requisito parcial
para a obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade Vale do Rio
dos Sinos - UNISINOS

Orientadora:

Profa. Dra Flavia Schwarz Franceschini Zinani

Aprovada em 27 de outubro de 2023 por:

Prof^a. Dr^a. Jaqueline Biancon Copetti

Prof. Dr. Yuri Theodoro Barbosa De Lima

Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

São Leopoldo

2023

T534e Thums, Esmael

Estudo numérico de um dispositivo de coluna de água oscilante para aproveitamento da energia das ondas do mar./ Esmael Thums. – São Leopoldo, 2023.

86f.

Dissertação (mestrado) **Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São Leopoldo, 2023**

Orientador: Profa. Dra Flavia Schwarz Franceschini Zinani.

1. Energia das ondas 2. Energia Limpa 3. Coluna de Água Oscilante 4. Design Construtal 5. CFD I. Título.

CDU: 621

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a minha professora Orientadora, Flavia Schwarz Franceschini Zinani que teve muita paciência, disponibilidade, afeto, resiliência e compreensão ao longo desses anos, desde a graduação até a conclusão dessa dissertação.

Agradeço em especial ao Professor Yuri Theodoro, que acompanhou e me auxiliou dando todo o suporte necessário para que pudesse discutir os resultados, pelo apoio durante as simulações e todas as conversas sobre o trabalho.

Agradeço aos professores do PPGEM por todos os dias de estudo e toda colaboração, além de toda a acessibilidade a discussão acadêmica.

Aos colegas do PPGEM, como o Eduardo, Lenon e Kristian, por todos os trabalhos, risadas e conversas ao longo de todo o curso

Finalmente, agradeço aos meus pais, por todo o suporte, por toda ajuda e por se doarem tanto para ter um filho mestre.

RESUMO

Dispositivos de conversão de energia das ondas aproveitam a energia cinética do movimento da água do mar para conversão em energia elétrica. Dispositivos do tipo coluna de água oscilante (CAO) utilizam o movimento da superfície do mar para comprimir o ar contido em uma câmara hidropneumática conectada a um duto no qual encontra-se uma turbina, o qual, por sua vez, está acoplada a um gerador. Tendo em vista que os conversores de energia das ondas existentes possuem baixa eficiência, a literatura aponta que há espaço para a melhoria deste tipo de dispositivo. O método Design Construtal (MDC) tem sido utilizado para buscar designs que consigam aproveitar o máximo da energia disponível. Através da modelagem numérica e uso da fluidodinâmica computacional (CFD), tem-se estudado como a geometria dos conversores tem efeito no seu desempenho e como a mesma pode ser otimizada. No presente trabalho, o MDC é utilizado, com auxílio de técnicas de Design of Experiments (DoE) e otimização, para, a partir de resultados de simulações de CFD, obter o design ótimo para um dispositivo CAO com duas câmaras acopladas. O sistema considerado é um dispositivo em escala real, sujeito a ondas de comprimento igual a 65,4 m, período de 7,5 s e altura de 1 m. A razão de volumes entre as duas câmaras e as razões de aspecto de cada uma delas são os três graus de liberdade ($V1/V2$, $H1/L1$ e $H2/L2$) utilizados para a otimização do indicador de desempenho, o qual é a potência extraída por ciclo de onda. Com a geração de uma superfície de resposta foi possível observar que o melhor dispositivo foi o que teve $V1$ (Volume da câmara 1) / $V2$ (Volume da câmara 2) = 1,2, $H1$ (Altura da câmara 1) / $L1$ (largura da câmara 1) = 0,34 e $H2$ (Altura da câmara 2) / $L2$ (largura da câmara 2) = 0,1, que entrega uma vazão mássica de 34,41 kg/s, uma pressão de 2643,031 Pa e uma potência hidropneumática de 8875,15 W.

Palavras-chave: *energia das ondas do mar, coluna de água oscilante, energias renováveis.*

ABSTRACT

Energy conversion devices from waves harness the kinetic energy of seawater movement and convert it into electrical energy. Oscillating water column (OWC) devices use the motion of the sea surface to compress the air in a hydro-pneumatic chamber connected to a duct containing a turbine, which, in turn, drives a generator. Considering that existing wave energy converters have low efficiency, the literature suggests that there is room for improvement in this type of device. The Constructal Design Method (CDM) has been used to search for designs that can maximize the available energy. Through numerical modeling and the use of computational fluid dynamics (CFD), researchers have studied how the geometry of converters affects their performance and how it can be optimized. In this study, CDM is employed with the assistance of Design of Experiments (DoE) techniques and optimization to obtain the optimal design for a two-chamber OWC device based on the results of CFD simulations. The considered system is a full-scale device subjected to waves with a length of 65.4 m, a period of 7.5 s, and a height of 1 m. The volume ratios between the two chambers and the aspect ratios of each chamber ($V1/V2$, $H1/L1$, and $H2/L2$) are the three degrees of freedom used for optimizing the performance indicator, which is the power extracted per wave cycle. By generating a response surface, it was possible to observe that the best-performing device had $V1/V2 = 1.2$, $H1/L1 = 0.34$, and $H2/L2 = 0.1$, resulting in a mass flow rate of 34.41 kg/s, a pressure of 2643.031 Pa, and a hydropneumatic power of 8875.15 W.

Keywords: *Ocean wave energy, oscillating water column, renewable energies.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formas de geração de energia através das ondas	18
Figura 2 - Esquema de quebra de onda em zona costeira.....	19
Figura 3 – Dimensões e características de uma onda.	20
Figura 4 Comparação entre perfis de onda.....	21
Figura 5 - Seleção de perfil de onda	22
Figura 6 – Classificação de localização de dispositivos de conversão de energia das ondas...	25
Figura 7 - Tipos de Dispositivos de coluna de água.....	27
Figura 8 - Estágios de um conversor de energia.....	28
Figura 9 - Funcionamento de um dispositivo CAO.....	29
Figura 10 - Dispositivo UniWave.....	30
Figura 11 - Dispositivo CAO do projeto LIMPET.....	31
Figura 12 - Dispositivo Mutriku.....	32
Figura 13 - Estudo Numérico para validação experimental	34
Figura 14 - Parte experimental do estudo com o canal de ondas e o dispositivo CAO.....	34
Figura 15 – Exemplo de Superfície de Resposta: (a) Vista projetada; (b) Perspectiva.....	39
Figura 16 – Central Composite Design (CCD) para um caso com duas variáveis independentes (Var1 e Var2).....	42
Figura 17 – Exemplo de fit plot utilizado para visualização da precisão de um modelo de regressão	45
Figura 18 – Fluxograma da aplicação do Design Construtal.....	46
Figura 19 – Parâmetros geométricos avaliados nos dispositivos CAO.	48
Figura 20 - Sondas de monitoramento.....	53
Figura 21 – Método Numérico empregado ao FLUENT	56
Figura 22 – Verificação do perfil de elevação da onda.	60
Figura 23 - Malha bidimensional e suas regiões refinadas.....	61
Figura 24 - Comparativo de vazão mássica entre o presente trabalho e Lima et al. (2019)....	62
Figura 25 – Comparativo de pressão entre o presente trabalho e Lima et al. (2019).....	63
Figura 26 - Comparativo de potência entre o presente trabalho e Lima et al. (2019).....	63
Figura 27 - Geometria do Caso 7 da verificação sem alteração	64
Figura 28 - Geometria do Caso 7 da verificação com alteração proposta.....	64
Figura 29 - Comparativo visual entre trabalho de Lima (2019) e proposta em 72 e 74 s.	65
Figura 30 - Comparativo visual entre trabalho de Lima (2019) e proposta em 76 e 78 s.	66

Figura 31 - Comparativo visual entre trabalho de Lima (2019) e proposta em 76 e 78 s.	66
Figura 32 – Gráfico 3D para superfícies de resposta para vazão mássica em H2/L2.	67
Figura 33 - Gráfico 3D para superfícies de resposta para vazão mássica em H1/L1.	68
Figura 34 - Gráfico 3D para superfícies de resposta para vazão mássica em v1/v2.	68
Figura 35 – Visão bidimensional das superfícies de resposta para Vazão mássica	69
Figura 36 – Gráfico 3D para superfícies de resposta para pressão em H2/L2.	70
Figura 37 - Gráfico 3D para superfícies de resposta para pressão em H1/L1.	70
Figura 38 - Gráfico 3D para superfícies de resposta para pressão em v1/v2.	71
Figura 39 - Visão bidimensional das superfícies de resposta para pressão (Pa)	71
Figura 40 - Gráfico 3D para superfícies de resposta para potência em H2/L2.	72
Figura 41 - Gráfico 3D para superfícies de resposta para potência em H1/L1.	73
Figura 42 - Gráfico 3D para superfícies de resposta para potência em v1/v2.	73
Figura 43 - Visão bidimensional das superfícies de resposta para Potência Hidropneumática.	74
Figura 44 - Gráficos de ajuste para vazão mássica (kg/s)	75
Figura 45 - Gráficos de ajuste para Pressão (Pa).....	75
Figura 46 - Gráficos de ajuste para potência (W).....	76
Figura 47 - Geometria do caso excelente	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições de entrada e clima de ondas.	47
Tabela 2 - Limites das variáveis independentes para determinação do campo experimental inicial via CCD.	51
Tabela 3 – Parâmetros aplicados à simulação dos casos no Fluent:.....	52
Tabela 4 - Valores de GCI para malha	61
Tabela 5 - Comparativos entre o Caso 7.....	65
Tabela 6 – Caso com maior potencial hidropneumático obtido com <i>software</i> R.....	77

LISTA DE SIGLAS

AMG	<i>Algebraic Multigrid</i> (Multigrid Algébrico)
CAO	Coluna de Água Oscilante
CA	Câmaras Acopladas
CCD	<i>Central Composite Design</i> (Projeto de Composto Central)
CPU	<i>Central Processing Unit</i> (Unidade Central de Processamento)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica dos Fluidos Computacional)
OWC	<i>Oscillating Water Column</i> (Coluna de água Oscilante)
DOE	<i>Design of Experiments</i> (Design de Experimentos)
GCI	<i>Grid Convergence Index</i> (Índice de Convergência de Grade)
MAE	<i>Mean Absolute Error</i> (Erro absoluto médio)
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
NucREO	Núcleo de Reologia, Escoamentos e Otimização
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i> (Pressão-Implícita com Divisão de Operadores)
PRESTO	<i>Pressure Staggering Option</i> (Opção de Estaggering de Pressão)
RSM	<i>Response Surface Methodology</i> (Metodologia Superfície de Resposta)
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i> (Navier-Stokes Médio de Reynolds)
SIMPLE	<i>Semi Implicit Linked Equations</i> (Equações Semi implicitamente Ligadas)
SSR	<i>Sum of Squares of Residuals</i> (Soma do Quadrado dos Resíduos)
SST	<i>Total Sum of Squares</i> (Soma do Quadrado Total)
VOF	Volume de fluido
WECS	<i>wave energy conversion system</i> (Sistemas de Conversão de Energia das Ondas)
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

LISTA DE SIMBOLOS

Letras Romanas

A	Amplitude	[m]
A_E	Área de entrada da câmara hidropneumática	[m ²]
A_R	Área de Restrição Elíptica	[m ²]
A_T	Área Total	[m ²]
A_{Tran}	Área da Região de transição	[m ²]
Be	Número adimensional de Bejan	[-]
C	Celeridade	[m/s]
d_1	Eixo horizontal	[m]
d_2	Eixo vertical	[m]
E_{CAO}	Energia absorvida pelo dispositivo CAO	[J]
g	Aceleração da Gravidade	[m/s ²]
h	Profundidade da água	[m]
H	Altura	[m]
H_t	Altura Total	[m]
k	Número de variáveis independentes	[-]
K	Número de onda	[1/m]
Km	Constante da malha	[m]
l	Comprimento da chaminé	[m]
L	Comprimento da câmara hidropneumática	[m]
L_t	Largura Total	[m]
m	Massa	[kg]
\dot{m}	Vazão mássica	[kg/s]
\dot{m}_e	Vazão mássica na fronteira leste	[kg/s]
\dot{m}_n	Vazão mássica na fronteira norte	[kg/s]
\dot{m}_s	Vazão mássica na fronteira sul	[kg/s]
\dot{m}_w	Vazão mássica na fronteira oeste	[kg/s]
MAE	Mean Absolute Error (Erro Médio Absoluto)	[-]
n	Número de volume	[-]
np	Número de pontos na base de dados	[-]
Nm	Número de divisões da malha	[-]
P	Pressão	[Pa]
P_d	Pressão dinâmica	[Pa]

P_e	Pressão estática	[Pa]
P_{hid}	Potência Hidropneumática	[W]
P_{inc}	Potência da onda incidente	[W]
r	Raio	[m]
SSR	Sum of Square Residuals (Soma dos quadrados dos resíduos)	[-]
SST	Total Sum of Squares (Soma total dos quadrados)	[-]
t	Tempo	[s]
T	Período da onda	[s]
T_w	Período considerado na análise da eficiência	[s]
u	Componente da velocidade na direção horizontal	[m/s]
v	Velocidade	[m/s]
V_{ar}	Velocidade do ar na chaminé	[m/s]
v_y	Velocidade na direção y	[m/s]
w	Componente da velocidade na direção vertical	[m/s]
Z	Variável dependente/resposta	[-]

Letras Gregas

β	Coeficiente de regressão	[-]
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação	[1/s]
δ	Espessura da camada limite de velocidade	[m]
δ_t	Espessura da camada limite térmica	[m]
ϵ	Erro estatístico	[-]
κ	Condutividade térmica	[W/mK]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
μ_c	Viscosidade dinâmica característica	[Pa.s]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]

Subscritos

$()_s$	Superfície
$()_f$	Fluido
$()_{real}$	Valor real
$()_{pred}$	Valor previsto
$()_M$	Índice da malha

Sobrescritos

$()^*$	Variável adimensional
--------	-----------------------

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 DEFINIÇÃO DO TEMA.....	16
1.2 OBJETIVO	16
1.2.1 Objetivo geral.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS	18
2.2 TEORIA DE ONDAS	19
2.3 DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DERIVADAS DAS ONDAS.....	25
2.4 DISPOSITIVOS DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE.....	28
2.5 TEORIA CONSTRUTAL E DESIGN CONSTRUTAL.....	32
2.6 PESQUISAS RECENTES EM CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS	33
2.7 MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL APLICADO A SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS	36
2.8 SUPERFÍCIES DE RESPOSTA (RSM).....	38
2.8.1 Design de Experimentos (DOE)	40
2.8.1.1 Designs Fatoriais 2k e <i>Central Composite Design</i> (CCD).....	41
2.8.2 Modelos de Regressão	42
2.8.2.1 Coeficiente de determinação (R^2).....	43
2.8.2.2 Mean Absolute Error (MAE).....	44
3 METODOLOGIA.....	46
3.1. DESIGN CONSTRUTAL	46
3.1.1 Definição do sistema de escoamento	47
3.1.2 Identificação do escoamento	47
3.1.3 Restrições.....	48
3.1.4 Graus de liberdade	48
3.1.5 Determinação do indicador de desempenho	49
3.1.6 Procedimento Experimental / Simulações.....	50
3.1.7 Sondas de monitoramento	52
3.2 MODELO COMPUTACIONAL E MATEMÁTICO.....	55
4 RESULTADOS	59

4.1. VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	59
4.2. VERIFICAÇÃO DO MODELO POR COMPARAÇÃO ENTRE ESTUDOS NUMÉRICOS.....	62
4.3. RESULTADOS PARA 3 GRAUS DE LIBERDADE	67
4.3.1 Resultados para vazão mássica	67
4.3.2 Resultados para pressão.....	69
4.3.3 Resultados para Potência.....	72
5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	78
5.1. PROPOSTA DE CONTINUIDADE	79
REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, houve um aumento significativo no enfoque em recursos renováveis, resultando em avanços significativos no setor de energia das ondas. No entanto, o mercado ainda não pode ser considerado completamente comercializado, uma vez que persistem obstáculos no sistema de ancoragem para conversores de energia das ondas (WECs) (Qiao et al. 2020).

O aumento da demanda mundial de energia elétrica acompanha o avanço tecnológico e a melhoria das condições e qualidade de vida. Sabe-se que a produção de energia elétrica a partir de fontes não renováveis é o principal agente do aquecimento global e de mudanças climáticas. De acordo com Lewis et al. (2011), é conhecido que as previsões de aumento de temperatura estão a uma taxa acelerada nos últimos 50 anos. Existem ações no sentido de aumentar o uso de fontes renováveis no setor de energia, essas ações são fundamentais para que haja uma redução do impacto da temperatura no planeta.

Atualmente, a energia das ondas está em uma encruzilhada de desenvolvimento. A densidade de energia é a principal razão para adotar a energia das ondas em detrimento do solar e eólica. A densidade de energia da energia das ondas excede em muito os valores correspondentes na energia eólica e solar. No entanto, os altos custos e a baixa maturidade dos *wave energy conversion system* (WEC) levaram a dificuldades na exploração do real potencial da energia das ondas (Mahdy, et al. 2023).

No cenário presente, a energia obtida dos oceanos se torna cada vez mais uma alternativa entre as fontes de energias renováveis. O oceano é um grande reservatório de energia pouco explorado, apesar de sua energia ser dispersa, existem vários dispositivos projetados com diferentes formas e princípios físicos de funcionamento visando aproveitar as diferentes formas de energia do oceano, como: energia das marés, energia das ondas, gradientes de temperatura e salinidade e energia das correntes marítimas (Lima, 2019).

Energia do oceano utiliza o movimento oscilatório das ondas, vertical e até horizontal a fim de gerar eletricidade, esses movimentos podem ser observados tanto próximos da costa quanto na região de mar aberto, resultantes da maré astronômica a qual é resultado da interação gravitacional entre o Sol, a Terra e a Lua. Dispositivos conversores de energia das ondas (CEO) se aproveitam das ondas para mover diferentes dispositivos com componentes fluidos ou não, convertendo a energia cinética e potencial da onda em energia elétrica (Bhattacharyya e McCormick, 2003).

A energia das ondas é o produto da movimentação dos ventos ao longo de uma faixa sobre a superfície do mar. A energia carregada nas ondas do mar é, então, um produto derivado da energia solar, pois o aquecimento irregular da superfície pelo sol causa os gradientes de temperatura e por consequência geram os ventos, esses ventos geram ondas de superfície, que são ondas capazes de viajar longas distâncias sem perdas significativas de energia, até o momento que se dissipam na costa (Tomalsquim, 2016).

Estudos como o de Estefen (2003) avaliaram que a energia contida nas ondas do mar tem magnitude em torno de 10 TW. Segundo Cruz e Sarmento (2004), para que seja realizada a conversão de toda essa quantidade de energia em energia elétrica destacam-se a solução física encontrada do dispositivo de coluna de água oscilante CAO, (do inglês: OWC – *Oscillating Water Column*), Corpos Flutuantes, que se dividem em Absorção Pontual (*Point Absorbers*) ou Progressivos (*Surging Devices*) e Galgamento (*Overtopping Devices*).

Estudos como o de Fleming (2012) mostraram que o potencial teórico de energia das ondas está entre 90 e 165 GW.

Se for observado o estado de ondas no Brasil, observa-se que o país possui mais de um sistema com diferentes climas de onda ao longo da costa. As regiões sudeste e sul tendem a receber as ondulações com maior potencial de energia, fenômeno que está ligado às frentes frias em algumas épocas do ano. Esta região totaliza aproximadamente 22 GW. Já o litoral do nordeste é caracterizado por ondulações inferiores, porém essa ondulação tem característica de ser constante no ano todo (Tomalsquim, 2016).

A região mais ao sul do Estado do Rio Grande do Sul se destaca como tendo o maior potencial energético em comparação com o restante da costa brasileira, apresentando uma potência média anual de 6,7 kW/m de frente de onda para dispositivos próximos da costa e 22,3 kW/m para dispositivos longe da costa, entretanto, a potência disponível pode se aproximar de 40 kW/m de face de onda (Gomes, 2014; Lisboa et al., 2016).

O conversor de energia das ondas Yongsoo com coluna de água oscilante (CAO) de 0,5 MW foi instalado no local de teste de energia das ondas do Instituto de Pesquisa de Navios e Engenharia Oceânica da Coreia, na Ilha de Jeju. Este dispositivo tem sido usado para avaliar o desempenho da geração de energia a partir das ondas do mar, demonstrar uma lógica de controle de operação ideal e testar a tecnologia de gêmeo digital. Além disso, conforme um relatório recente da Agência Internacional de Energia (IEA), o sistema está sendo adaptado para a produção de hidrogênio verde a partir do próximo ano, marcando um avanço importante na utilização da energia marinha para produção de energia limpa. O dispositivo em questão é parte de um local de teste maior, com capacidade de 0,5 MW, projetado para

acomodar diversas tecnologias de conversão de energia das ondas. Este local possui cinco berços de teste em diferentes profundidades de água, variando de 15 a 60 metros. (Garanovic, 2023).

Este estudo busca abordar a importância crescente da energia das ondas como alternativa renovável em um contexto global de aumento da demanda por energia elétrica. A exploração desse potencial oferece uma oportunidade significativa de transição para fontes mais sustentáveis, abordando desafios tecnológicos, custos e variedades climáticas ao longo da costa brasileira, destacando seu papel crucial na mitigação do aquecimento global e no avanço em direção a uma matriz energética mais limpa e diversificada.

1.1 DEFINIÇÃO DO TEMA

O presente trabalho investiga numericamente alterações na geometria de um dispositivo de Coluna de Água Oscilante (CAO) em uma condição de mar aberto e em escala real, simulando uma partição do mar, esse dispositivo tem em sua composição duas câmaras acopladas, a metodologia aplicada foi o a metodologia de Design Construtal a fim de encontrar qual a melhor geometria de ambas as câmaras.

1.2 OBJETIVO

Os objetivos do trabalho são divididos em geral e específicos, de cada caso estudado, descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do estudo é maximizar a potência hidropneumática convertida disponível no dispositivo CAO com duas câmaras hidropneumáticas acopladas submetidas a ondas incidentes regulares em um problema bidimensional.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Verificar a eficiência de duas câmaras acopladas com diferentes geometrias, mantendo um volume total;
- Determinar os efeitos dos graus de liberdade V_1/V_2 , H_1/L_1 e H_2/L_2 na potência convertida com diferentes geometrias;
- Determinar a geometria ótima para um dispositivo CAO e a potência máxima convertida para duas câmaras;

- Comparar o desempenho do CAO de 2 câmaras de diferentes geometrias com as geometrias de dispositivos dos casos 6, 7, 8 e 9 encontradas por Lima *et al.*, 2019.
- Comparar e sugerir uma alteração geométrica no estudo do caso 7, alterando a distância entre o fundo do dispositivo e a entrada da câmara de 10,63 m para 10 m;

1.3 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES

A investigação dos objetivos específicos deste trabalho é essencial devido à crescente importância da energia renovável, em particular, a energia das ondas do mar, como uma fonte promissora de produção de eletricidade sustentável.

A eficiência e o desempenho de dispositivos de coluna de água oscilante (CAO) são fatores críticos para a viabilidade comercial dessa tecnologia. Portanto, a análise da eficiência de duas câmaras acopladas com diferentes geometrias e a avaliação dos efeitos dos graus de liberdade V_1/V_2 , H_1/L_1 e H_2/L_2 na potência convertida são fundamentais para otimizar o design desses dispositivos, maximizando sua capacidade de conversão de energia das ondas. Além disso, a determinação da geometria ótima para um dispositivo CAO e a comparação de seu desempenho com as geometrias encontradas em estudos anteriores (Lima *et al.*, 2019) contribuirão para o avanço do conhecimento nessa área, fornecendo informações valiosas para futuros desenvolvimentos de tecnologia de energia das ondas do mar e sua integração na matriz energética sustentável.

Este estudo desempenha um papel complementar e oferece contribuições significativas à literatura existente sobre dispositivos de conversão de energia das ondas, que frequentemente abordam variações nas geometrias e formatos desses dispositivos. O presente trabalho se destaca ao adotar uma abordagem inovadora, ao analisar diferentes dispositivos entre si, introduzindo assim um novo cenário para simulações numéricas e análises de design de conversores de energia das ondas. Esta abordagem busca otimizar a utilização de recursos de energia renovável, contribuindo para a racionalização e eficiência na geração de energia a partir de fontes oceânicas.

Nesse sentido, a presente pesquisa busca contribuir para o avanço do conhecimento sobre a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica, por meio da análise do design de conversores e simulações numéricas, a fim de tornar possível a exploração plena e sustentável desse recurso energético promissor.

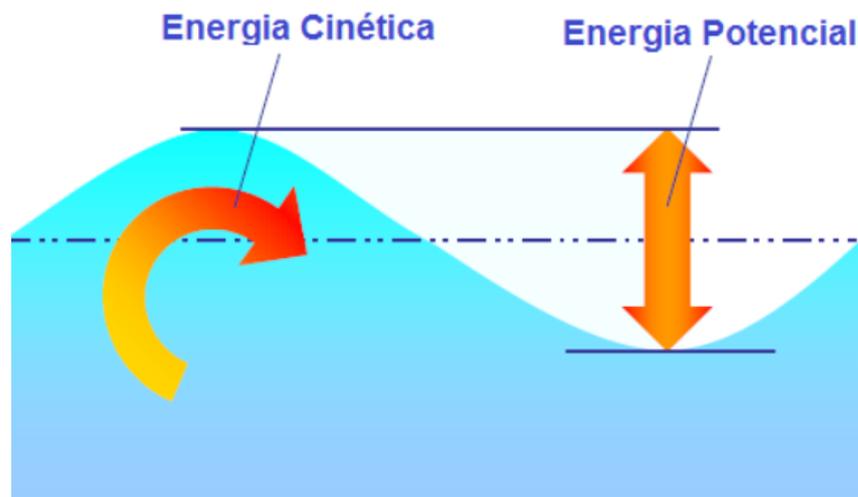
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

É considerada energia das ondas toda energia associada às ondas que são geradas pela ação do vento ao longo da superfície oceânica, nestas ondas a tensão superficial e a gravidade atuam de forma a manter o nível da superfície do fluido e viabilizam sua propagação (Dean e Dalrymple, 1991). Conforme Falcão (2010), poderia ser considerada uma energia solar, já que os ventos são uma consequência causada pelo aquecimento não uniformizado da superfície.

Segundo Tomalsquim (2016) a energia das ondas pode ser dividida em duas formas de energia, a energia cinética das partículas de água e energia potencial das partículas de água como mostra a Figura 1.

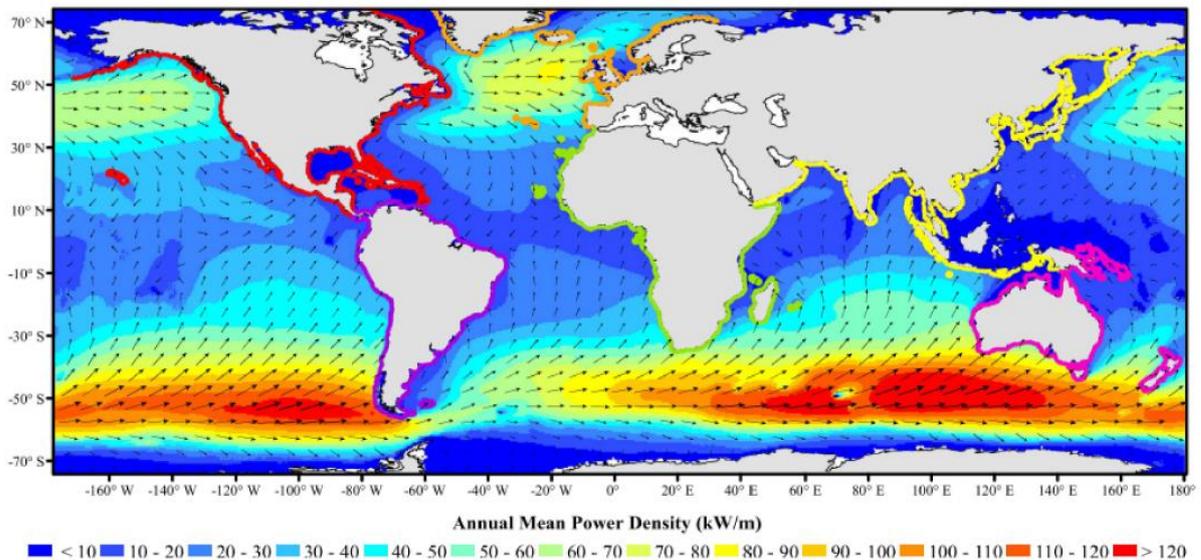
Figura 1 – Formas de geração de energia através das ondas



Fonte: Tomalsquim, 2016.

A energia das ondas tem uma potência estimada mundialmente de aproximadamente 3,7 TW de potência útil a ser extraída (Mork et al, 2010). A potência média é relativamente maior em grandes latitudes, onde variam de 40 a 100 kW/m de frente de onda, para uma onda ser considerada boa para exploração a energia de frente de onda deve variar de 20 a 70 kW/m conforme Figura 2, é possível identificar que os melhores campos para obtenção de energia se encontram próximos aos polos do globo, gerados principalmente pelo diferencial de temperatura, embora sejam os pontos com maior energia, são os pontos com maior inconsistência.

Figura 2 - Esquema de quebra de onda em zona costeira



Fonte: Mork, *et al*, 2010.

Uma das características das ondas do mar é que elas podem viajar por vários quilômetros sem uma perda considerável de energia. Porém, ao se aproximarem da costa, essa perda de energia pode ser muito elevada devido à interação com o fundo em áreas *onshore* (áreas com baixas profundidades). Inicialmente a velocidade diminui, assim como o comprimento de onda, e aumenta a altura, gerando a quebra da onda. As maiores perdas ocorrem devido aos efeitos de fundo, fazendo com que apenas uma pequena parcela da energia inicial chegue à costa (Dean e Dalrymple, 1991).

2.2 TEORIA DE ONDAS

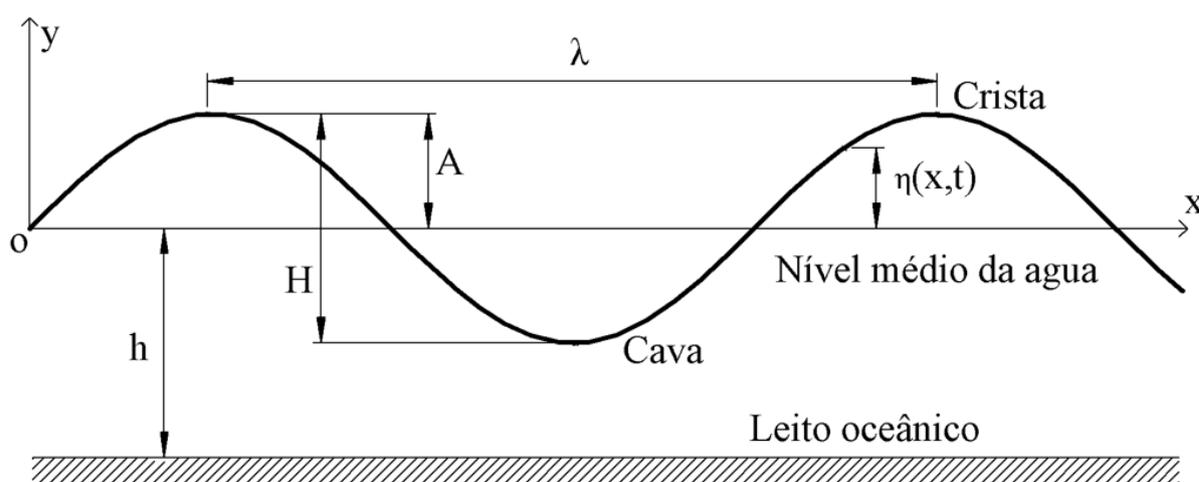
Segundo Cruz e Sarmiento (2004) as ondas do mar são classificadas por critérios: segundo sua frequência ou período, pelas forças perturbadoras e restauradoras. A transferência de energia acontece da atmosfera para o oceano pelo vento, resultando no movimento da superfície do oceano, também conhecida por agitação marítima.

As ondas do mar, conhecidas também por ondas da gravidade podem ser influenciadas por diversos fatores, esses resultam em ondas de diferentes formas e tamanho, dependendo da sua magnitude e intensidade atuante sobre a água (Dean e Dalrymple, 1991). Podem ser considerados quatro principais fatores: corpos se movimentando na superfície, a influência dos ventos, abalos sísmicos e as forças exercidas gravitacionalmente pelo sol e lua, cada qual exerce movimentos diferentes da água (McCormick, 1981).

As ondas oceânicas podem ser dimensionadas em três elementos: Período (T) que define o tempo de oscilação completa, a altura entre a cava e a crista da onda (H) e a profundidade entre a linha média entre a cava e crista da onda e o fundo do mar (h) (Chakrabarti, 2005).

A Figura 3 mostra as principais dimensões e características de uma onda, comprimento de onda (λ) é dada pela distância entre a crista ou cavas de duas ondas sucessivas, a elevação da superfície (η) é o posicionamento da superfície livre relacionado ao nível médio (Dean e Dalrymple, 1991).

Figura 3 – Dimensões e características de uma onda.



Fonte: Adaptado de Lima et al. (2021)

O comprimento da onda, é dado pela Equação (1) em que o termo $\tanh(2\pi h/\lambda)$ representa a relação de dispersão da onda no mar (Dean e Dalrymple, 1991).

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (1)$$

O termo $\tanh(2\pi h/\lambda)$ que aparece na Equação (1) demonstra a correlação de dispersão de onda (Dean e Dalrymple, 1991).

A elevação da superfície (η) representa a posição da superfície livre em relação ao seu nível médio, enquanto a amplitude da onda (A) corresponde à máxima elevação em relação ao nível médio. A velocidade da onda, também conhecida como celeridade (C), é definida como:

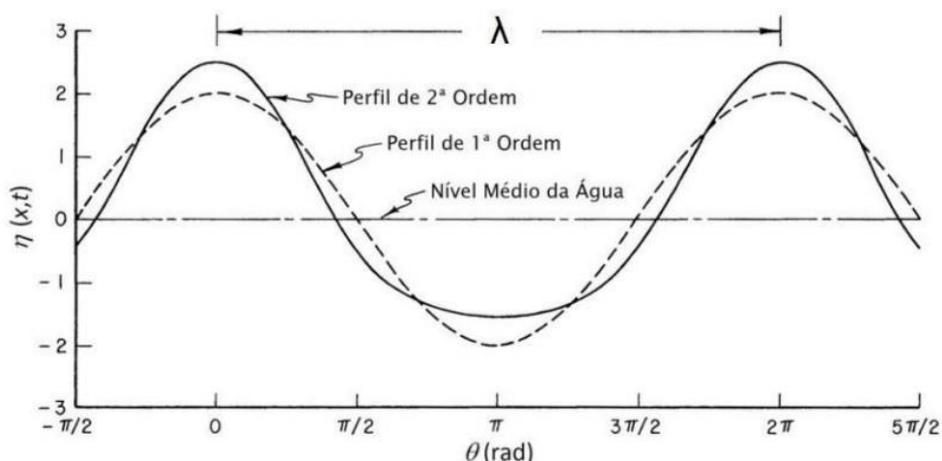
$$C = \frac{\lambda}{T} \text{ ou } C = \frac{g}{k} \tanh(kh)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Para a aplicação da teoria de ondas a ser aplicada, é importante considerar algumas características fundamentais, tais como a altura de onda (H), o comprimento de onda (λ) e a profundidade da água (h). Estas características formam os seguintes fatores adimensionais:

- Declividade (H/λ)
- Profundidade relativa (h/λ)
- Altura relativa da onda (H/h)
- Número de Ursell ($UR = \lambda^2 H/h^3$)

É possível representar ondas com cristas mais altas e cavas mais achatados utilizando a teoria de segunda ordem de Stokes, como é ilustrado na Figura 4. Além disso, ocorre o transporte de massa na direção de propagação da onda, uma vez que a solução já não apresenta o caminho das partículas como uma órbita fechada, conforme apontado por Gomes (2010).

Figura 4 Comparação entre perfis de onda



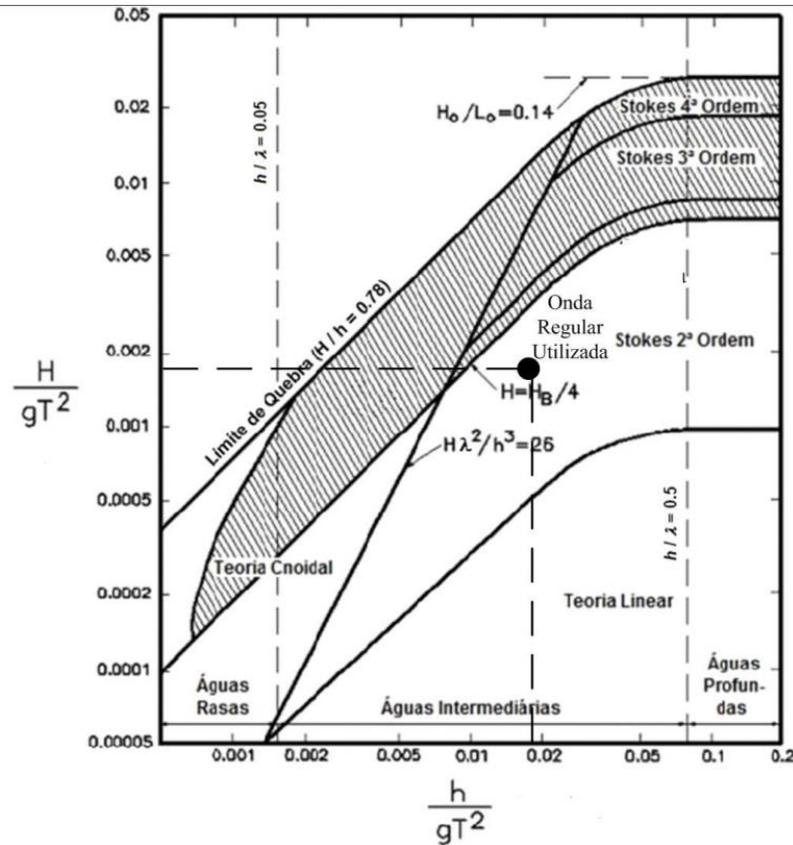
Fonte: Seibt, 2014

O gráfico presente na Figura 5 é um recurso frequentemente utilizado para selecionar a teoria de ondas adequada. É possível escolher a teoria mais apropriada para o problema através do par ordenado formado pelos parâmetros h , H e T .

O gráfico da Figura 5 é adimensional, as definições de profundidade (h), altura da onda (H), período de onda (T), e gravidade (g) são utilizados para obter a ordem de Stokes a qual a onda se aplica. No caso da onda analisada neste trabalho (Stokes de 2ª Ordem) com

período de $T = 7,5$ s, altura de $H = 1$ m e profundidade de $h = 10$ m, obtém-se os seguintes valores aproximados de $H/gT^2 = 0,0018$ e $h/gT^2 = 0,018$.

Figura 5 - Seleção de perfil de onda



Fonte: Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991

De forma simples, assumimos que o fluxo que se move na direção x do plano cartesiano, é bidimensional e os efeitos de Coriolis e a viscosidade são desprezados (STEWART, 2005). A equação para a superfície livre para uma onda de Stokes de 2ª ordem é descrita como:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3(kh)} [2 + \cos(2kx)] \cos(2kx - 2\omega) \quad (3)$$

onde a é a amplitude da onda, k é o número de onda e ω é a frequência angular ou cíclica.

O potencial de velocidade $\phi = \phi(x, y, z, t)$, que é definido como uma função onde as derivadas parciais são consideradas iguais às de velocidade das partículas de água (LIMA, 2016).

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{d\phi}{dx} \\
 v &= \frac{d\phi}{dy} \\
 w &= \frac{d\phi}{dz}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

As coordenadas x e y são horizontais e z é a coordenada vertical, localizadas a partir do leito marinho. Os componentes u , v e w são componentes de velocidade nas direções x , y e z , respectivamente.

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0
 \tag{5}$$

Pode-se obter a equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0
 \tag{6}$$

onde as condições de contorno para determinação da aplicação são:

- Velocidade do fluxo perpendicular ao fundo é zero. Considerando um fundo horizontal:

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0
 \tag{7}$$

- Partículas localizadas na superfície livre tendem a permanecer na superfície livre, então:

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial z}, \text{ para } z = h + \eta
 \tag{8}$$

- A água em sua superfície tem a mesma pressão que a pressão atmosférica, fazendo com que a forma de Bernoulli seja descrita como:

$$H_0 + \eta + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2g} + \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} = C(t), \text{ para } z = h + \eta \quad (9)$$

Ao contrário do que acontece na teoria linear, quando se consideram teorias não lineares, a trajetória de uma partícula não descreve uma órbita fechada. Esse comportamento se assemelha ainda mais ao comportamento de ondas reais com o movimento de correntes marítimas, o que indica a transferência de massa ao longo da direção de propagação da onda (Gomes, 2010).

Dessa forma, a expressão do potencial de velocidade encontrada a partir da teoria de Stokes de 2ª ordem, pode ser descrita como (McCormick, 1973):

$$\phi = \frac{H}{2} C \frac{\cos(kh+kz)}{\sin(kh)} \sin(kx - \omega t) + \left(\frac{H}{2}\right)^2 \frac{3\pi C}{4\lambda} \frac{\cosh(2kh+2kz)}{\sinh^4(kh)} \sin(2kx - 2\omega t) \quad (10)$$

Derivando a Equação (9) em relação a u e w, é possível encontrar as respectivas componentes para a velocidade de propagação da onda como [Dean e Dalrymple, 1991]:

$$u = \frac{H}{2} gk \frac{\cosh(kh+kz)}{\omega \cos(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2}\right)^2 \omega k \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (11)$$

$$w = \frac{H}{2} gk \frac{\sinh(kh+kz)}{\omega \cos(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2}\right)^2 \omega k \frac{\sinh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (12)$$

A equação para a superfície livre para uma onda de Stokes de 2ª ordem é descrita como:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3(kh)} [2 + \cos(2kx)] \cos(2kx - 2\omega t) \quad (13)$$

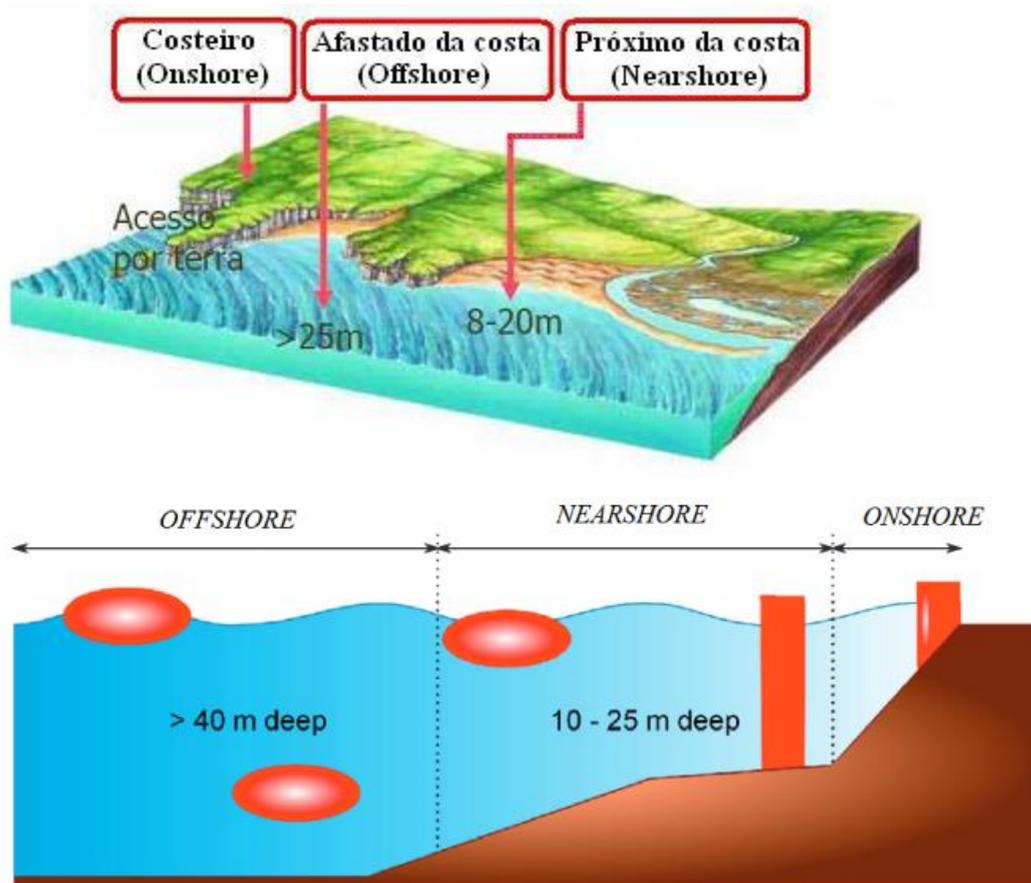
onde "z" representa a variação da posição da superfície livre da água até o fundo do mar. A teoria de segunda ordem de Stokes oferece resultados satisfatórios quando a relação entre a profundidade e o comprimento de onda é superior a 1/10, o que, na prática, abrange a maioria das aplicações de engenharia, como discutido por Gomes em 2010. No âmbito deste trabalho, adota-se uma onda que se encaixa na teoria de Stokes de segunda ordem.

2.3 DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DERIVADAS DAS ONDAS

Atualmente existem diversas formas de dispositivos sendo estudados e modelos de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica, essa grande quantidade de diversidade de dispositivo se dá pois se trata de uma tecnologia relativamente nova. Além de vários projetos em estágios avançados de produção. A diferenciação dos dispositivos, pode ser feita a partir das características, como seu princípio e funcionamento (Cruz e Sarmiento, 2004) e de acordo a sua localização e geometria.

Muitas referências adotam como forma de classificar um dispositivo a localização do mesmo em relação à beira do mar (costa). Podendo classificar em dispositivos *onshore* (na costa), dispositivos *nearshore* (próximo da costa) e dispositivos *offshore* (afastado da costa), conforme a Figura 6 (Cruz e Sarmiento, 2004).

Figura 6 – Classificação de localização de dispositivos de conversão de energia das ondas.



Fonte: Cruz e Sarmiento, 2004.

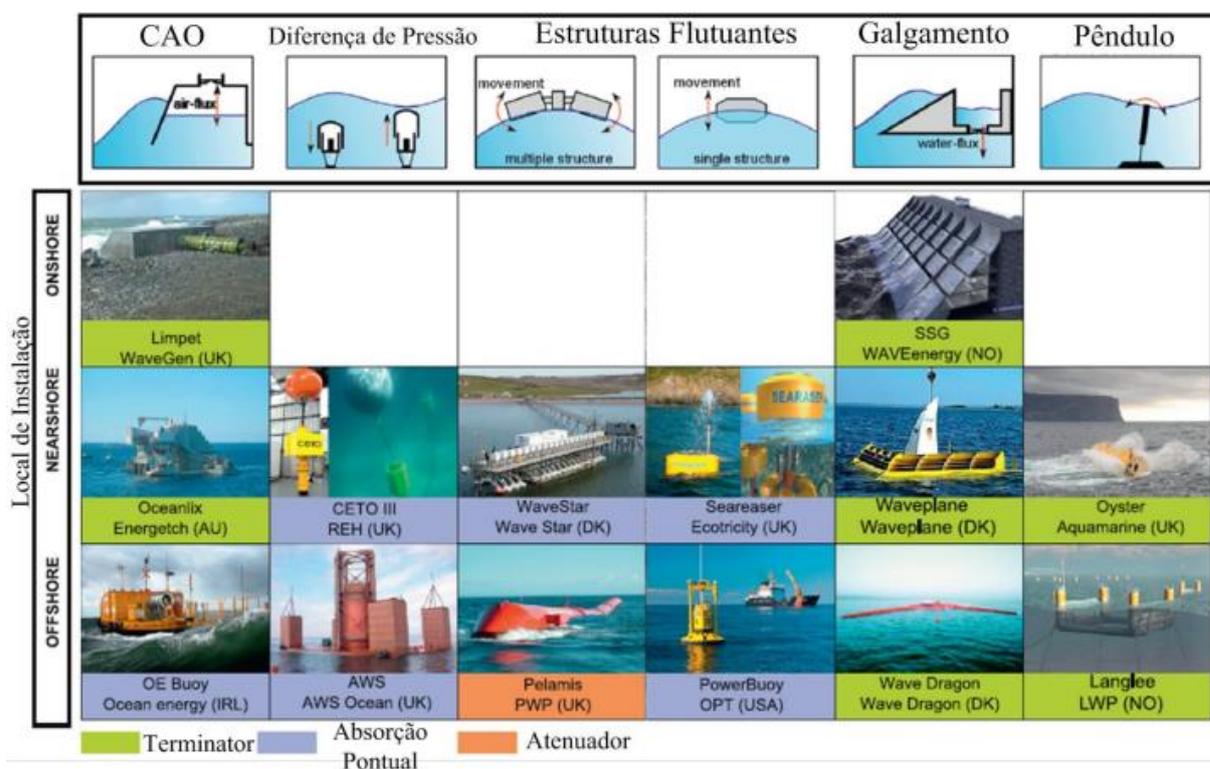
Para melhor exemplificar os dispositivos na costa (*onshore*) é possível afirmar que são os únicos dos modelos acessados por terra. Têm sua construção, instalação e manutenção facilitada, estão em terra e sua energia é de fácil distribuição. Podemos, porém, dizer que o potencial energético é inferior a todos os outros comentados, já que as ondas nesse dispositivo já estão interagindo com o fundo do mar, logo, tem sua energia reduzida, é bastante comum que os dispositivos utilizados sejam com a tecnologia de Coluna de Água Oscilante (CAO), (Lima, 2022).

Os dispositivos próximos à costa (*nearshore*), podem ser classificados como dispositivos de segunda ordem, tem como característica a instalação de 8 m a 20 m do fundo do mar, porém não ligadas à costa, tem um custo de instalação, manutenção e construção superiores aos *onshore* porém, em contrapartida, tem um maior potencial elétrico, já que as ondas estão levemente afastadas do fundo do mar.

Já o último modelo de dispositivos que são propostos, afastados da costa (*offshore*) acima de 25 m de profundidade em relação ao fundo do mar, podem ser classificados de terceira ordem, são os dispositivos onde pode-se obter os melhores resultados em energia elétrica, já que as ondas em alto mar têm alto potencial de energia. O ponto fraco destes dispositivos em alto mar é seu alto custo de instalação e manutenção, além da distância para transporte de energia elétrica gerada (Gomes, 2010).

Podemos também classificar conforme o princípio de trabalho do conversor de energia de ondas do mar. Existem três tipos principais de conversores de energia das ondas, eles são: Coluna de Água Oscilante (CAO), Galgamento e Corpos Flutuantes, que podem ser de absorção pontal (*point absorbers*) ou progressivos (*Surging devices*) (Cruz e Sarmento, 2004). Existem ainda outros tipos de dispositivos que trabalham com diferenciais de pressão, conforme Figura 7.

Figura 7 - Tipos de Dispositivos de coluna de água

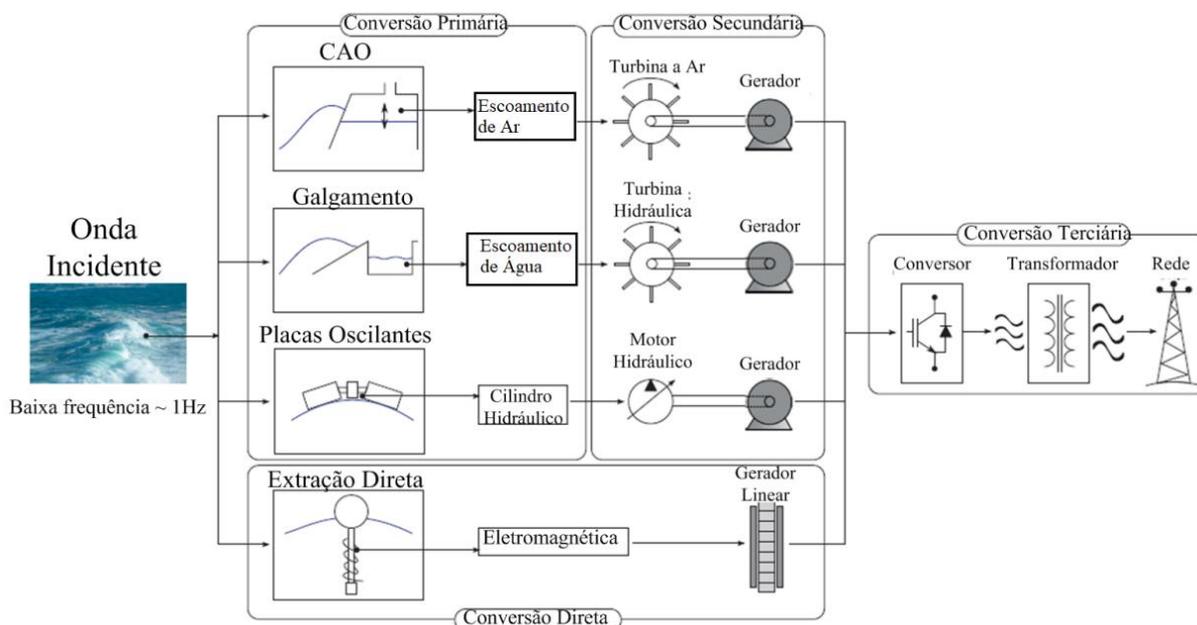


Fonte: Adaptado de PWE (2018)

A Figura 7 demonstra os diferentes modelos de dispositivos, podemos dar ênfase ao *Sea Wave*, *Wave Plane* e *Wave Dragon*, são utilizados para aproveitamento das ondas do mar através do galgamento. Esses modelos direcionam as ondas oceânicas para uma rampa e um reservatório, posicionado acima do nível do mar, onde a água é armazenada. Ao aproveitar a energia potencial dessa água armazenada, ela é devolvida ao oceano após passar por turbinas semelhantes às de hidrelétricas de baixa queda, possibilitando a conversão em energia elétrica (Cruz e Sarmiento, 2004; Iahnke, 2010).

É imprescindível realizar uma análise minuciosa do processo que abrange desde a captação da energia das ondas até sua distribuição na rede elétrica. Na Figura 8, é apresentado esquematicamente o procedimento completo de conversão da energia das ondas, juntamente com os modelos de turbinas. Inicialmente, a onda é encaminhada através de um dos dispositivos conversores, e quando uma turbina é acionada, ocorre a conversão da energia. Em seguida, a energia convertida é enviada aos transformadores e, por fim, direcionada à rede elétrica para utilização.

Figura 8 - Estágios de um conversor de energia



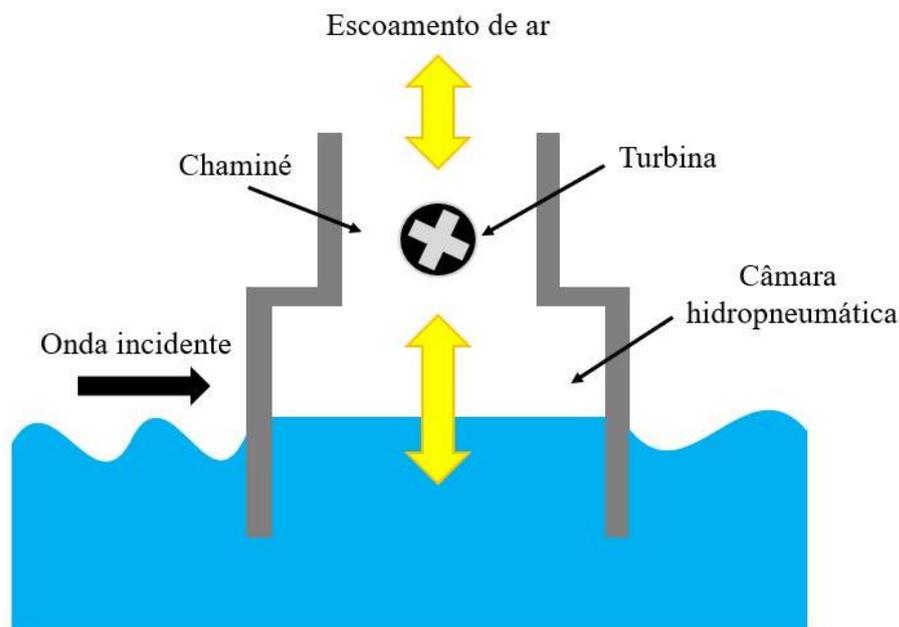
Fonte: López et al., 2013

2.4 DISPOSITIVOS DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

O modelo de dispositivo de Coluna de Água Oscilante é o tipo de dispositivo mais pesquisado cujas vantagens em comparação aos demais é que pode ser instalado próximo à costa ou diretamente na costa, além de apresentar uma operação simplificada e a manutenção com um custo reduzido, já que as peças móveis como a turbina não entram em contato com a água salina, aumentando também a sua vida útil. (Delmonte et al., 2016, Drew et al. 2009).

O primeiro dispositivo CAO proposto foi o de Yoshio Masuda nos anos 60, visando a obtenção de energia para sinalizadores marítimos, de uso de embarcações. O dispositivo proposto tinha uma câmara hidropneumática em contato com a água, em que as ondas a partir do movimento vertical, comprimem o ar durante a passagem da crista e descomprimem durante a passagem da parte cava da onda. Obrigando dessa forma o ar a passar por uma chaminé, onde está fixada a turbina acoplada a um gerador elétrico conforme Figura 9 (Cruz e Sarmento, 2004).

Figura 9 - Funcionamento de um dispositivo CAO



Fonte: Adaptada de Gomes et al. (2019)

Dispositivos CAO funcionam com uma câmara semi-submersa, aberta na parte inferior da superfície da água. O movimento das ondas aumenta e diminui o nível de água dentro da câmara, fazendo com que o volume de ar seja movido. Este fluxo de ar ativa uma turbina que gira sempre no mesmo sentido, mesmo que o fluxo de ar seja bidirecional (Cruz & Sarmento, 2004).

A fim de aproveitar efetivamente os sentidos opostos do fluxo de ar, turbinas do tipo *Wells* são frequentemente empregadas. Essas turbinas possuem a característica única de manterem o sentido de rotação de suas pás, independentemente da direção do fluxo do ar. Nesse contexto, o conjunto turbina e gerador desempenha um papel fundamental na geração de energia elétrica (Cruz e Sarmento, 2004).

Em determinados cenários, tem sido registrado que as turbinas *Wells* apresentam eficiência em torno de 30% a 42%, o que indica que somente uma fração da energia das ondas está sendo convertida de forma efetiva em eletricidade. Essa limitação de desempenho é atribuída a uma série de fatores, incluindo perdas mecânicas, resistência da água, desafios na captação da energia de ondas em diferentes direções e a complexidade do ambiente marinho (Torres, 2015).

Embora o funcionamento básico de um dispositivo de Coluna de Água Oscilante seja simples, construir um modelo preciso para descrever seu funcionamento é desafiador. É crucial para o sucesso do projeto destes dispositivos conhecer a energia incidente e as forças

atuantes, permitindo ajustar a geometria do equipamento à quantidade de energia desejada a ser extraída (LIMA, 2020).

O dispositivo CAO é um dos modelos mais testados em termos de quantidade e duração de protótipos, alguns dos quais já estão instalados e em pleno funcionamento. Destaque para o dispositivo desenvolvido pela empresa australiana *Wave Swell Energy* que leva o nome de UniWave 200 e pode ser observado na Figura 10. Este dispositivo flutuante é capaz de capturar energia das ondas do mar de forma altamente eficiente. Localizado em uma ilha isolada na Tasmânia, o equipamento gera 20 kW de eletricidade, resistindo às ondas ferozes do Estreito de Bass e fornecendo energia de forma contínua à rede local nos últimos 12 meses. O UniWave 200 pode ser transportado para qualquer lugar do oceano e conectado à rede local para distribuição de energia (Rosa, 2022).

Figura 10 - Dispositivo UniWave



Fonte: Adaptada de Rosa (2022)

Um grande projeto de dispositivo do tipo CAO em terra firme é a Central LIMPET na ilha de Islay (Escócia), que pode ser observada na Figura 11. A Central LIMPET tornou-se a primeira unidade a ser comercialmente explorada em nível global. Sua instalação ocorreu no ano de 2000, com uma capacidade de 500 kW, fornecendo energia elétrica para quatrocentas famílias da região (Wavegen apud Lima 2021). Esse dispositivo foi desligado em 2018 e somente existe a sua estrutura de concreto.

Figura 11 - Dispositivo CAO do projeto LIMPET



Fonte: Wavegen apud Lima (2021)

A usina de energia das ondas de Mutriku, localizada na Espanha, foi comissionada em julho de 2011 e é operada pela Ente Vasco de la Energía (EVE). Com um investimento de €6,4 milhões, a planta gera 296 kW de energia, suficiente para alimentar 250 residências e reduzir 600 toneladas de emissões de carbono anualmente. Financiada pelo Sétimo Programa-Quadro da Comissão Europeia, a Mutriku é pioneira na exploração comercial de energia das ondas, alcançando marcos significativos, como a primeira produção de 1 GW em 2016 (Verdict Media Limited, 2021).

Localizada em um porto frequentemente afetado por tempestades, Mutriku foi desenvolvida para resolver problemas de instabilidade e danos causados às estruturas marítimas. A tecnologia de coluna de água oscilante da Voith Siemens Hydro foi escolhida devido ao seu design simples e não disruptivo. A planta utiliza a pressão do ar gerada pela entrada e saída da água do mar nas câmaras de ar para girar turbinas, gerando eletricidade sem que a água entre em contato com as turbinas. Essa abordagem inovadora tem o potencial de influenciar o desenvolvimento global da energia das ondas (Verdict Media Limited, 2021).

Além disso, em 2019, Mutriku foi integrada à Plataforma de Energia Marinha de Biscaia (BiMEP), uma instalação de teste em alto mar para dispositivos de energia renovável. Em fevereiro de 2020, a usina atingiu o marco de gerar um total de 2 GWh de eletricidade desde sua comissão, estabelecendo um novo recorde na produção de energia a partir de ondas do oceano. A planta Mutriku (Figura 12) exemplifica como tecnologias inovadoras podem ser usadas em estruturas marítimas existentes para explorar o potencial vasto e subutilizado da energia das ondas.

Figura 12 - Dispositivo Mutriku



Fonte: VERDICT MEDIA LIMITED (2021)

O trabalho de Mahdy et al. de 2023 abordou o estado da arte em diversos tipos de Conversão de Energia das Ondas.

2.5 TEORIA CONSTRUTAL E DESIGN CONSTRUTAL

A Lei Construtal enunciada por Bejan, em 1996, é uma ferramenta de projeto que aumenta o desempenho das geometrias e sistemas na engenharia e pode explicar fenômenos naturais (Lorente, 2019). Essa lei foi inspirada na formação de ruas da cidade de Roma.

Essa teoria foi inicialmente aplicada por Bejan (1997) para dissipadores de calor otimizando os dispositivos elétricos, fornecendo uma nova visão para os projetos estruturais de condutores de calor.

A teoria construtal tem sido aplicada em estudos de diversos países, dos quais podemos destacar os Estados Unidos da América, China, França, Itália e o Brasil, e tem como principais autores a serem destacados o Bejan A., Lorente S., Chen L.G. e Rocha L.A.O. (Razera et al. 2018).

A evolução abordada por Bejan (2016) em seu livro significa que modificações de design ao longo do tempo e a disseminação dessas mudanças pela paisagem tanto animadas como as inanimadas (rios e erosões), essas mudanças são acionadas e realizadas por

mecanismos, que na evolução do design biológico os mecanismos são a mutação, seleção biológica e sobrevivência.

2.6 PESQUISAS RECENTES EM CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

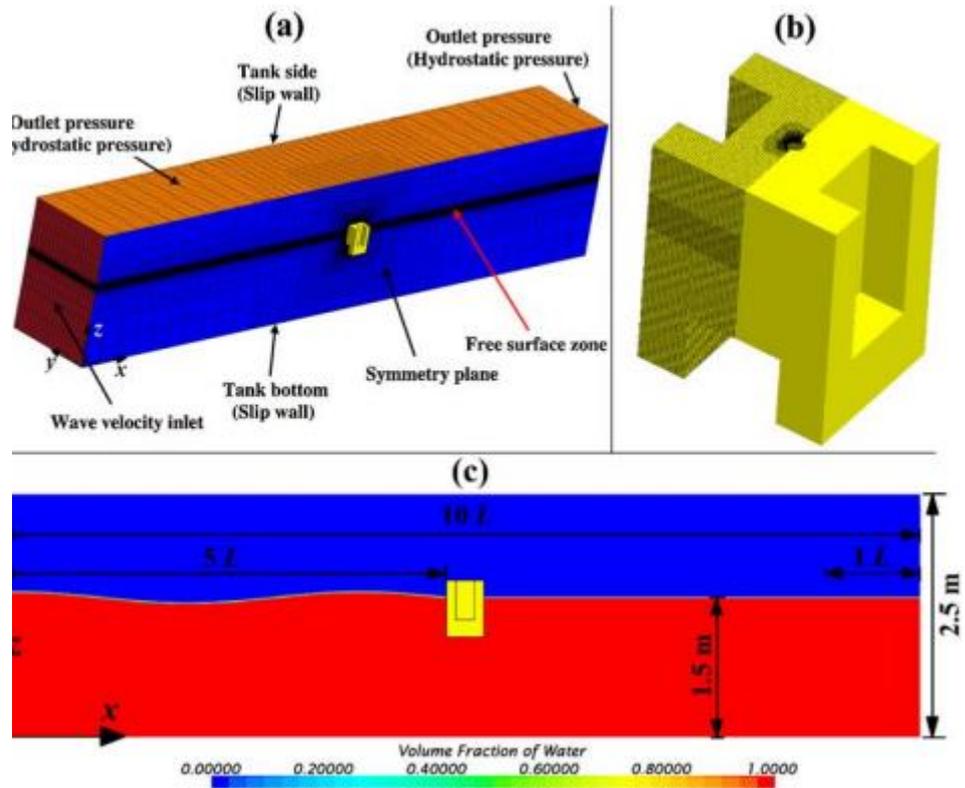
Estão sendo desenvolvidos diversos projetos e pesquisas relacionados à energia das ondas do mar, utilizando métodos de otimização como busca exaustiva e RSM, aplicando também o Design Construtal. As pesquisas abrangem uma ampla variedade de princípios de funcionamento, sendo que os mais relevantes são a Coluna de Água Oscilante, o Galgamento e as Placas Submersas.

Existem outros estudos realizados por pesquisadores brasileiros que utilizam diferentes tipos de conversores de energia das ondas em conjunto com o Design Construtal, como pode ser visto nos trabalhos de Dos Santos et al. (2014), Goulart (2014), Machado (2016), Seibt et al. (2017), Martins et al. (2017) e Barbosa et al. (2019).

O estudo conduzido por Khan et al. (2017) teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre três diferentes formas de extração de energia dos oceanos. Os autores discorreram sobre o princípio de funcionamento dos dispositivos que convertem energia das ondas, das marés e da energia térmica dos oceanos. Como resultado, a pesquisa apresentou uma revisão atualizada sobre o status dos conversores de energia das ondas.

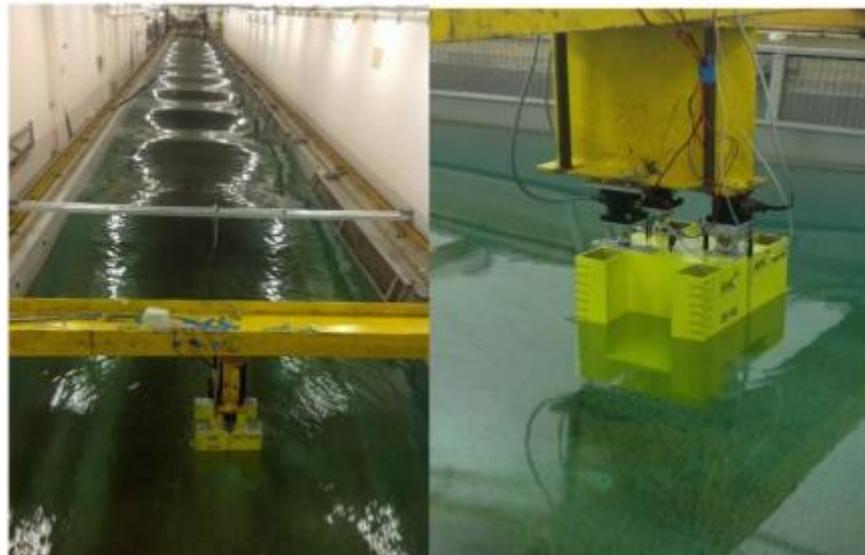
Alguns trabalhos tridimensionais também foram desenvolvidos para se assemelhar ainda mais aos dispositivos experimentais. Em Elhanafi et al., 2017, os pesquisadores conduziram um estudo numérico tridimensional (Figura 13) e experimental (Figura 14) de um dispositivo CAO, no qual ele foi submetido a diferentes alturas de ondas e períodos sob um amortecimento de tomada de força constante, simulado por uma placa de orifício de diâmetro fixo. Como resultado, foi constatado que a modelagem 2D do dispositivo CAO offshore superestimava significativamente a eficiência global de extração de energia, especialmente para frequências de onda mais altas.

Figura 13 - Estudo Numérico para validação experimental



Fonte: Elhanafi et al. (2017)

Figura 14 - Parte experimental do estudo com o canal de ondas e o dispositivo CAO.



Fonte: Elhanafi et al. (2017)

Os autores Lisboa et al. (2018) conduziram um estudo sobre um conversor de energia das ondas (CAO) instalado na costa sul do Brasil. Para realizar a investigação, eles empregaram o *software* FLUENT, que utiliza o método dos volumes finitos (VOF) e o

modelo de equações de *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS) para a modelagem de turbulência. O dispositivo apresenta uma turbina do tipo Wells, com controle de pressão e velocidade de rotação ajustável, sendo que a solução para o campo hidrodinâmico foi separada da modelagem da turbina.

Em Deus et al. (2018) os autores conduziram um estudo com um dispositivo CAO que apresentava uma câmara hidropneumática com formato de duplo trapézio, submetido a um espectro de ondas do tipo Person-Moskowitz. O estudo avaliou um único grau de liberdade, que foi a razão entre a altura e o comprimento da câmara. Os resultados indicaram que a análise da configuração geométrica levou ao máximo aproveitamento da potência hidropneumática disponível, com uma diferença média de aproximadamente 40 W.

Cappietti et al. (2019) realizaram um estudo experimental de um conversor do tipo CAO e outro conversor de energia do tipo Galgamento, os quais foram acoplados. Os testes foram conduzidos em um canal de ondas, e os resultados preliminares indicaram que o dispositivo CAO-Galgamento acoplados pode ser uma alternativa aos métodos de conversão de energia das ondas. Para determinar uma maior eficiência do dispositivo, é necessário realizar um estudo da profundidade de submersão em futuras pesquisas.

O estudo de Barbosa et al. (2019) teve como objetivo realizar uma análise numérica de rampas de dispositivos bidimensionais de Galgamento por meio do código OpenFOAM. Os resultados obtidos mostraram que o OpenFOAM apresentou características adequadas para geração de ondas numéricas, quando comparado a outros códigos CFD, e que os valores de vazão mássica instantânea e quantidade de água galgada no dispositivo foram semelhantes aos encontrados pelo software FLUENT.

Guimarães et al. (2019) realizaram um estudo numérico bidimensional para avaliar o potencial energético das ondas na costa brasileira. Para isso, utilizaram simulações numéricas por meio do modelo espectral bidimensional TOMAWAC para determinar a altura significativa das ondas e a taxa de potência das mesmas. Os resultados indicaram que em áreas próximas à costa, a taxa média de potência atingiu valores de 15 kW/m, enquanto os valores offshore variaram de 18 a 20 kW/m, sendo mais comuns na plataforma Sul-Sudeste brasileira.

O estudo de Hubner et al. (2022) avalia como um conversor de energia de ondas com transbordamento se comporta sob a incidência de ondas irregulares em comparação com ondas regulares, usando dados reais do mar. Os resultados mostram diferenças significativas na quantidade de água acumulada no dispositivo, destacando que a análise com ondas

regulares pode superestimar os resultados. Além disso, foi identificada uma relação linear entre o volume de água acumulado e o tempo.

Em Cisco et al. (2023) foi proposto um estudo numérico de um conversor de energia de ondas de galgamento submetido a ondas irregulares realísticas do mar. O objetivo deste estudo é avaliar a potência teórica que pode ser convertida por um dispositivo de galgamento sujeito a ondas do mar na região costeira de Tramandaí, além de validar o modelo de geração de ondas realísticas e representativas. Para isso, foram geradas ondas irregulares realistas usando a metodologia WaveMIMO, que permite a simulação numérica de ondas do mar por meio da imposição de dados discretos transitórios como velocidade prescrita. Para a análise numérica, foi utilizado um modelo computacional bidimensional com o Fluent, onde o dispositivo foi inserido em um canal de ondas.

Os estudos abordados na revisão do estado da arte oferecem insights cruciais para o avanço no desenvolvimento de conversores de energia das ondas. As pesquisas de Deus et al., Cappietti et al., Barbosa et al., Guimarães et al., Martins et al., Hubner et al., De Barros et al. e Cisco et al. exploram diferentes aspectos, desde configurações geométricas otimizadas até a influência de condições irregulares do mar. Esses estudos enfatizam a importância do design, da combinação de dispositivos e da consideração de condições reais para aprimorar a eficiência e a viabilidade dos conversores de energia das ondas, destacando os caminhos promissores para futuras investigações nesse campo inovador.

2.7 MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL APLICADO A SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

Na área de engenharia, o método de Design Construtal tem sido amplamente utilizado para estudar a geometria de problemas em mecânica dos fluidos e transferência de calor. Dado o grande número de estudos já publicados, é evidente a aplicabilidade do Design Construtal em conjunto com métodos de otimização. Como resultado, esta pesquisa representa uma contribuição importante para o estado da arte, uma vez que o estudo da variação geométrica de dispositivos CAO com câmaras acopladas é uma investigação inédita na literatura.

Em Gomes et al. (2012b), foi conduzido um estudo numérico bidimensional para otimização geométrica de um dispositivo CAO offshore, utilizando o Design Construtal, com dois graus de liberdade variáveis: $H1/L$ (razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO) e $H2/l$ (razão entre a altura e o comprimento da chaminé). Os resultados indicaram que o método conseguiu encontrar uma geometria com desempenho cerca de dez vezes superior ao caso padrão descrito na literatura.

Seguindo o trabalho anterior, Gomes et al. (2013a), conduziram um estudo utilizando uma onda em escala real com período de 5s para otimizar os graus de liberdade H1/L e H3 (profundidade de submersão) de um dispositivo CAO. Os resultados obtidos indicaram a geometria teórica mais eficiente para a câmara CAO. Por outro lado, Gomes et al. (2013b), realizaram uma comparação entre a localização offshore e onshore para o dispositivo CAO, utilizando uma onda em escala real e variando o grau de liberdade H1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara do dispositivo de coluna de água oscilante).

O estudo realizado em Lima et al. (2015a), utilizou o método Design Construtal em conjunto com o método de busca exaustiva para encontrar a geometria de maior desempenho em termos de potência hidropneumática, considerando diferentes formas da região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO. Foram analisadas formas geométricas trapezoidais e semicirculares.

Lima et al. (2017) realizaram um estudo numérico da altura e largura da câmara hidropneumática para dois dispositivos CAO acoplados, com o objetivo de otimizar o desempenho dos mesmos. Como resultado, foi obtida uma recomendação teórica numérica para a elevação da altura dos dispositivos acoplados.

No estudo realizado por Lima et al. (2018a), foram examinados três diferentes graus de liberdade em um dispositivo CAO acoplado. Os autores analisaram as relações entre a altura e a largura das câmaras hidropneumáticas, bem como a altura e espessura da coluna que divide os dispositivos. Os resultados indicaram que, ao utilizar os graus de liberdade avaliados como valores de referência, houve um aumento na potência hidropneumática.

O estudo de Letzow et al. (2020), avaliou um dispositivo OWC onshore em escala real utilizando três graus de liberdade: a relação entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática, a relação entre a altura e o comprimento da rampa do dispositivo e a profundidade de submersão do dispositivo. Os resultados indicaram que a utilização da rampa no fundo do mar resultou em uma conversão de potência máxima 37,3% maior do que o melhor caso sem a rampa.

Lima et al. (2021) realizaram um estudo numérico em dispositivos CAO com uma variação de uma a cinco câmaras acopladas. O principal objetivo foi avaliar a influência da geometria e do número de câmaras acopladas para maximizar a potência hidropneumática disponível convertida no processo de extração de energia. O trabalho encontrou que, entre os casos examinados, o dispositivo com cinco câmaras acopladas converte mais energia do que os outros e que há um ponto de inflexão no indicador de desempenho de potência

hidropneumática que à medida que o valor do grau de liberdade aumenta, caracterizando uma diminuição no valor do indicador de desempenho.

Em Tavares et al. (2011) foram encontrados resultados de uma simulação numérica de ondas irregulares e regulares realizada pelo software Fluent para avaliar a potência hidropneumática disponível em um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo CAO. A simulação indica que o período de pico (T_p) é mais preciso para estimar a potência disponível do que o período médio (T_m) do estado de mar. No entanto, os resultados foram obtidos para uma única geometria de dispositivo e um único estado de mar, sendo necessários estudos adicionais para confirmar a relação em outros casos. Os resultados destacam a importância de simulações numéricas precisas para avaliar o desempenho de dispositivos CAO em diferentes condições de ondas.

No trabalho de Dos Santos et al. (2022) foi desenvolvido um modelo computacional para estudar fluxos turbulentos em um dispositivo de coluna de água oscilante com uma turbina Savonius. O modelo obteve resultados promissores, prevendo coeficientes de potência semelhantes aos da literatura para diferentes velocidades de ponta. A simulação de um domínio de contenção aumentou o desempenho da turbina em comparação com uma turbina livre, e a imposição de uma velocidade sinusoidal teve um desempenho semelhante à velocidade constante.

2.8 SUPERFÍCIES DE RESPOSTA (RSM)

Recentemente, o trabalho de Cunegatto (2023) trouxe a aplicação da metodologia *Response Surface* (RSM) em aplicações de engenharia distintas, o que motiva o uso da mesma neste trabalho. Essa metodologia trata-se de um compilado de técnicas matemáticas e estatísticas para modelagem de sistemas, na forma de uma variável de resposta (dependente) em função de variáveis independentes, geralmente com objetivo de encontrar o máximo ou o mínimo desta função (Montgomery, 2012).

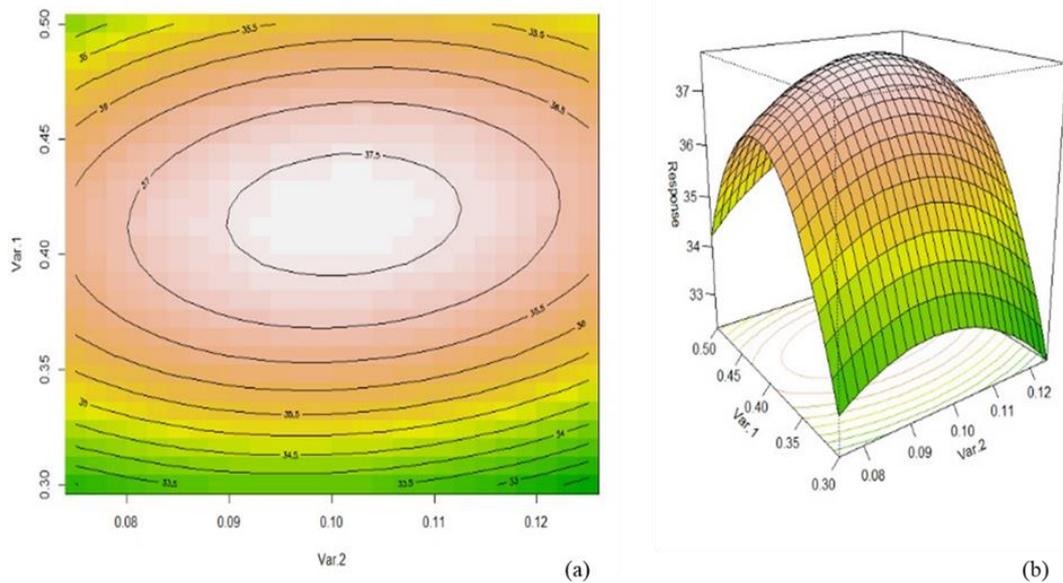
O emprego desta metodologia junto ao método Design Construtal tem sido comum dentro do grupo de pesquisa NucREO da Unisinos, devido a sua eficácia. As aplicações encontradas envolvem estudos para otimização geométrica de trocadores de calor, conjunto de aletas, micromisturadores e *stents* para escoamento de sangue. Percebe-se que a aplicação de ambas as metodologias possui sinergia, o que fornece potencial para aplicação de outros problemas de engenharia, e/ou ainda, problemas em áreas externas.

Como definição geral, o RSM envolve a otimização de uma função, cuja variável dependente Z é uma função de variável(is) independente(s) I :

$$Z = f(I_1, I_2, \dots, I_n) + \epsilon \quad (14)$$

onde ϵ representa o erro estatístico observado na resposta Z . A função obtida é utilizada para avaliação da variável dependente dentro do espaço de busca (campo experimental). Com isso, todas as soluções possíveis dentro deste espaço são calculadas, e os resultados são expostos em forma de superfícies de resposta (contornos), o que dá nome a metodologia. A Figura 15 apresenta um exemplo de superfície de resposta de um problema envolvendo duas variáveis independentes.

Figura 15 – Exemplo de Superfície de Resposta: (a) Vista projetada; (b) Perspectiva



Fonte: Cunegatto, 2023.

Na Figura 15 (a), as linhas da projeção representam a faixa de valores da variável dependente na região, e as cores representam a intensidade (gradiente). Uma região de baixo gradiente indica pouca influência da variável. Caso o gradiente de cores seja grande, a influência da variável independente é significativa. A Figura 15 (b) apresenta a perspectiva da superfície. Em geral, uma superfície de resposta pode ser apresentada em qualquer uma das formas.

Para determinação da função empregada em um RSM, é necessário um banco de dados que contém as informações necessárias para a elaboração de um modelo matemático que consiga descrever as relações entre as variáveis. A origem destes dados pode ser proveniente de experimentos, registros históricos ou observações.

A técnica mais comum para modelagens matemáticas desse tipo de problema é a utilização de polinômios, geralmente primeira e segunda ordem, mostrados, respectivamente, nas Equações 15 e 16 (Montgomery, 2012).

$$Z = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i I_i + \epsilon \quad (15)$$

$$Z = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i I_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} I_i^2 + \epsilon \quad (16)$$

onde β representa os coeficientes de regressão e k representa o número de variáveis independentes. A escolha da ordem vai depender muito do comportamento da variável de resposta. No exemplo mostrado na Figura 15, o comportamento é não-linear, exigindo um polinômio de, pelo menos, segunda ordem na modelagem.

O RSM pode ser caracterizado por um processo sequencial, ou seja, se a superfície de resposta não apresentar uma região ótima bem definida, torna-se necessário obtenção de mais dados/realizar mais experimentos, e/ou fazer uma mudança no modelo matemático, caso haja necessidade de identificação de uma superfície mais bem ajustada.

2.8.1 Design de Experimentos (DOE)

A qualidade dos dados empregados na construção dos modelos matemáticos é de fundamental importância para elaboração de uma superfície de resposta. Pesquisas em áreas como a engenharia são oriundas dos mais variados experimentos, e planejá-los e executá-los corretamente traz mais confiança nos resultados obtidos. De acordo com Montgomery (2012), aplicar técnicas estatísticas aumentam consideravelmente a eficácia de experimentos e proporcionam conclusões mais concisas. Para o uso adequado destes métodos estatísticos, o experimentalista deve cumprir os seguintes procedimentos:

- a) É imprescindível o uso do conhecimento técnico sobre o problema, não somente o estatístico. Ambos devem trabalhar em conjunto.
- b) Manter o design e a análise o mais simples possível. Técnicas estatísticas básicas são suficientes para elaboração de um planejamento adequado de experimentos. Experimentos mal planejados podem produzir resultados complexos.

- c) Reconhecer a diferença entre parâmetros práticos significativos e parâmetros estatísticos significativos. Um parâmetro definido como insignificante estatisticamente pode ser fundamental na parte prática.
- d) Experimentos são iterativos. Quanto mais experimentos são realizados, mais conhecimento sobre o processo é assimilado.

2.8.1.1 Designs Fatoriais $2k$ e *Central Composite Design* (CCD)

Conforme mencionado na seção anterior, o emprego de técnicas estatísticas promove um aumento na qualidade dos dados obtidos em experimentos. Na técnica de Design de Experimentos (DOE), designs fatoriais $2k$ são fundamentais, onde k representa o número de variáveis independentes. Já o algarismo 2, presente na nomenclatura da técnica, representa o número de níveis (*levels*) de cada variável, sendo estes os valores limites (máximo e mínimo) de cada variável.

Designs fatoriais podem ser aprimorados por meio da adição de um nível (ponto) central e/ou níveis axiais, denominados *axial points*. A junção de todos esses níveis forma a técnica conhecida como *Central Composite Design* (CCD). Trata-se de uma técnica que aumenta consideravelmente o número de experimentos, mas fornece a criação de uma base de dados robusta (Montgomery, 2012).

O ponto central, como o nome sugere, refere-se ao ponto que se localiza do centro dos demais níveis. Em um caso com duas variáveis independentes, a coordenada do ponto central (I_1, I_2) é determinada pela média entre o máximo e o mínimo de cada variável:

$$I_1 = \frac{I_{1,max} + I_{1,min}}{2} \quad (17)$$

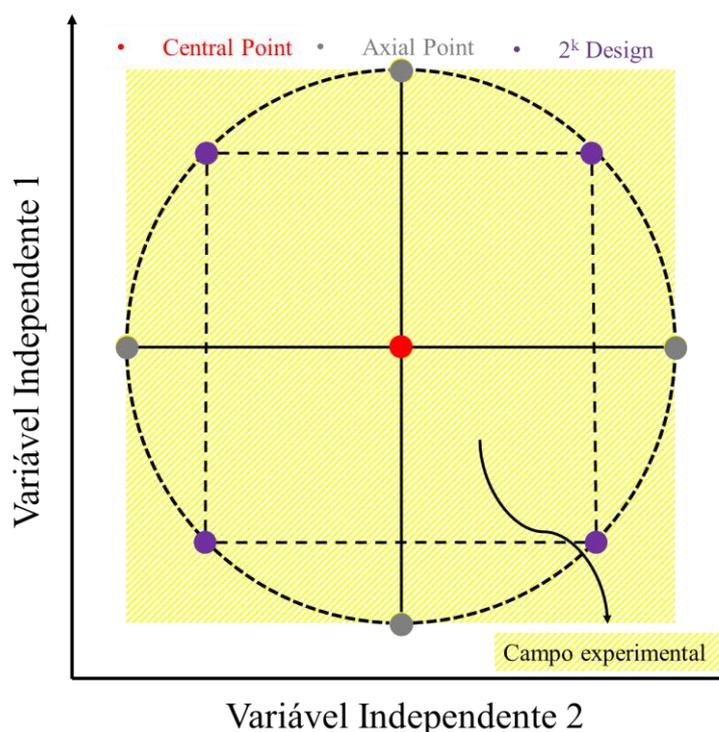
$$I_2 = \frac{I_{2,max} + I_{2,min}}{2} \quad (18)$$

A adição de pontos axiais são fundamentais para garantir a rotatividade do modelo CCD. Isso significa que os pontos (configurações) do experimento estarão distribuídos de maneira uniforme, um aspecto desejado em qualquer planejamento de experimento, pois a variância vai ser a mesma em qualquer ponto. O critério que define a rotatividade do design é o parâmetro a , expresso matematicamente por:

$$a = (2^k)^{\frac{1}{4}} \quad (19)$$

A Figura 16 mostra a distribuição dos pontos do método CCD dentro do campo experimental. Nota-se que, é possível fazer uma distribuição de pontos uniformemente espalhada, o que permite ter uma perspectiva de, praticamente, todo esse campo experimental (área hachurada), possibilitando a construção de superfícies de resposta mais definidas.

Figura 16 – Central Composite Design (CCD) para um caso com duas variáveis independentes (Var1 e Var2).



Fonte: Adaptado de Cunegatto (2023).

2.8.2 Modelos de Regressão

A denominação das funções empregadas na criação de uma superfície de resposta, ou seja, os modelos matemáticos, são chamados, dentro do campo da estatística, de modelos de regressão. Mesmo que a nomenclatura seja diferente, o objetivo é o mesmo, ou seja, descrever relações entre variáveis dependentes e independentes.

No caso da Equação 21, o modelo de regressão apresentado é uma regressão linear, enquanto a Equação 22 se trata de uma regressão polinomial. Os coeficientes de regressão (β) são parâmetros fundamentais, pois, o principal objetivo da regressão é encontrar os coeficientes que mais se adequam aos dados. Para calcular os valores de β , utiliza-se o método dos mínimos quadrados, cujos cálculos seguem a ordem das equações matriciais apresentadas na Equação 20:

$$Z = I\beta = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1k} \\ 1 & I_{21} & I_{22} & \cdots & I_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & I_{n1} & I_{n2} & \cdots & I_{nk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$I^T Z = I^T I \beta \quad (21)$$

$$(I^T I)^{-1} I^T Z = (I^T I)^{-1} I^T I \beta = \beta \quad (22)$$

onde o sobrescrito T representa a transposição da matriz (Washington, 2011). É importante salientar que devem existir registros suficientes para determinação dos coeficientes de regressão. Isso quer dizer que a base de dados deve proporcionar valores suficientes ou o modelo deve ser reduzido. Contextualizando, um experimento planejado por meio de um CCD fornece registros suficientes para aplicação de um polinômio de segunda ordem.

2.8.2.1 Coeficiente de determinação (R^2)

O coeficiente de regressão, do inglês, *R-Squared* (R^2) é um parâmetro utilizado para verificação do ajuste de modelos de regressão. O cálculo deste parâmetro envolve parâmetros que avaliam diferenças (erros): a soma dos quadrados dos resíduos (SSR) e soma dos quadrados totais (SST) (Washington, 2011). O parâmetro SSR representa a variação dos valores previstos em torno dos valores médios reais, que matematicamente é expresso por:

$$SSR = \sum_{i=1}^{np} (Z_{real,i} - Z_{pred,i})^2 \quad (23)$$

onde np representa o número de pontos na base de dados e os subscritos *pred* e *real* indicam o valor previsto e o valor real, respectivamente.

De maneira análoga, o parâmetro SST representa a variância total dos dados, ou seja, a diferença entre cada valor experimental (real), Z_{real} e o valor médio, $\overline{Z_{real}}$, elevada ao quadrado. Matematicamente é expresso por:

$$SST = \sum_{i=1}^{np} (Z_{real,i} - \overline{Z_{real}})^2 \quad (24)$$

Com ambos os parâmetros definidos, o coeficiente de determinação representa a razão entre SSR e SST , conforme mostra a Equação 25:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{np} (Z_{real,i} - Z_{pred,i})^2}{\sum_{i=1}^{np} (Z_{real,i} - \overline{Z_{real}})^2} = 1 - \frac{SSR}{SST} \quad (25)$$

O valor de R^2 varia entre 0 e 1, e, quanto mais próximo de 1, mais os resultados previstos se aproximam dos valores reais e melhor o modelo consegue explicar a relação entre as variáveis. Caso o valor de R^2 seja 1, toda variância é explicada pelo modelo; caso o valor de R^2 seja 0, o modelo não consegue explicar a relação entre as variáveis dependentes e independentes.

2.8.2.2 Mean Absolute Error (MAE)

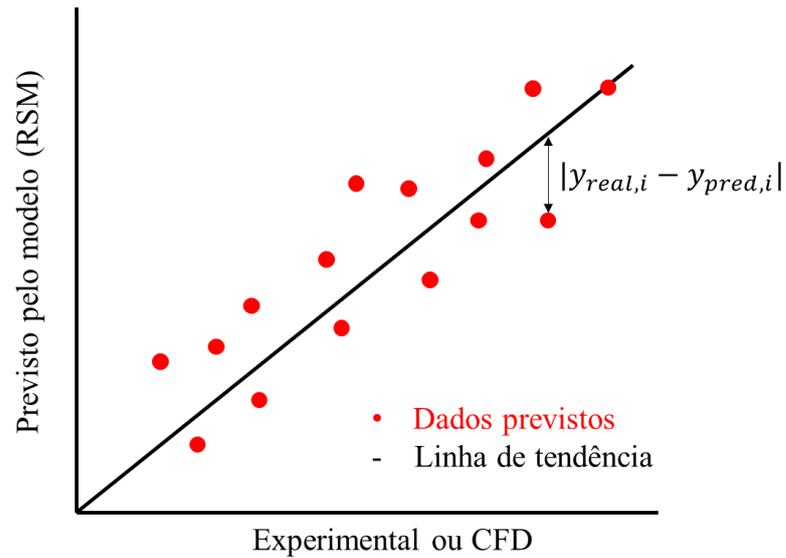
Outro parâmetro estatístico que pode ser utilizado para avaliação de modelos é o *Mean Absolute Error*, ou seja, erro absoluto médio, tratando-se de uma medida que avalia a diferença absoluta entre os valores previstos pelo modelo e os valores reais. Matematicamente, o *MAE* é expresso por:

$$MAE = \frac{1}{np} \sum_{i=1}^{np} |Z_{real,i} - Z_{pred,i}| \quad (26)$$

O valor de *MAE* possui a mesma grandeza da variável de resposta do problema. Uma vez que o erro absoluto médio representa a soma da diferença entre previsto e real, quanto menor o valor, mais próximo o modelo está de prever os dados reais.

Os valores de R^2 e *MAE*, representam um valor global do modelo, pois envolvem o somatório de todos os valores previstos e reais. Porém, estes valores podem ser observados visualmente por meio de gráficos de ajuste (*fit plots*), representado na Figura 17. Neste tipo de gráfico, os pontos representam os valores previstos pelo modelo, enquanto que a linha que parte da origem representa os valores reais.

Figura 17 – Exemplo de fit plot utilizado para visualização da precisão de um modelo de regressão



Fonte: Adaptado de Cunegatto (2023).

Visualmente, R^2 e MAE possuem semelhanças: o primeiro pode ser entendido como a proximidade dos pontos em relação a curva, ou o quanto a linha cruza os pontos; o segundo representa o somatório das “distâncias” dos pontos até a linha. Essa distância em questão é mostrada na Figura 15, e representa a diferença absoluta entre o valor previsto e o real na mesma configuração.

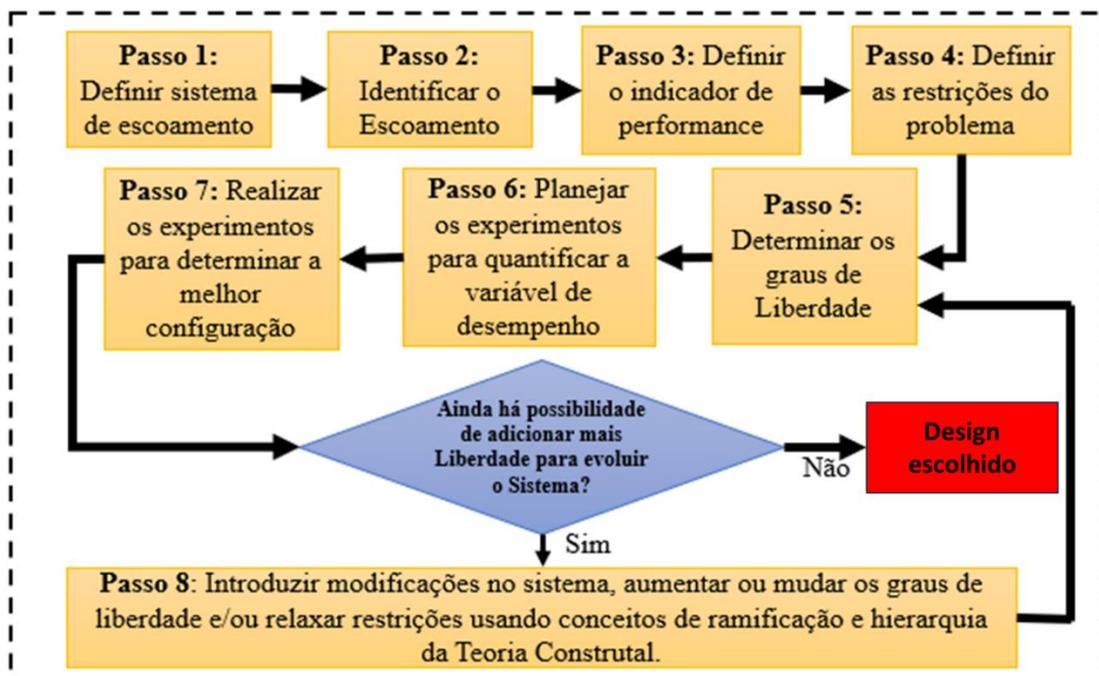
3 METODOLOGIA

Considerando os avanços e insights destacados na revisão do estado da arte sobre conversores de energia das ondas, esta metodologia propõe uma abordagem abrangente para avaliar a eficiência e o desempenho de dispositivos de captura de energia das ondas. A metodologia se concentra na análise comparativa de configurações geométricas, condições do mar e modelos numéricos realistas para aprimorar o projeto e a eficácia desses conversores de energia das ondas.

3.1. DESIGN CONSTRUTAL

O uso da metodologia de Design Construtal proposto por Cunegatto (2023) para a realização desta pesquisa segue o fluxograma apresentado na Figura 18. Esse método parte do pressuposto que um sistema tenha um tamanho finito, na aplicação de um fluido que, quando tem seu fluxo facilitado e um indicador de desempenho definido, gere um maior desempenho do sistema. Esse maior desempenho está diretamente ligado à definição das restrições e dos graus de liberdade, juntamente às configurações que apresentam melhor desempenho. A Metodologia de design construtal aceita a introdução de modificações no sistema, de forma a aumentar ou modificar os graus de liberdade, relaxar ou não as restrições, utilizando conceitos da Teoria Construtal como ramificação e hierarquia.

Figura 18 – Fluxograma da aplicação do Design Construtal.



Fonte: Adaptado de Cunegatto (2023).

3.1.1 Definição do sistema de escoamento

O primeiro passo do método de Design Construtal é definir os sistemas utilizados no trabalho, que será um canal de água com os dispositivos CAO acoplados. Os fluidos que escoam são ar e a água, porém a finalidade do dispositivo é gerar energia elétrica a partir da conversão da energia cinética e potencial.

Os sistemas utilizados nesse trabalho são dispositivos de CAO bidimensionais com duas câmaras acopladas projetados sobre um canal de ondas numéricas onde é aplicado a lei de Stokes de 2ª ordem a elas.

Com relação à altura do canal, é necessário considerar a profundidade do canal acrescida de três vezes a altura da onda, conforme descrito por Gomes, 2014. A onda empregada neste estudo é uma representação em escala real das características das ondas no litoral sul brasileiro. Os parâmetros da onda, como altura e período, foram determinados com base nas características das ondas nessa região. A Tabela 1 apresenta as dimensões do canal e os detalhes da onda considerados. Os valores foram definidos com base nas condições de ondas observadas na cidade de Rio Grande, no Sul do Brasil, conforme indicado nos estudos de Letzow, 2020.

Tabela 1 – Condições de entrada e clima de ondas.

Condições de domínio	Valores
Período da onda (T)	7,5 s
Comprimento da onda (λ)	65,4 m
Altura da onda (H)	1 m
Profundidade livre (h)	10 m
Comprimento do tanque (CT)	327 m
Altura do tanque (HT)	14 m

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.2 Identificação do escoamento

No sistema proposto, há o escoamento da água do mar sobre um fundo padronizado, paralelo e sem elevações, e o escoamento do ar na chaminé, pressurizado pela onda. Quanto mais ar a onda conseguir empurrar pela chaminé, maior será a potência extraída. Assim, o escoamento que se deseja facilitar é o escoamento de ar através da chaminé.

3.1.3 Restrições

Como esse trabalho aborda uma simulação com domínio bidirecional identificamos que as restrições são o volume das câmaras hidropneumáticas (V_{en}) e os volumes totais (V_{tn}) em que “n” é 2, já que o problema trata de duas câmaras acopladas. Nas Equações 27 e 28 respectivamente w é constante igual a 1, por se tratar de um problema bidimensional. Considera-se para o problema ondas na escala real com período de 7,5 S e 65,4 m de comprimento de onda, definidos em função do espectro de pico (Lima, 2021).

$$V_{en} = (H_n)(L_n)(w) \quad (27)$$

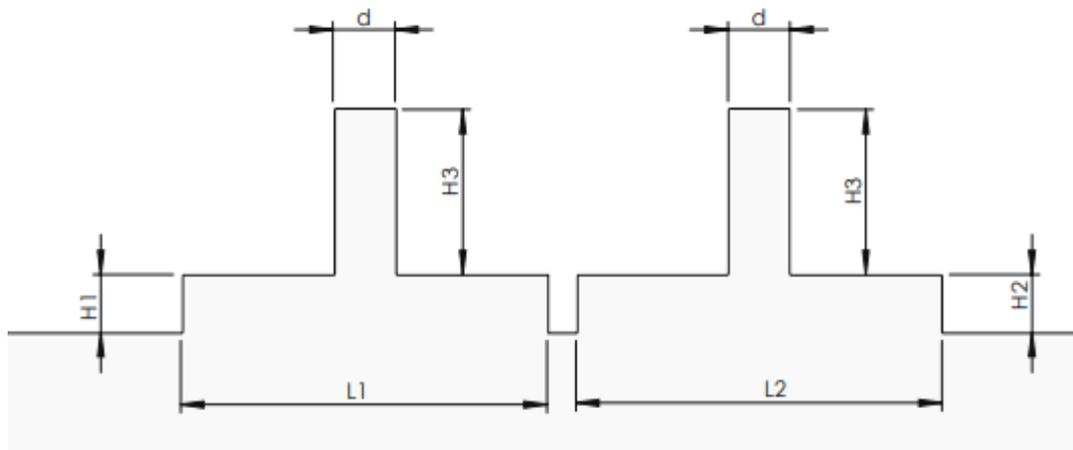
$$V_{tn} = V_{en} + (H_j)(L_n)(w) \quad (28)$$

3.1.4 Graus de liberdade

Baseado no método Design Construtal, são definidos quais os graus de liberdade e restrições, além das equações que determinam as dimensões do dispositivo CAO.

Para o dispositivo de CAO analisamos que os graus de liberdade são a relação entre a altura e largura das duas câmaras hidropneumáticas (H_1/L_1 , H_2/L_2), volume das câmaras (V_1/V_2), conforme podemos observar na Figura 19.

Figura 19 – Parâmetros geométricos avaliados nos dispositivos CAO.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com as recomendações feitas por Gomes (2014), se utilizará $L = \lambda/2$ como parâmetro de referência para determinação do campo experimental e $d = 3,056$ m e $H_3 = 9.17$ m como valores fixos para as simulações.

Os graus de liberdade variam dentro das faixas:

- $0,2 \leq V_1/V_2 \leq 0,8$;
- $0,25 \leq H_1/L_1 \leq 1$;
- $0,25 \leq H_2/L_2 \leq 1$.

3.1.3 Determinação do indicador de desempenho

No presente trabalho foi utilizado o indicador de desempenho de eficiência hidrodinâmica para o método de Design construtal, que pode ser definida pela razão entre a potência obtida e a potência incidente pelas ondas.

Segundo Brendmo, Falnes e Lillebekken (1996), o movimento que a água exerce dentro do dispositivo CAO é considerado um movimento de pistão se movendo verticalmente. A potência hidropneumática para superfície livre movendo-se verticalmente pode ser demonstrada como:

$$P_{hid} = \frac{A}{T} \int_t^{t+T} p(t)V_y(t)d(t) \quad (29)$$

onde, A é a área da chaminé, $p(t)$ é a pressão do ar na metade da altura da chaminé e $V_y(t)$ é a velocidade do ar através da chaminé no mesmo ponto da pressão.

Segundo Rodrigues (2018), a energia associada às ondas é a soma da energia cinética e energia potencial, diretamente ligada às deformações da superfície contra a força da gravidade e as partículas, logo temos a equação da energia total:

$$E_w = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (30)$$

A energia total que uma onda pode transportar é dada pela equação:

$$E_t = E_w C_g \quad (31)$$

A potência máxima atingida por um dispositivo CAO retangular e de largura “W” é calculada pela equação, sendo que w é 1 pois estamos trabalhando no campo bidimensional:

$$E_t = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g W \quad (32)$$

Então, a densidade de potência P_{onda} dada em W/m, associada ao clima de ondas é caracterizada segundo a equação (Greaves; Iglesias, 2018):

$$P_{onda} = \frac{\rho g A^2 \omega}{4K} \left(1 + \frac{2kh}{\sin(2kh)} \right) \quad (33)$$

Desta forma, o indicador de desempenho do dispositivo CAO, a eficiência hidrodinâmica ε é dada por (Greaves; Iglesias, 2018):

$$\varepsilon = \frac{P_{hid}}{P_{onda} Z} \quad (34)$$

3.1.6 Procedimento Experimental / Simulações

A etapa de experimentação (simulação) será realizada conforme Cunegatto (2023) onde o delineamento experimental (DOE) foi concebido a partir o método Central Composite Design (CCD), aconselhada para quase todas as regressões que apresentam ajuste de primeira ordem, até superior. O CCD se baseia em um modelo fatorial 2^k , um ponto central e um modelo axial, sendo que k é o número de fatores.

O arranjo dos pontos da metodologia CCD permite, já com as primeiras simulações (*runs*), ter uma visão aproximada do comportamento da variável de resposta inserido no espaço experimental. Desta forma, foi utilizado o CCD para obter um *screening* do espaço de busca (rastreamento) para obter a região de máximo. Com a região de máximo determinada, realizam-se planejamentos CCD, levando em conta regiões cada vez mais restritas do domínio, até que se obtenha o máximo global. O uso desta metodologia é concebido através da linguagem de programação *R Statistic*, via ambiente de programação *RStudio*.

Os valores iniciais para partida do estudo foram as medidas utilizadas pelo autor Lima et al. (2019), com o seu caso 08, com as medidas de $H1 = H2 = 5,49$ m e $L1 = L2 = 15,82$ m. Na Tabela 2 são apresentados os valores utilizados na configuração do modelo CCD:

Tabela 2 - Limites das variáveis independentes para determinação do campo experimental inicial via CCD.

	x1	x2	x3	v1/v2	H1/L1	H2/L2	H1	L1	L2	H2
Default	1	1	1	-	-	-	5,493	15,822	15,822	5,493
caso_1	1,2	0,175	0,175	0,885	0,218	0,132	3,661	16,771	22,959	3,024
caso_2	0,885	0,218	0,132	1,115	0,132	0,132	3,014	22,886	21,669	2,854
caso_3	1,115	0,132	0,218	1,000	0,175	0,100	3,383	19,333	25,575	2,558
caso_4	1	0,25	0,175	1,000	0,175	0,250	3,383	19,333	16,175	4,044
caso_5	0,885	0,132	0,218	1,000	0,250	0,175	4,044	16,175	19,333	3,383
caso_6	0,885	0,132	0,132	1,115	0,218	0,218	3,881	17,776	16,831	3,674
caso_7	0,885	0,218	0,218	0,885	0,132	0,218	2,844	21,592	17,832	3,893
caso_8	0,8	0,175	0,175	0,885	0,132	0,132	2,844	21,592	22,959	3,024
caso_9	1	0,175	0,25	0,885	0,218	0,218	3,661	16,771	17,832	3,893
caso_10	1	0,1	0,175	1,000	0,175	0,175	3,383	19,333	19,333	3,383
caso_11	1,115	0,132	0,132	0,800	0,175	0,175	3,190	18,227	20,379	3,566
caso_12	1	0,175	0,1	1,115	0,132	0,218	3,014	22,886	16,831	3,674
caso_13	1	0,175	0,175	1,000	0,175	0,175	3,383	19,333	19,333	3,383
caso_14	1	0,175	0,175	1,000	0,100	0,175	2,558	25,575	19,333	3,383
caso_15	1,115	0,218	0,132	1,200	0,175	0,175	3,534	20,193	18,433	3,226
caso_16	1,115	0,218	0,218	1,115	0,218	0,132	3,881	17,776	21,669	2,854

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do momento que obtemos os resultados empíricos, acontece a análise por meio da metodologia *Response surface* (RSM). Essa metodologia apresenta uma superfície de resposta ou otimização que é gerada partindo de um modelo de regressão, que descreve a relação entre as variáveis independentes e uma superfície de resposta (Q^*), colocando um comportamento aproximado do real ao problema. É feita uma avaliação de todo modelo de regressão apresentado nos casos a partir do coeficiente de determinação (R^2) e pelo erro absoluto médio (MAE) (Cunegatto, 2023).

Um aspecto crucial para as simulações numéricas é a determinação do intervalo de tempo utilizado. Neste estudo, um intervalo de tempo de 0,01 s foi empregado em todas as simulações. O tempo total para cada simulação foi de 100 s. Isso foi possível devido à implementação de uma praia numérica, que minimizou os efeitos de reflexão das ondas. Como resultado, o estudo abordou o escoamento transiente e laminar em função de sua baixa velocidade, com uma síntese de todos os parâmetros e esquemas numéricos utilizados nas simulações apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros aplicados à simulação dos casos no Fluent:

Formulação	Parâmetros Utilizados na simulação
Solução no tempo	Transiente
	Formulação implícita (1ª Ordem)
	Beseada na pressão Sem avanço iterativo
Modelo VOF	Formulação Explícita
Controle da Solução	Método de acoplamento pressão-velocidade: PISO
	Método de discretização da pressão: PRESTO!
	Formulação da quantidade de movimento: Upwind de 1ª ordem Esquema de discretização da fração geométrica: Geo-reconstruct

Fonte: Elaborado pelo autor.

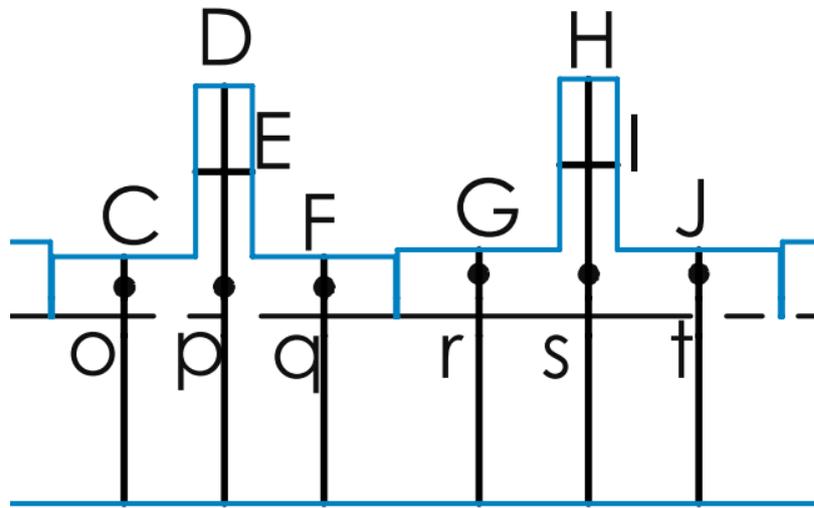
3.1.7 Sondas de monitoramento

Uma vez que todos os procedimentos para iniciar a simulação do problema em estudo foram estabelecidos e a metodologia de design construtal foi definida é fundamental determinar as superfícies de monitoramento, que consistem em sondas de medição ou superfícies distribuídas no domínio computacional para armazenar os dados em cada iteração. A interpretação dos resultados obtidos é realizada por meio das sondas previamente definidas. Nesta seção, serão apresentadas as sondas utilizadas em um dos modelos de duas câmaras empregados no presente trabalho.

A Figura 20 ilustra esquematicamente as sondas utilizadas para o problema em estudo. Para cada caso analisado, a posição das sondas varia proporcionalmente à variação geométrica do dispositivo. Em outras palavras, quando há duas câmaras acopladas, as mesmas sondas presentes na primeira câmara hidropneumática são posicionadas na segunda câmara nas posições correspondentes à segunda sonda. Essa abordagem permite manter a consistência nas medições ao longo dos diferentes cenários avaliados.

Se faz importante comentar que as posições dessas sondas variam de acordo com a configuração geométrica da câmara CAO

Figura 20 - Sondas de monitoramento



Fonte: Elaborado pelo autor.

As sondas de monitoramento verticais, C, D, F, G, H e J medem a altura da superfície livre dentro da câmara em metros, a partir da integral:

$$\int \alpha dA = \sum_{t=1}^n \alpha_t |A_t| \quad (35)$$

onde α é a quantidade de água em cada volume e A_t é a área obtida em cada volume, esse resultado, se tratando de uma linha, demonstra o comprimento de cada volume de medida bidimensional.

A média aritmética da elevação da superfície livre medida nas linhas de monitoramento indica a elevação de água no interior das câmaras do dispositivo CAO.

As sondas horizontais E e I que se localizam no centro da chaminé do dispositivo CAO tem como objetivo monitorar a vazão volumétrica, que pode ser descrita pela integral:

$$\int v dA = \sum_{t=1}^n v_t A_t \quad (36)$$

onde v é a velocidade em m/s na direção de y , e A_t é a área da superfície do plano que é atravessada pelo ar.

As mesmas linhas E e I medem a vazão mássica e a pressão estática, dada pelas integrais das equações 37 e 38:

$$\int \rho_{ar} v dA = \sum_{t=1}^n \rho_{ar,t} v_t A_t \quad (37)$$

$$\frac{1}{A} \int P_e dA = \frac{1}{A} \sum_{t=1}^n P_{te} |A_t| \quad (38)$$

onde n é o número de volumes e ρ_{ar} é a massa específica do ar.

Podemos obter a pressão total a partir da equação que engloba a pressão estática e a pressão dinâmica P_d (Pa):

$$P = P_e + P_d \quad (39)$$

E a pressão dinâmica é dada por:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho_{ar} v^2 \quad (40)$$

Já nas sondas o, p, q, r, s e t é feita a medida da pressão total, que foram utilizados no presente trabalho para o cálculo da média aritmética para problemas transientes *Root Mean Square* (RMS) (El Marjani et al., 2006):

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (41)$$

onde X é a grandeza que se deseja calcular a média de RMS.

Com os dados obtidos nas sondas é possível calcular a potência hidropneumática (W) conforme Dizadji e Sajadian (2011):

$$P_{hid} = \left(P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (42)$$

onde ρ_{ar} é a massa específica do ar em kg/m^3 e P_{ar} é a pressão estática na chaminé do dispositivo em Pa, \dot{m} é a média da vazão mássica medida na linha E e I em kg/s e v_{ar} é a velocidade do ar em m/s no centro da chaminé, dada por:

$$v_{ar} = \frac{\dot{m}}{A\rho_{ar}} \quad (43)$$

onde A representa a área transversal da chaminé em m^2 . Já que o presente estudo é bidimensional a terceira dimensão é considerada 1.

Para encontrarmos a potência da onda incidente (W) do dispositivo CAO é utilizada a equação 44:

$$P_{INC} = \frac{\rho g A^2 \omega}{4k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (44)$$

onde ρ é a massa específica da água ($998,2 \text{ kg/m}^3$), A é a amplitude da onda em metros, ω é dada a frequência da onda (s^{-1}), g é a aceleração da gravidade. O parâmetro k representa o número de onda e h indica a profundidade da água em metros (m). No presente estudo, a potência da onda incidente é calculada usando a Equação (44) e possui o valor de $5692,65W$ para os casos de ondas regulares.

3.2 MODELO COMPUTACIONAL E MATEMÁTICO

Quando os estudos de engenharia se tornam complexo e detalhados, problemas que antes pouco demandavam recursos passam a ser desenvolvidos e resolvidos por computador ou fisicamente, por meio de vários métodos: experimentalmente com protótipos, analiticamente ou numericamente por simulação numérica.

Escolher um ou mais dos métodos acima se dá a partir da complexidade do problema proposto. Dessa forma os métodos apresentam vantagens ou desvantagens sobre os outros, a depender de quais os dados de entrada estão disponíveis (Martins, 2016).

Usar um método numérico para resolver problemas que envolvem física e engenharia é algo muito presente, graças aos computadores de alta velocidade e grandes armazenamentos de informação. Com esse aumento de disponibilidade computacional, houve um aumento significativo de pesquisadores e usuários de ferramentas e metodologias de simulação numérica (Maliska, 2004).

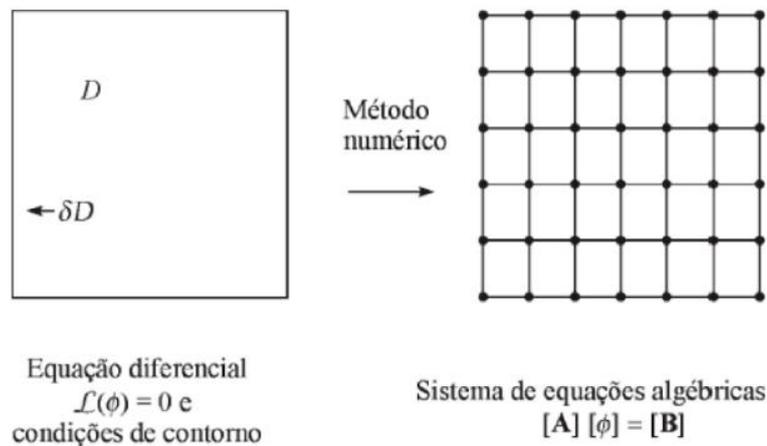
Para o presente trabalho a metodologia de pesquisa utilizada foi baseada na Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*), ferramenta essa que consiste na análise de um sistema envolvendo transferência de calor e mecânica dos fluidos. Utiliza-se essa ferramenta quando não é possível obter uma solução analítica. Pode-se dizer que, esse método converte a equação diferencial parcial em um sistema de equações

algébricas, e essas equações são resolvidas para cada elemento discreto do domínio. O CFD tem algumas vantagens: redução de custo e tempo para novos *designs*, possibilidade de estudo de sistemas onde é difícil ou até mesmo impossível de se fazer experimentações, a facilidade de observar sistemas em condições perigosas, além de não existir um limite para o detalhamento de resultados (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Os métodos mais utilizados são os métodos de Diferenças Finitas (MDF), método de volumes finitos (MVF) e método de Elementos Finitos (MEF), apresentando diferenças na maneira que as variáveis de escoamento se aproximam (Maliska, 2004).

Na grande maioria de pacotes comerciais de CFD tem elaboradas interface aos usuários, facilitando o pré-processamento e o pós-processamento (Gomes, 2014). Para o presente trabalho foi utilizado o *software* FLUENT R1 (2022) que é o pacote comercial CFD da empresa ANSYS®. No modelo de Volumes Finitos (Figura 21) empregado no presente trabalho o modelo é discretizado em volume de elementos com equações algébricas aproximadas são feitas com aproximação pela conservação das quantidades físicas.

Figura 21 – Método Numérico empregado ao FLUENT



Fonte: Maliska (2004)

No estudo apresentado foi desenvolvida as Equações 45 e 46 de conservação da massa e quantidade de movimento, onde μ é a viscosidade e $\bar{\tau}$ é o tensor das tensões (Versteeg e Malalasekera, 2007):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (45)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla(\mu \bar{\tau}) + \rho g \quad (46)$$

Para o presente estudo, e solução das equações, quando consideramos ar e água no sistema, é utilizado o Método *Volume of Fluid* (VOF), inicialmente proposto por Hirt e Nichols (1981), esse método é usado para resolver escoamentos multifásico de fluidos imiscíveis. Para o presente modelo, consideramos que cada fase é uma fração volumétrica que $0 \ll \alpha \ll 1$, satisfazendo de forma completa $\sum_{i=1}^i \alpha_i = 1$ para cada ponto de volume de controle.

Segundo Cardozo (2020) para o problema de dispositivos CAO, onde encontram-se ar e água ao longo de todo seu domínio, a soma volumétrica em cada volume de controle para ar e água, deve satisfazer de forma completa a Equação 47:

$$\alpha_{ar} + \alpha_{\acute{a}gua} = 1 \quad (47)$$

Quando se trata do volume elementar, as propriedades físicas do fluido como ρ e μ devem ser expressas como fração volumétrica de ar e água conforme Equações 48 e 49:

$$\alpha_{ar} \rho_{ar} + \alpha_{\acute{a}gua} \rho_{\acute{a}gua} = \rho \quad (48)$$

$$\alpha_{ar} \mu_{ar} + \alpha_{\acute{a}gua} \mu_{\acute{a}gua} = \mu \quad (49)$$

Com as equações listadas acima, podemos obter a equação de conservação da massa para ambos os fluidos, dada pela Equação 50:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla(\alpha \mathbf{v}) = 0 \quad (50)$$

O pacote CFD FLUENT é baseado no Método de Volumes Finitos, para uma modelagem de transferência e mecânica de fluidos em geometrias elaboradas. A modelagem CFD consiste em 3 passos: pré-processamento, processamento em si e o pós processamento, onde se analisam os dados obtidos a partir do pré-processamento (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Na etapa de pré-processamento, devemos definir a geometria do projeto, o domínio computacional, a malha, a quantidade de elementos (ou células), selecionar os fenômenos

físicos, definição de propriedades dos fluidos e as condições contorno (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Na etapa de processamento, são solucionadas as equações que o modelo do problema apresenta. Na etapa de pós-processamento é feita a identificação e interpretação dos resultados, é a fase que se gera os gráficos, animações, tabelas e arquivos de texto. Para o presente trabalho a modelagem computacional foi desenvolvida com o método de Volumes Finitos. Cada mudança geométrica apresentou a sua própria malha e uma solução numérica única. Todo o processamento que permitiram determinam a potência hidropneumática disponível, a vazão mássica e pressão e o pós-processamento.

4 RESULTADOS

4.1. VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

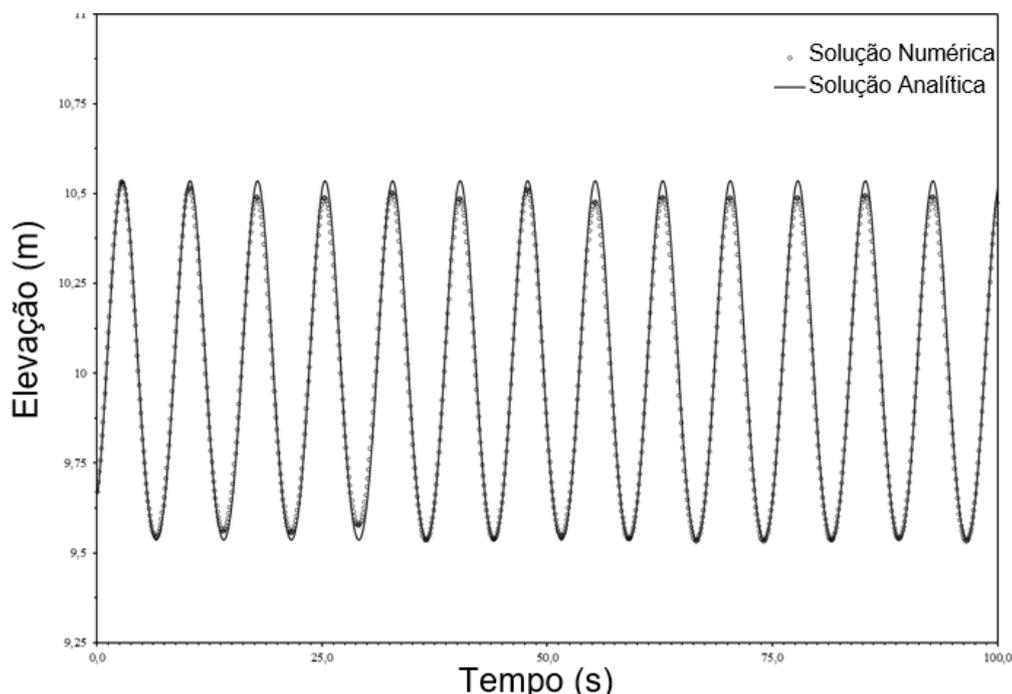
A verificação das modelagens matemáticas aplicadas busca evidenciar se o código computacional e as condições de contorno aplicado ao modelo matemático estão sendo corretamente calculadas, já que a verificação avalia se o modelo escolhido é apropriado ou não para descrever o estudo do fenômeno físico (Engineers, 2009).

A forma inicial de verificar o sistema indicada por Lima, *et al.* (2020), é testar o modelo VOF aplicado à simulação do dispositivo CAO verificando a geração da onda com as características definidas no princípio. Na simulação numérica da geração de ondas regulares em um canal de ondas, a elevação da superfície livre pode ser determinada de forma analítica através das equações de Stokes de 2ª ordem discutidas anteriormente.

No trabalho apresentado, a verificação do modelo numérico foi realizada comparando a elevação da superfície livre ao longo de todo tempo proposto na posição de $x = 90$ m obtida de forma numérica, com a respectiva solução analítica indicada acima.

Na Figura 22 são comparados os resultados analíticos e numéricos, os quais são obtidos a partir da Equação 35 e na posição $x=90$ m, essa validação foi executado em um canal sem dispositivos, evitando assim um efeito de reflexão. A comparação entre as soluções numéricas e analíticas foi instantaneamente avaliada e a média (MAE) das diferenças foi de 2,03%. Para o menor a diferença foi de 0,0044% e para o maior de 5,90%. Esses resultados demonstram a precisão do modelo.

Figura 22 – Verificação do perfil de elevação da onda.



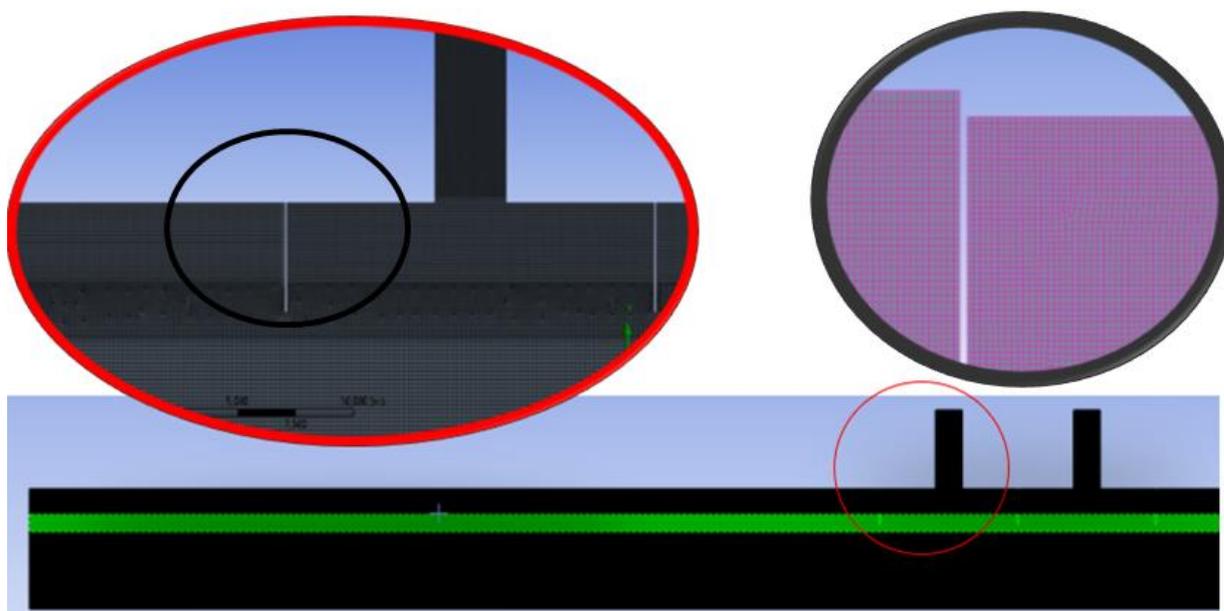
Fonte: Elaborado pelo autor.

A outra fase do projeto envolve verificar a precisão do modelo numérico, levando em conta a interação entre água, ar e a estrutura do CAO. A validação do modelo envolve comparar os resultados de experimentos com os dados calculados. Um estudo de Gomes (2014) comparou a solução numérica da interação entre água e ar, variações de pressão e velocidade dentro da câmara CAO com resultados experimentais e verificou sua precisão em comparação com o trabalho de Liu et al. (2011). O dispositivo CAO submetido a ondas com diferentes períodos (entre 3,5 e 8,0s) foi usado como geometria definida. A comparação mostrou que as soluções numéricas da relação entre a amplitude de movimento da superfície livre dentro do dispositivo CAO e a amplitude da onda incidente, a pressão máxima no interior da câmara CAO, e a velocidade na saída do dispositivo CAO apresentam comportamentos qualitativos semelhantes aos resultados experimentais (Espinel, 2015).

Para que possamos avaliar a solução numérica, foi utilizado o *Grid Convergence Index* (GCI) fundamentada por Celik (2008). Essa metodologia permite avaliar três configurações diferentes de malhas, sendo uma grosseira, uma intermediária e uma refinada.

A malha bidimensional na Figura 22 exhibe os dois dispositivos CAO acoplados, todos com o mesmo volume de entrada.

Figura 23 - Malha bidimensional e suas regiões refinadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 4, são apresentados os resultados das médias da vazão mássica e da vazão mássica no último instante de tempo na saída da chaminé, verificadas para as quais o GCI foi determinado.

Tabela 4 - Valores de GCI para malha

	Número de elementos	Média da Vazão Mássica (kg/s)	Vazão Mássica (kg/s) no último instante de tempo
N_1	245015	0,437	0.911297
N_2	465420	0,437176519	0.893652
N_3	800556	0,44653322	0.887807
GCI		0.00099%	1,43%

Fonte: Elaborado pelo autor.

No artigo de Celik, não há um valor definido para avaliar o GCI. No entanto, de acordo com Severo et al. (2021), valores de até 5% são considerados aceitáveis com base em experiência comum. Para tornar a seleção da malha mais rigorosa, este trabalho adotou um limite máximo de 2%.

Para o presente estudo, optou-se por utilizar a malha intermediária com 465420 elementos, por proporcionar uma demanda computacional muito inferior e tempos de simulação factíveis com o cronograma disponível para finalização do trabalho.

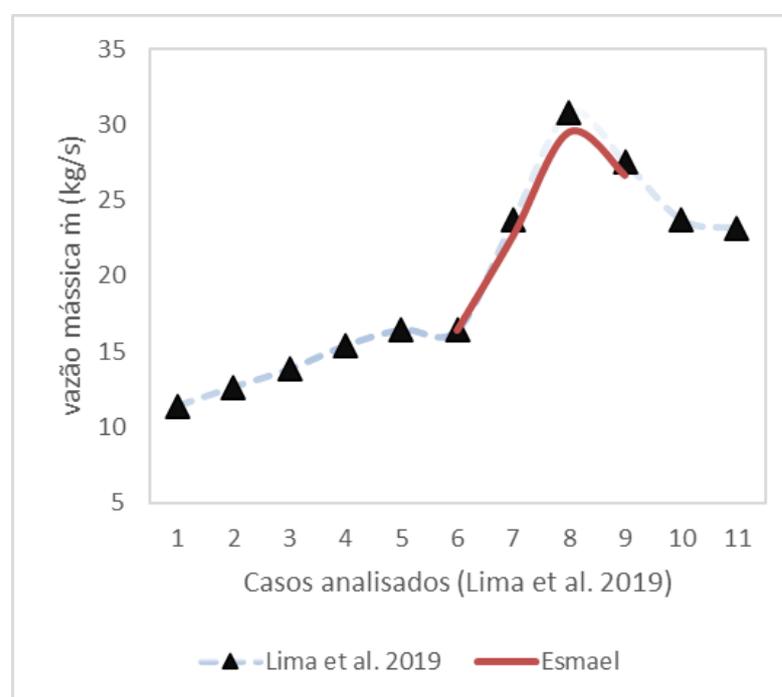
4.2. VERIFICAÇÃO DO MODELO POR COMPARAÇÃO ENTRE ESTUDOS NUMÉRICOS

Os resultados numéricos obtidos por Lima et al. (2019) foram analisados e utilizados de forma a validar a geometria com os mesmos dados de entrada e condições de contorno e geometria, comparando e verificando se o modelo matemático se alinhava com os resultados obtidos no trabalho citado.

Para validar o trabalho foram comparados os resultados para vazão mássica (kg/s) Figura 24, pressão (Pa) na Figura 25 e potência (W) na Figura 26 em 4 diferentes casos apresentados por Lima et al. (2019), os casos escolhidos são os que mais se aproximam da melhor geometria proposta no trabalho.

Podemos observar na Figura 24 que a tendência em vazão mássica é a mesma, com resultados muito aproximados com o trabalho citado, o erro máximo encontrado no comparativo do caso 9 foi de 4,52% e o mínimo de 0,26% encontrado no caso 6, evidenciando a fidelidade entre o proposto trabalho e o trabalho de Lima et al. (2019).

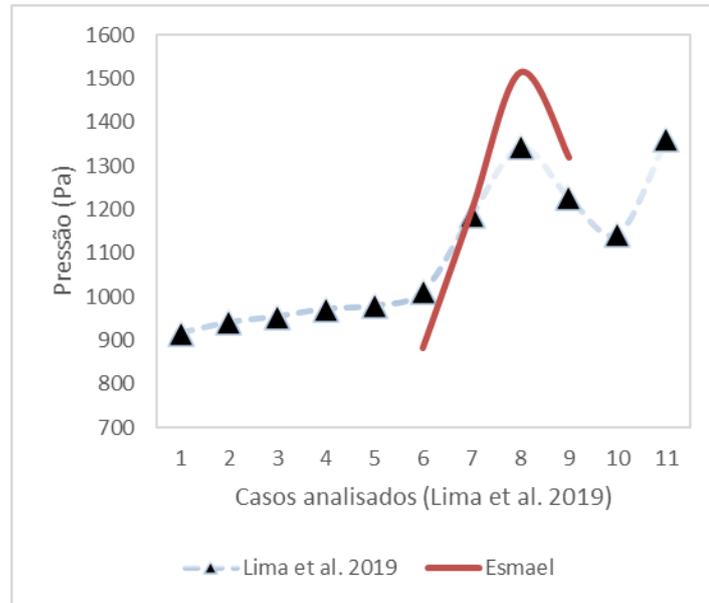
Figura 24 - Comparativo de vazão mássica entre o presente trabalho e Lima et al. (2019)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Podemos observar na Figura 25 que a tendência em pressão (Pa) é a mesma, com resultados aproximados com o trabalho citado, o erro máximo encontrado foi de 12,72% e o mínimo de 0,81%.

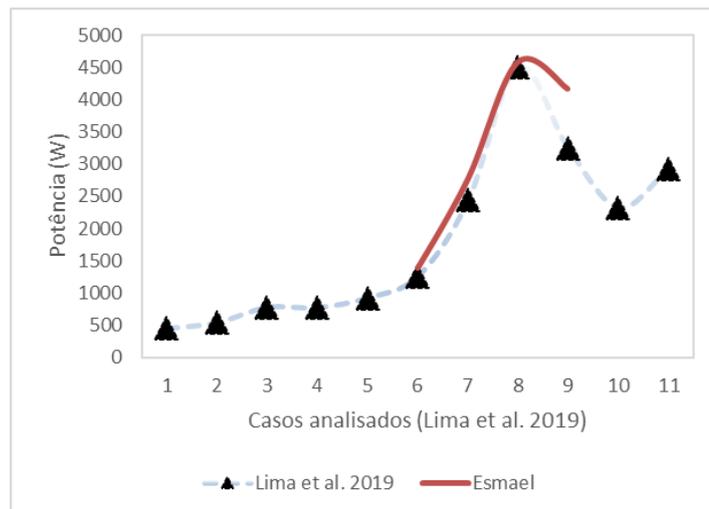
Figura 25 – Comparativo de pressão entre o presente trabalho e Lima et al. (2019)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Podemos observar na Figura 26 que a curva de potência (W) se ajusta com a do trabalho analisado, com resultados aproximados com o trabalho citado, o erro máximo encontrado foi de 10,22% e o mínimo de 1,40%, validando assim os dados de entrada e geometrias do trabalho.

Figura 26 - Comparativo de potência entre o presente trabalho e Lima et al. (2019)



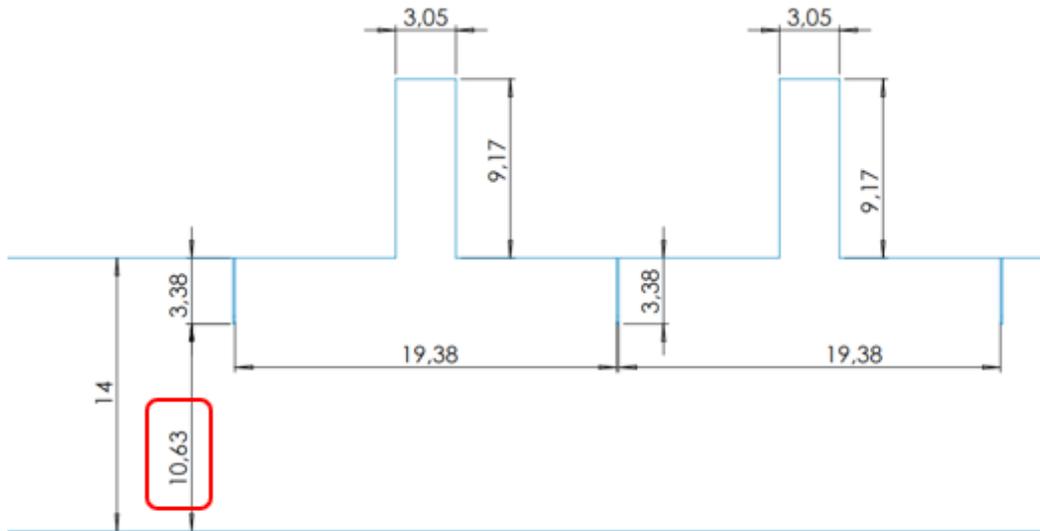
Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da comparação entre os trabalhos, uma avaliação da geometria foi realizada no caso 7. Essa avaliação consistiu na alteração da posição do dispositivo em relação ao fundo do

canal. A comparação observada nas Figuras 27 e 28. Enquanto na Figura 27, a distância do fundo para a parede do dispositivo é de 10,63 m, na Figura 28, a distância é de 10 m.

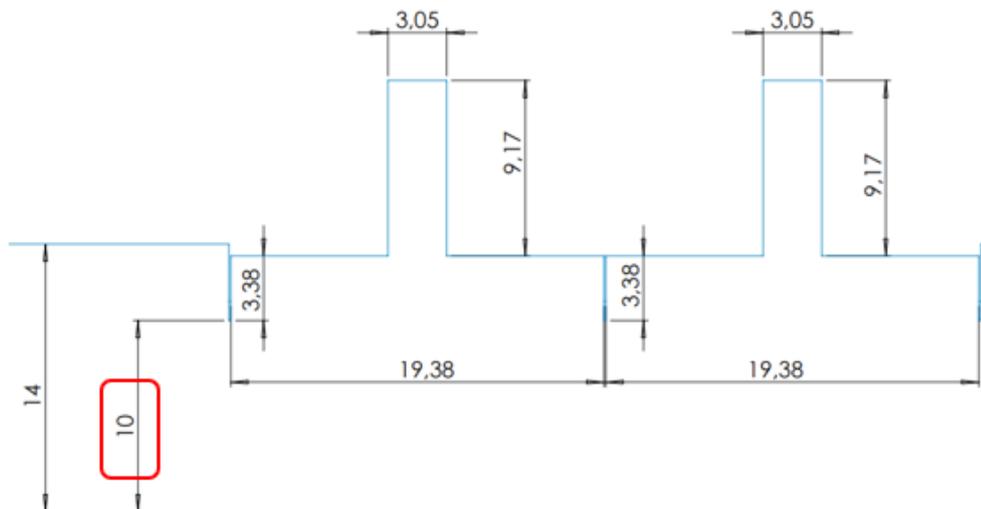
A proposta desse estudo é identificar uma geometria com maior rendimento, com um maior potencial de geração de energia hidropneumática, observando os contornos de velocidade dentro e fora das câmaras hidropneumáticas.

Figura 27 - Geometria do Caso 7 da verificação sem alteração



Fonte: Lima et al. (2019)

Figura 28 - Geometria do Caso 7 da verificação com alteração proposta



Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando os mesmos dados de entrada e condições de contorno, e alterando apenas a geometria conforme descrito acima, podemos observar que há um ganho de potência hidropneumática superior a 100%. Esse ganho pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparativos entre o Caso 7

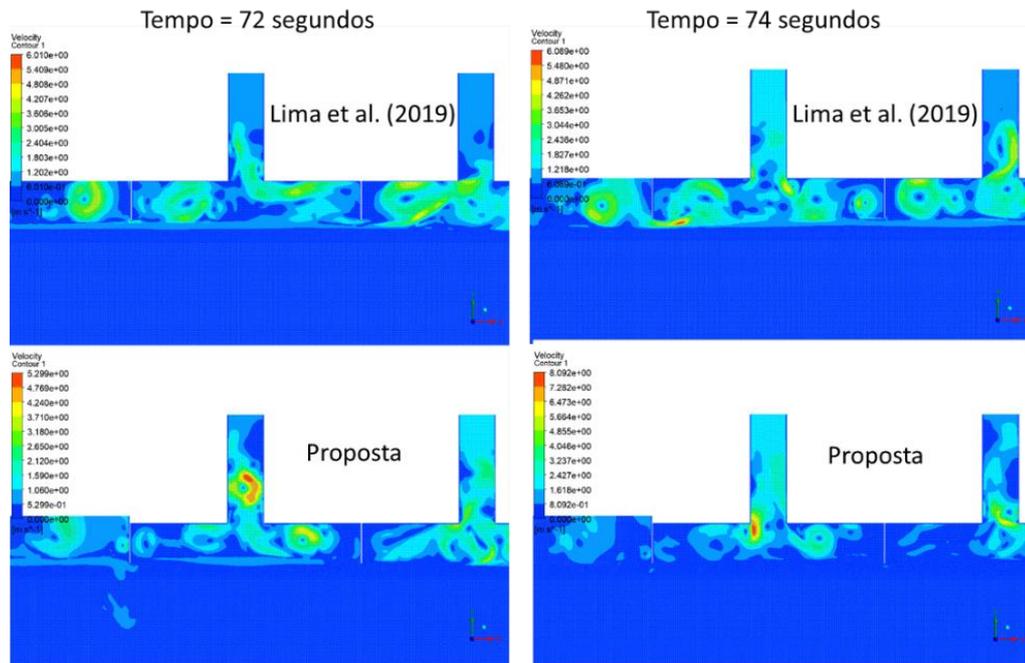
Caso 7	Vazão mássica (kg/s)	Pressão (Pa)	Potência (W)
Lima et al (2019)	23,7273	1188,269	2438,0266
Verificação	22,6545	1197,87	2763,514
Proposta	32,0909	1864,877	5920,2194
Melhoria	42%	56%	114%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Claramente, a mudança na posição da geometria tem um impacto significativo na potência. Em todos os casos analisados, a altura da superfície livre da água é mantida em 10 metros em relação ao fundo. Os resultados do estudo indicam que a parte inferior do dispositivo deve ser posicionada próxima à superfície livre da água para otimizar o desempenho.

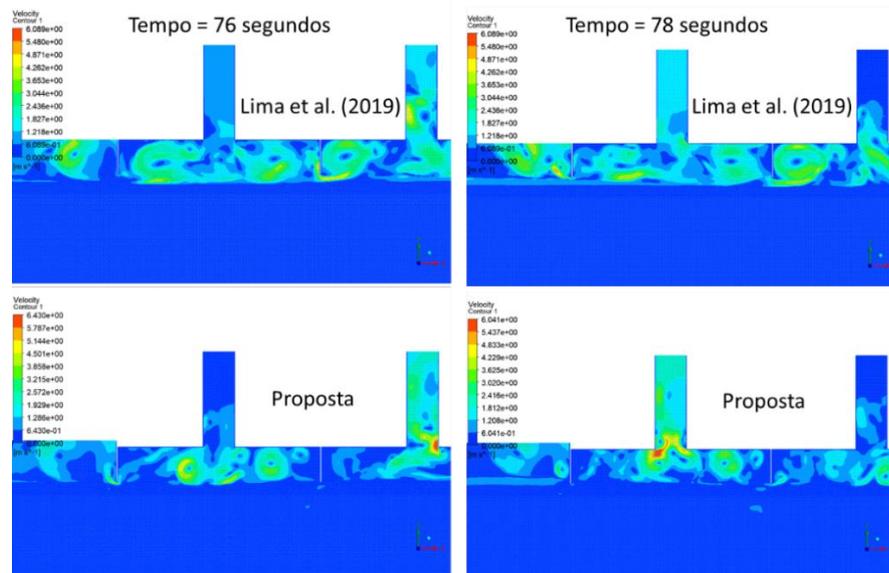
Nas Figuras 29, 30 e 31, é possível observar o comportamento do ar na região de velocidade entre as duas geometrias. Antes da entrada nas câmaras, o ar apresenta alguns vórtices bem definidos, como observado na geometria de Lima et al. (2019), enquanto na proposta do trabalho, observa-se que o ar tem um comportamento bem mais controlado dentro do dispositivo.

Figura 29 - Comparativo visual entre trabalho de Lima (2019) e proposta em 72 e 74 s.



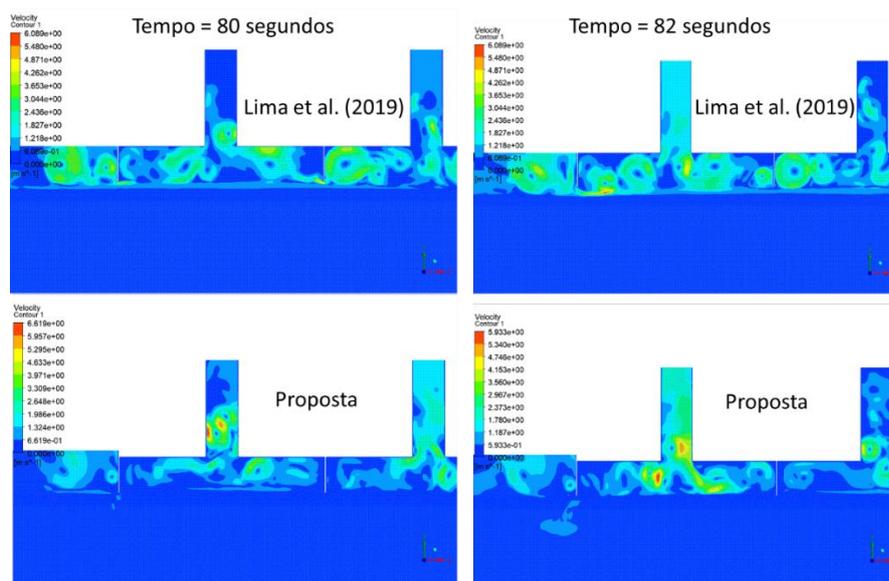
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Comparativo visual entre trabalho de Lima (2019) e proposta em 76 e 78 s.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Comparativo visual entre trabalho de Lima (2019) e proposta em 76 e 78 s.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Este resultado foi alcançado ao minimizar a perda de ar para o ambiente externo da câmara. Em contraste com Lima et al. (2019), onde a água não faz contato direto com a entrada da câmara, subindo até 10,5 metros, na proposta atual, a água permanece em contato com a câmara por pelo menos metade do tempo. Isso reduz o espaço disponível para o ar escapar para o ambiente externo, uma observação clara ao analisar as Figuras 29, 30 e 31. Ao focar no lado esquerdo da câmara 1, é notável a clara evidência dos contornos de velocidade na geometria proposta dentro da câmara, em comparação à de Lima et al. (2019) com contornos ao lado externo da câmara.

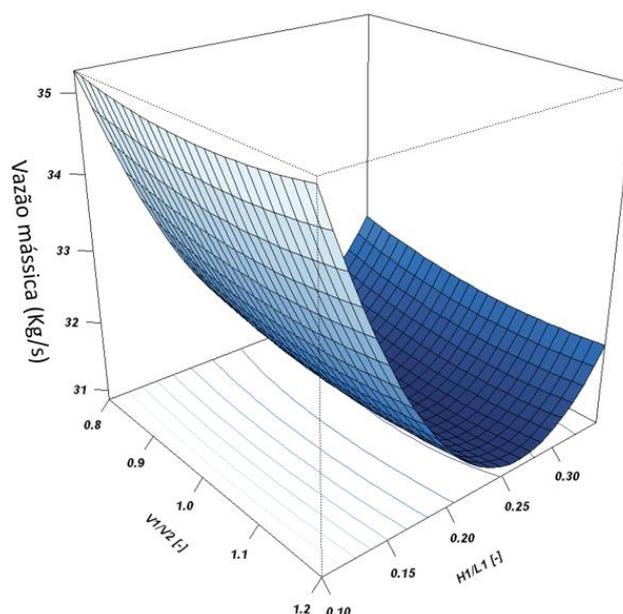
4.3. RESULTADOS PARA 3 GRAUS DE LIBERDADE

4.3.1 Resultados para vazão mássica

No âmbito do presente estudo, foram analisados os três graus de liberdade distintos, a saber, $V1$ (Volume da câmara 1) / $V2$ (Volume da câmara 2), $H1$ (Altura da câmara 1) / $L1$ (largura da câmara 1) e $H2$ (Altura da câmara 2) / $L2$ (largura da câmara 2). A partir das conclusões obtidas por meio desta análise, foi possível a obtenção de uma superfície de resposta. Esta superfície de resposta obtida é passível de representação tanto por um modelo gráfico tridimensional quanto por uma projeção bidimensional do referido modelo. A variável dependente vazão mássica (\dot{m}), por sua vez, se mostrou como uma função intrínseca das variáveis independentes ($V1/V2$, $H1/L1$ e $H2/L2$), conforme delineado com maior detalhamento nas Figuras 32, 33 e 34. Nesse contexto, identificam-se que a interdependência entre tais variáveis resulta na configuração da superfície de resposta.

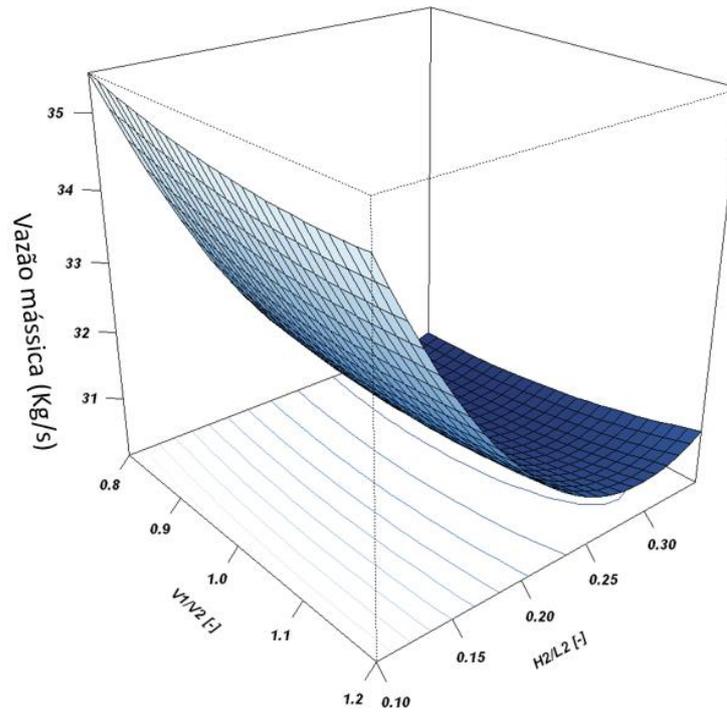
As superfícies de resposta delineadas, como evidenciado nas Figuras 32, 33 e 34, oferecem uma capacidade visual para discernir e determinar a influência das variáveis independentes sobre a variável dependente em toda a extensão do domínio numérico. Nesse contexto, as curvas numeradas denotam os valores de (\dot{m}). A tonalidade mais clara empregada denota o patamar máximo de resposta. Ao unir a análise com a visualização de perspectiva com a visualização bidimensional da Figura 35, é possível discernir o vértice da superfície de resposta, uma região em consonância com os objetivos perseguidos no âmbito da investigação.

Figura 32 – Gráfico 3D para superfícies de resposta para vazão mássica em $H2/L2$.



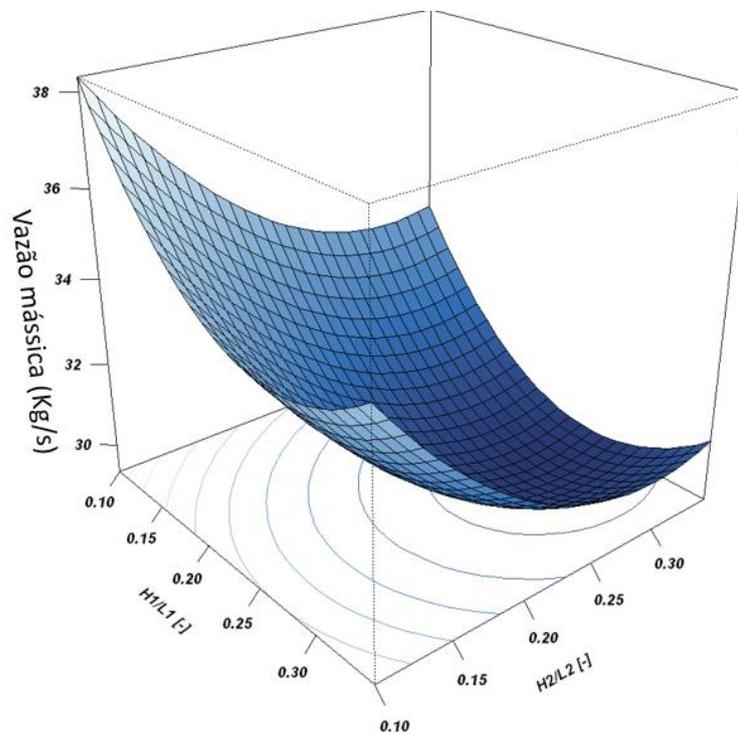
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Gráfico 3D para superfícies de resposta para vazão mássica em H1/L1.



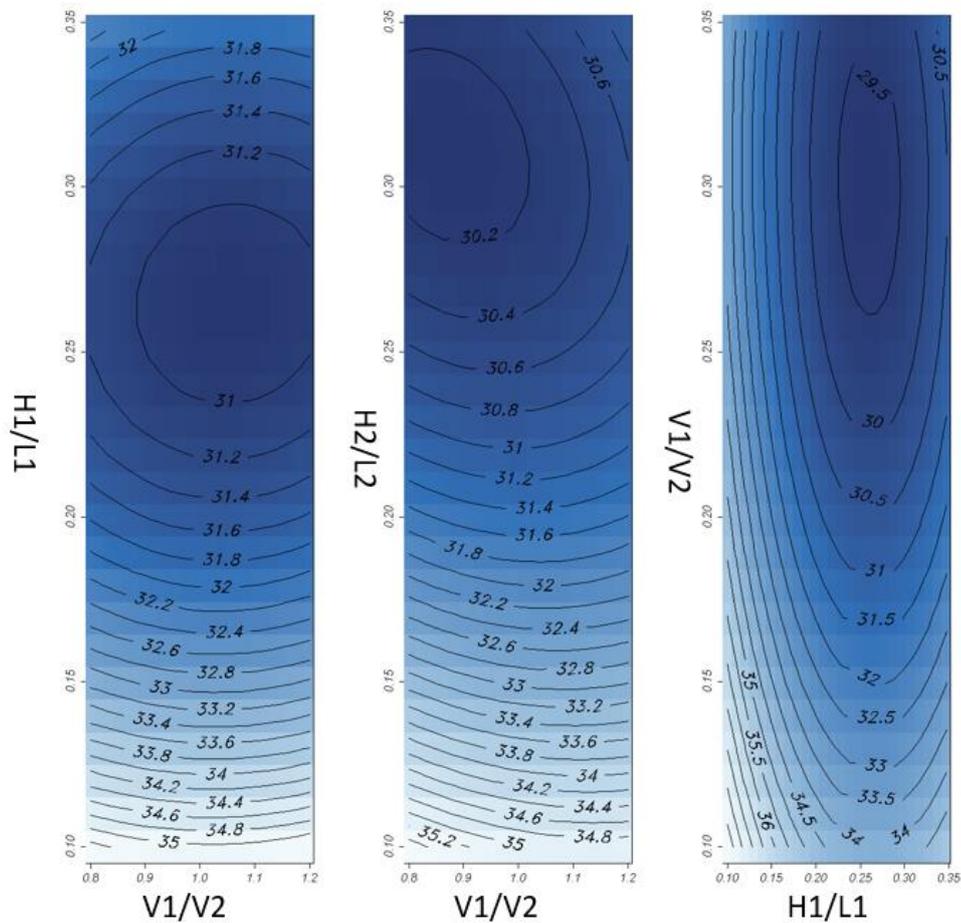
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Gráfico 3D para superfícies de resposta para vazão mássica em v1/v2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 – Visão bidimensional das superfícies de resposta para Vazão mássica



Fonte: Elaborado pelo autor.

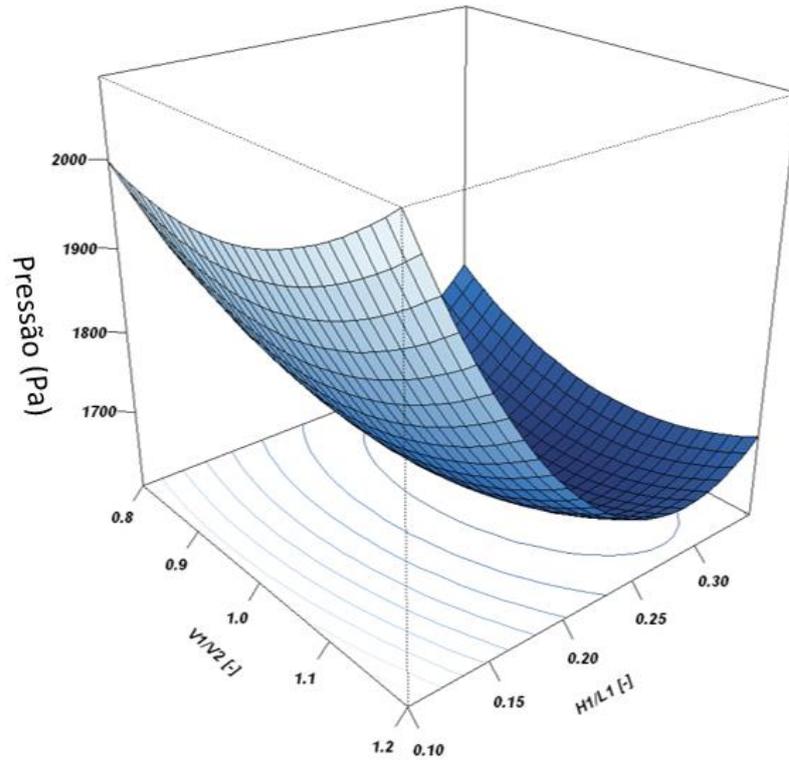
As Figuras 32, 33, 34 e 35 ilustram respectivamente a configuração ótima para o primeiro dispositivo, a configuração otimizada para o segundo dispositivo e a relação de volume mais adequada entre eles. Esses elementos contribuem de maneira significativa para a determinação da geometria ideal a ser adotada quando abordamos o parâmetro da vazão mássica.

4.3.2 Resultados para pressão

Para a pressão, podemos adotar superfícies de respostas similares aos de vazão mássica, nas Figuras 36, 37 e 38 podemos ver os picos de pressão (Pa) em uma visualização gráfica 3D. Já na figura 39 podemos ver os mesmos resultados, porém de forma bidimensional, e a partir deles definir qual a melhor geometria para as duas câmaras do ponto de vista de pressão.

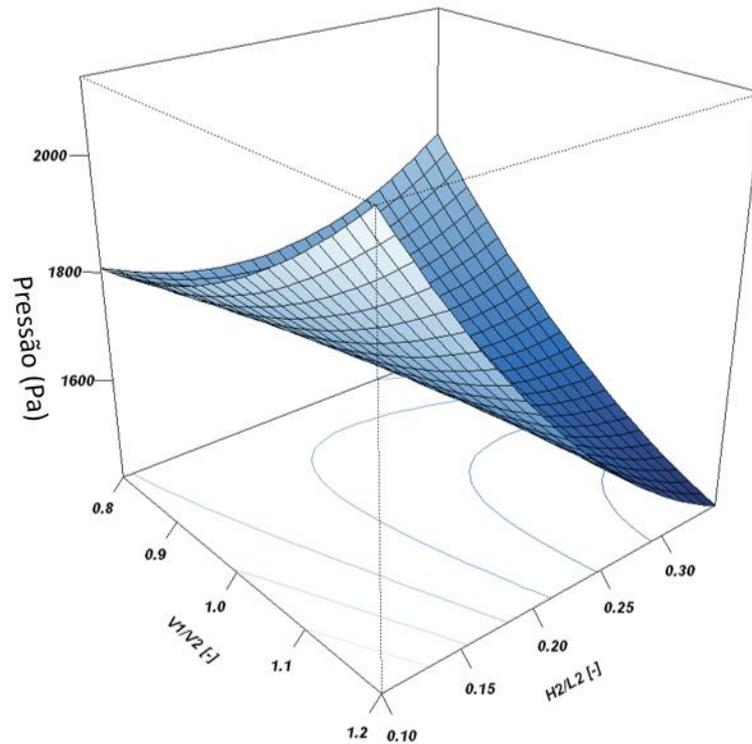
Nas Figuras 36, 37 e 38 temos a visão tridimensional da superfície, enquanto na Figura 39 podemos observar uma vista bidimensional, a parte clara são os pontos ótimos e de maior pressão.

Figura 36 – Gráfico 3D para superfícies de resposta para pressão em H2/L2.



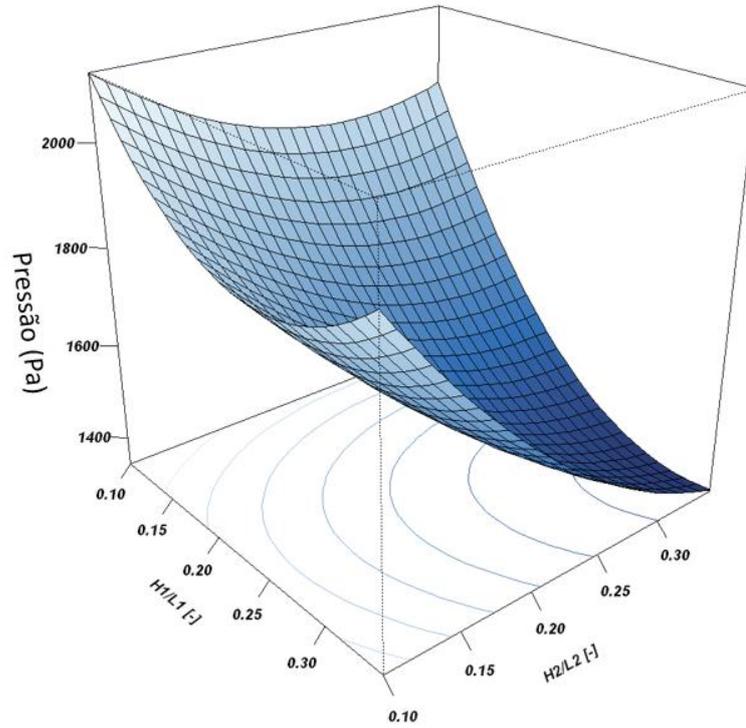
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Gráfico 3D para superfícies de resposta para pressão em H1/L1.



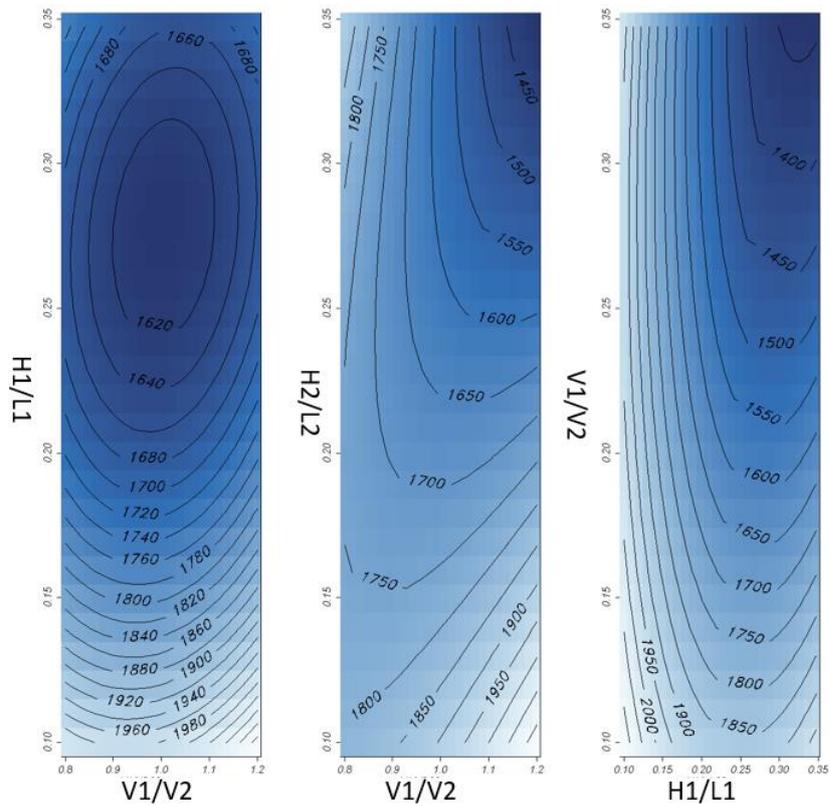
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 - Gráfico 3D para superfícies de resposta para pressão em $v1/v2$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39 - Visão bidimensional das superfícies de resposta para pressão (Pa)

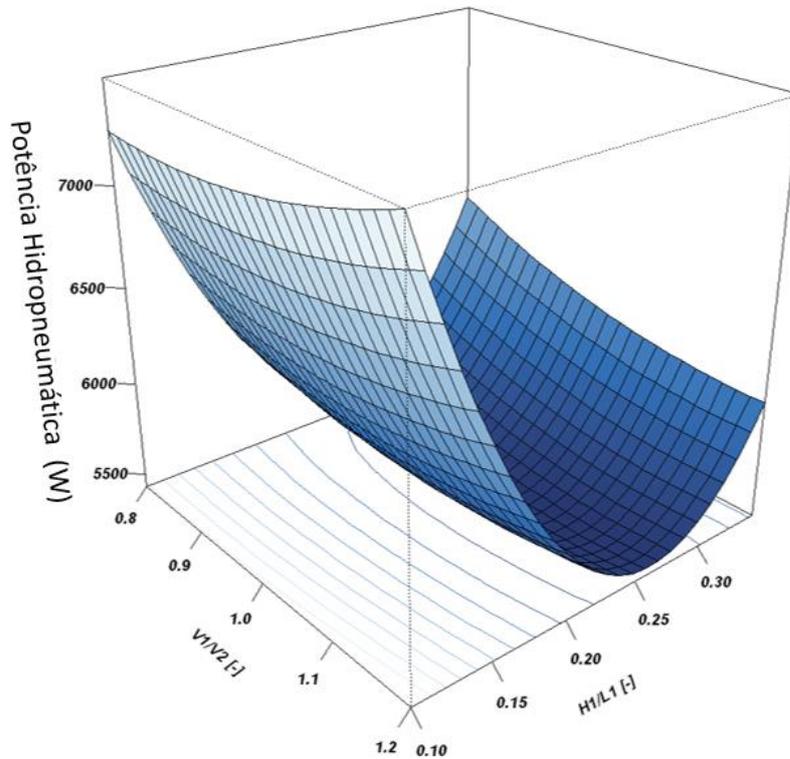


Fonte: Elaborado pelo autor.

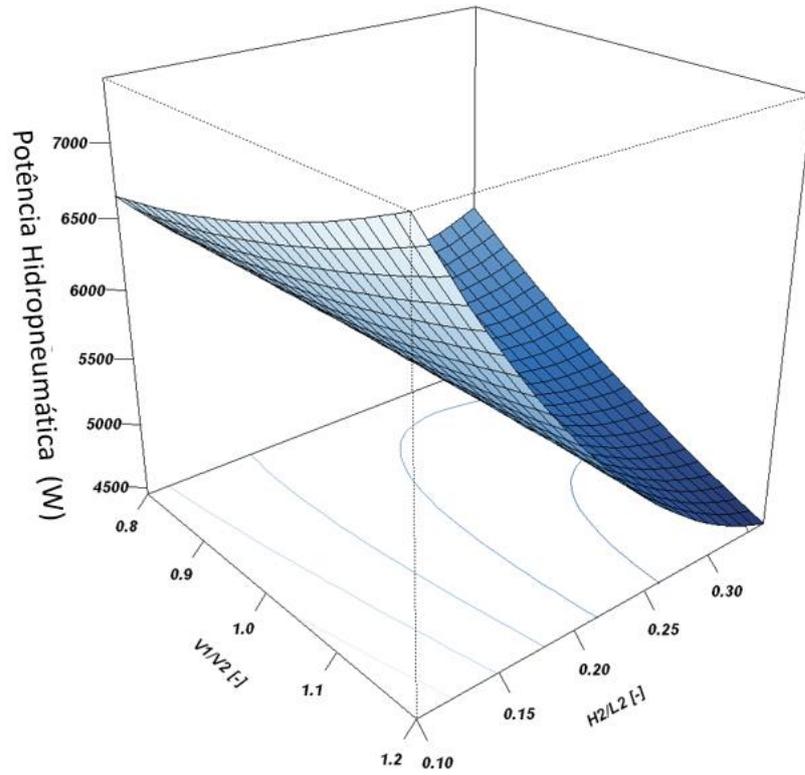
4.3.3 Resultados para Potência

Para analisar a potência, levamos em conta os melhores resultados de pressão e vazão mássica, a partir desses resultados é possível encontrar os maiores potenciais de um dispositivo com duas câmaras acopladas, nas Figuras 40, 41 e 42 observamos uma imagem gráfica em 3D e na Figura 43, podemos ver a planificação bidimensional dos resultados de potência considerando $H2/L2$, $H1/L1$ e $v1/v2$:

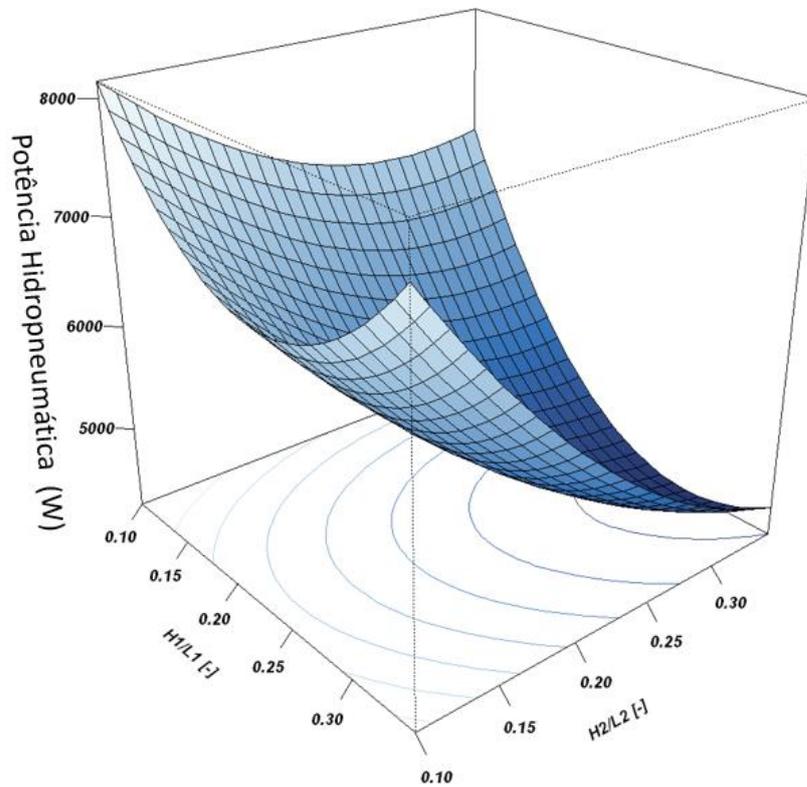
Figura 40 - Gráfico 3D para superfícies de resposta para potência em $H2/L2$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

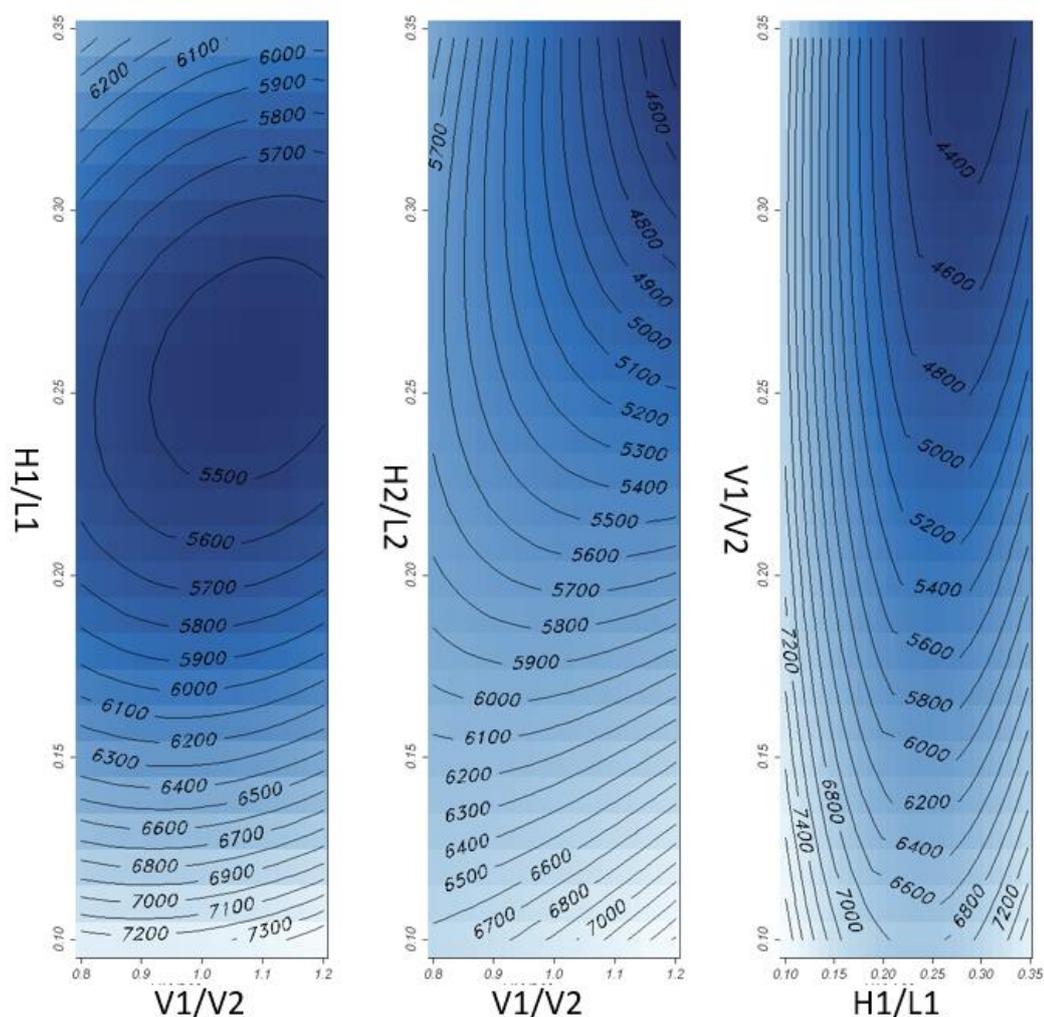
Figura 41 - Gráfico 3D para superfícies de resposta para potência em $H1/L1$.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 - Gráfico 3D para superfícies de resposta para potência em $v1/v2$.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43 - Visão bidimensional das superfícies de resposta para Potência Hidropneumática.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma outra consideração que pode ser derivada dos resultados expostos é uma sugestão teórica utilizando os parâmetros de altura e comprimento de onda mencionados na análise numérica.

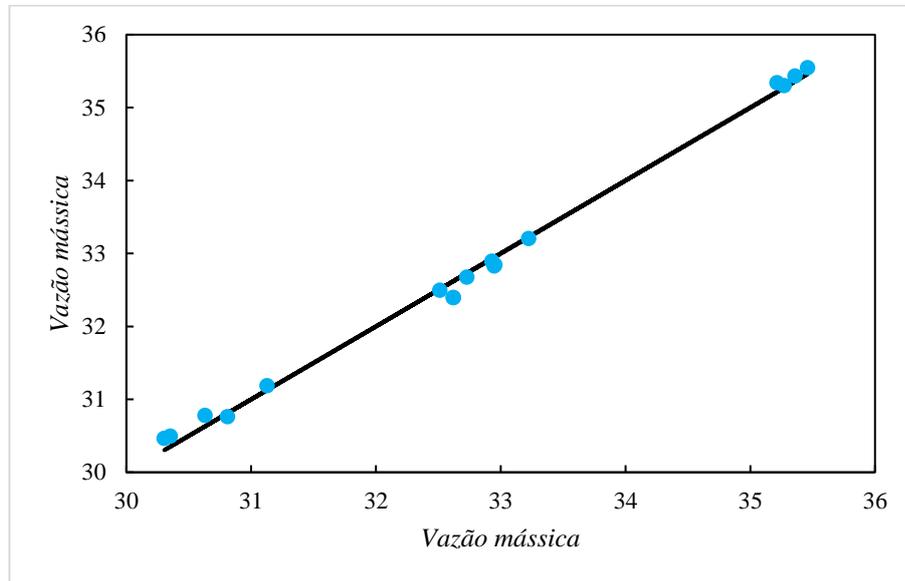
As configurações geométricas que maximizam a conversão estão encapsuladas na faixa de $0,1 < H1/L1 < 0,12$, $1,0 < V1/V2 < 1,2$ e $0,08 < H2/L2 < 0,12$.

A geração dos gráficos de ajuste para os 16 casos analisados é uma ferramenta crucial no estudo em questão. Esses gráficos são instrumentais na demonstração dos valores de tendência, servindo como base fundamental na identificação dos casos que apresentam maior potência hidropneumática, conforme evidenciado pelas Figuras 44, 45 e 46.

Os resultados obtidos a partir da análise dos 16 casos, representados nas Figuras 44, 45 e 46, são elementos essenciais dentro do contexto do modelo de regressão empregado. Estes

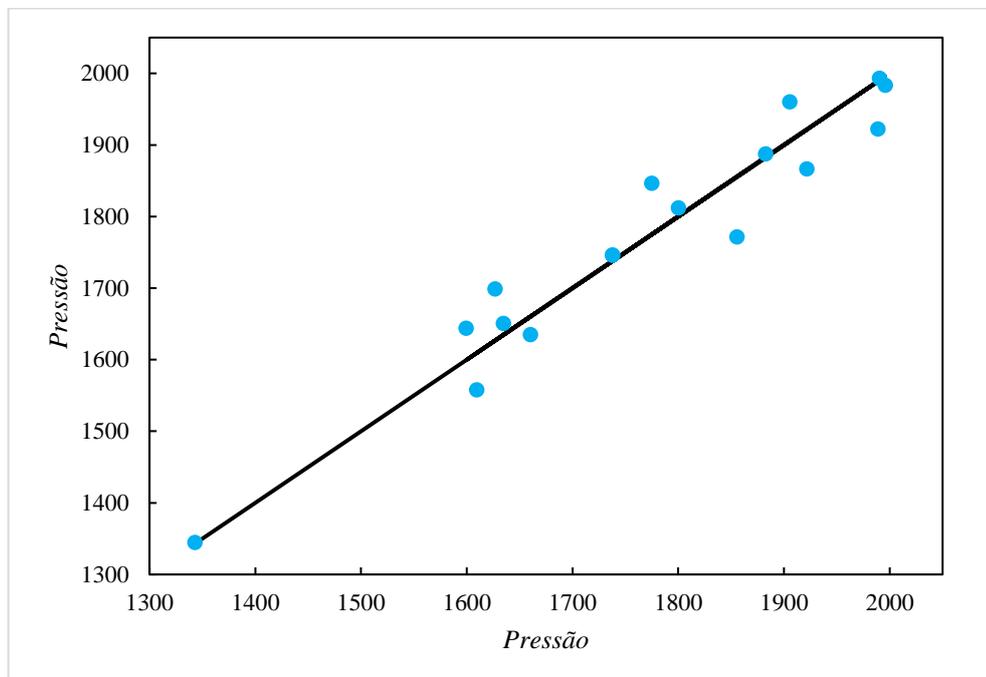
resultados desempenham um papel central na identificação do caso que exibe a maior potência hidropneumática dentro do conjunto de dados examinado.

Figura 44 - Gráficos de ajuste para vazão mássica (kg/s)



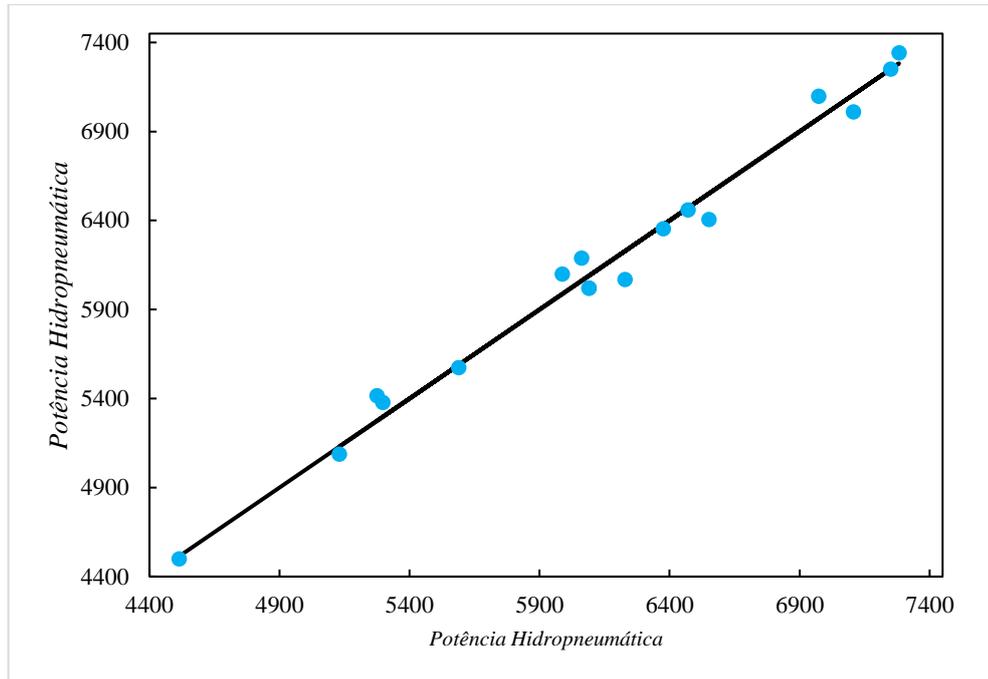
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 45 - Gráficos de ajuste para Pressão (Pa)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 - Gráficos de ajuste para potência (W)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os resultados de vazão mássica, pressão e potência plotados, podemos encontrar qual a configuração de dispositivo com maior capacidade de geração de energia. Utilizando os casos apresentados acima e com o uso do *software* R, é possível obter o design com maior potencial hidropneumático para as condições de onda. A Tabela 6 apresenta as medidas usadas nos dispositivos e as medidas aplicadas ao caso com maior potencial hidropneumático, os valores que deram início aos encontrados na tabela usam o valor ótimo do caso 08 de Lima et al. (2019).

A partir das medidas de H1, L1, H2 e L2 encontradas na Tabela 6 é possível fazer a geometria apresentada pelo *software* R, essa geometria pode ser observada na Figura 47.

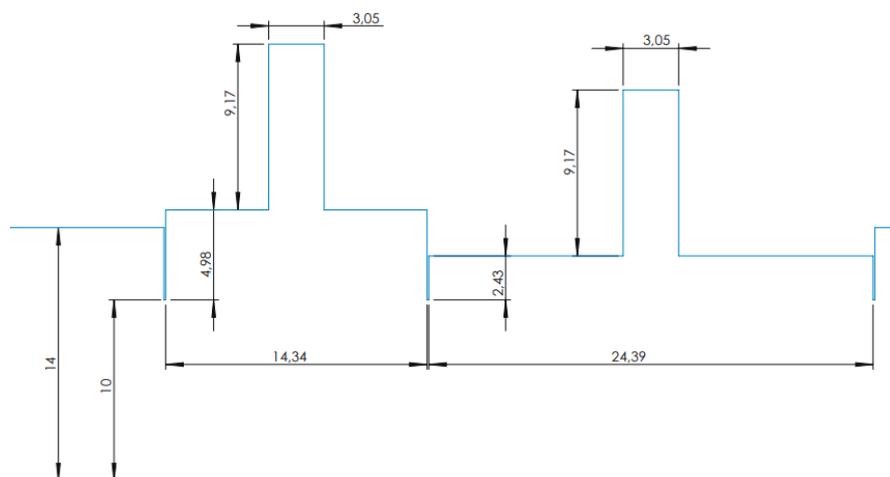
Tabela 6 – Caso com maior potencial hidropneumático obtido com *software R*

Caso	H1 (m)	L1 (m)	H2 (m)	L2 (m)	V1 (m³)	V2 (m³)	V1/V2	H1/L1	H2/L2
1	3,66	16,77	3,02	22,96	61,40	69,42	0,88	0,22	0,13
2	3,01	22,89	2,85	21,67	68,98	61,84	1,12	0,13	0,13
3	3,38	19,33	2,56	25,58	65,41	65,41	1,00	0,18	0,10
4	3,38	19,33	4,04	16,18	65,41	65,41	1,00	0,18	0,25
5	4,04	16,18	3,38	19,33	65,41	65,41	1,00	0,25	0,18
6	3,88	17,78	3,67	16,83	68,98	61,84	1,12	0,22	0,22
7	2,84	21,59	3,89	17,83	61,40	69,42	0,88	0,13	0,22
8	2,84	21,59	3,02	22,96	61,40	69,42	0,88	0,13	0,13
9	3,66	16,77	3,89	17,83	61,40	69,42	0,88	0,22	0,22
10	3,38	19,33	3,38	19,33	65,41	65,41	1,00	0,18	0,18
11	3,19	18,23	3,57	20,38	58,14	72,68	0,80	0,18	0,18
12	3,01	22,89	3,67	16,83	68,98	61,84	1,12	0,13	0,22
13	3,38	19,33	3,38	19,33	65,41	65,41	1,00	0,18	0,18
14	2,56	25,58	3,38	19,33	65,41	65,41	1,00	0,10	0,18
15	3,53	20,19	3,23	18,43	71,36	59,46	1,20	0,18	0,18
16	3,88	17,78	2,85	21,67	68,98	61,84	1,12	0,22	0,13
Exelente	4,9767	14,3380	2,4385	24,3852	71,3564	59,4636	1,2000	0,3471	0,1000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se também na Figura 47 que no caso de maior potência hidropneumática a primeira câmara passa da altura do dispositivo, fenômeno apresentado no caso 5, pode-se observar também que a câmara 2 tem uma largura aproximadamente 35% maior e uma altura de aproximadamente 50% menor quando comparada a câmara 1.

Figura 47 - Geometria do caso excelente



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa geometria tem potencial hidrodinâmico de gerar uma potência de 8875 W, com uma pressão de 2643 Pa e uma vazão mássica de 34,4 kg/s. Sabendo que a potência máxima que pode ser extraída pelo dispositivo é de aproximadamente 5962 W e com uso da Equação 34, a eficiência hidrodinâmica ε é dada (Cardozo, 2020):

$$\varepsilon = \frac{8875}{11924} = 0,74 \text{ ou } 74\% \text{ de eficiência} \quad (51)$$

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O cerne desta pesquisa reside na exploração da aplicabilidade do método Design Construtal e sua relevância na análise de questões de engenharia. A mencionada abordagem metodológica foi empregada na investigação de um dispositivo caracterizado por uma coluna de água oscilante, composta por duas câmaras acopladas.

Em sua fase inicial, o estudo em questão empreendeu uma validação e uma proposição de aprimoramento no âmbito da literatura já existente. Tal validação proporcionou um entendimento substancial acerca do impacto da localização do dispositivo em relação à superfície livre da água. Essa consideração é de relevância significativa, pois dispositivos dispostos em distintas posições manifestam perdas de pressão substanciais nas câmaras, resultando em uma dissipação não proveitosa de ar para fora do compartimento.

A partir da investigação feita em relação aos resultados obtidos em Lima (2021) o presente trabalho apresenta uma alternativa e um novo direcional quando trabalhamos com a posição do dispositivo em relação ao fundo do mar, desconsiderando as mudanças de maré em uma aplicação real.

Para os casos que foram investigados, os maiores valores de potência hidropneumática foram encontrados para casos em que a segunda câmara é maior que a primeira, isso ocorre quando encontramos um equilíbrio entre as duas câmaras, já que é possível afirmar que a primeira câmara recebe uma maior quantidade de energia.

Auxiliado pelo uso do *Software R*, foi possível gerar as geometrias e definir qual a geometria de duas câmaras apresenta o maior potencial hidropneumático levando em consideração os graus de Liberdade V_1/V_2 , H_1/L_1 e H_2/L_2 . Com as 16 geometrias da Tabela 6, variando os graus de liberdade, identifica-se que a geometria de maior potencial hidropneumático é a que tem $\frac{V_1}{V_2} = 1,2$, $\frac{H_1}{L_1} = 0,34$ e $\frac{H_2}{L_2} = 0,1$ gerando uma potência de 8875 W, com uma pressão de 2643 Pa e uma vazão mássica de 34,4 kg/s. Além de gerar uma eficiência teórica de aproximadamente 74%.

Entre todas as instâncias analisadas, o objetivo foi identificar a geometria que exibisse a máxima potência hidropneumática disponível. Utilizando os dados da onda correspondente, procurou-se estabelecer uma recomendação teórica. Em relação à configuração geométrica, todos os resultados otimizados foram encontrados dentro de um intervalo comum do grau de liberdade, especificamente entre $1,0 < V_1/V_2 < 1,3$, $0,3 < H_1/L_1 < 0,4$ e $0,08 < H_2/L_2 < 0,12$.

Portanto, é evidente que a organização das geometrias utilizando o método Design Construtal pode resultar na otimização do desempenho do dispositivo no qual o método é

aplicado, proporcionando assim uma base teórica para a potencial construção dos dispositivos examinados. Isso é especialmente relevante, uma vez que o problema em questão diz respeito a dispositivos em escala real. Além disso, as dimensões do dispositivo estão diretamente ligadas às características das ondas do clima, permitindo que o presente modelo computacional e o método Design Construtal sejam empregados para fornecer informações teóricas na criação do protótipo CAO. Isso possibilitará a máxima captura de energia das ondas em locais com condições adequadas de clima de ondas.

5.1. PROPOSTA DE CONTINUIDADE

Como forma de continuidade do trabalho desenvolvido até este momento, são propostos os seguintes estudos:

1. Manter a configuração de melhor resultado obtido e alterar as alturas de superfície livre, a fim de identificar como essa configuração irá se comportar com maré alta e baixa.
2. Adicionar uma terceira câmara ao dispositivo, adicionando as variáveis V3 e H3/L3.
3. Estudar um novo formato de dispositivo que otimize a geração de hidrogênio.
4. Fazer a pesquisa similar usando câmaras tri dimensionais, muito similar aos usados em para mares.
5. Alterar a pesquisa para o campo tridimensional e alterar as posições das câmaras, trabalhando com uma proposta em ângulo e não horizontal, de uma atrás da outra, essa proposta visa atender ondas que venham em um determinado *swell*.
6. Adaptar o dispositivo de coluna de água oscilante com quebra mares preparados para o surf competitivo, estudando assim um equilíbrio entre energia e esporte.

REFERÊNCIAS

- DE BARROS, Andréia S. et al. Numerical Study and Geometrical Investigation of an Onshore Overtopping Device Wave Energy Converter with a Seabed Coupled Structure. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 11, n. 2, p. 412, 2023.
- BEJAN, A. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume. **Int. J. Heat Mass Transfer**, vol. 40, pp. 799–816, 1996.
- BEJAN, A. **The Physics of Life: The Evolution of Everything**. St. Martin's Press, New York, 2016.
- Barbosa, D., Santos, E. D., Santos, A. L.G., Souza, J. A. “Overtopping device numerical study: Openfoam solution verification and evaluation of curved ramps performances”. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 131, p. 411-423, 2019.
- BHATTACHARYYA, R.; MCCORMICK, M. **Wave Energy Conversion**, [S.I]: Elsevier Science Ltd, 2003. 187 p.
- BRENDMO, A.; FALNES, J. LILLEBEKKEN, P. M. Linear modelling of oscillating water columns including viscous loss. **Applied Ocean Research**. v. 18, n. 2-3, p. 65-75, 1996.
- CARDOZO, C.F. **Estudo Numérico de um Conversor Coluna de Água Oscilante através do Método Design Construtal**. Dissertação - Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2020.
- CAPPIETTI, L., Simonetti, I., Penchev, V., Penchev, P. “Laboratory test on the original wave energy converter combining oscillating water column and overtopping devices. *Advanced in Renewable Energies Offshore*. Londres. 2019.
- CHAKRABARTI, S. K., **Handbook of offshore engineering**, vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 661 p., 2005.
- CELIK, I.B.; GHIA, U.; ROACHE, P.J.; FREITAS, C.J.; COLEMAN, H.; RAAD, P.E. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications, v. 130, **ASME Journal of Fluids Engineering**, 2008.
- CRUZ, J. M. B. P., SARMENTO, A. J. N. A. **Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais**. Ed. Instituto de Ambiente, Amadora, 61 p., 2004.
- CUNEGATTO, E.H.T. **Design Construtal para Alto Desempenho em Arranjos de Tubos e Micromisturadores Via Simulação Numérica**. Dissertação - Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2023.
- DEAN, R. G., DALRYMPLE, R. A., **Water wave mechanics for engineers and scientists**, vol. 2, World Scientific, Singapura, 353 p., 1991.
- DEUS, M. J., SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., GOMES, M. G. “Análise numérica da profundidade de submersão de um dispositivo coluna de água oscilante

submetido a incidência de um espectro de ondas do tipo pierson-moskowitz. VII SEMENGO. Rio Grande. 2018.

DELMONTE, N. *et al.* Review of oscillating water column converters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [S.I], v. 52, n.2, p. 1698-1710, 2016.

Dizadji, N., & Sajadian, S. E. (2011). **Modeling and optimization of the chamber of OWC system.** *Energy*, 36(5), 2360-2366.

DOS SANTOS, E., Espinel, M. F., Gomes, M das N, Rocha, L.A.O., Isoldi, L.A., “Numerical Modeling and Constructal Design Applied to the Performance Improvement of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter”. **15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT 2014)**, Belém, PA, Brazil, 2014a.

DOS SANTOS, Amanda Lopes et al. Development of a computational model for investigation of and oscillating water column device with a savonius turbine. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 1, p. 79, 2022.

DREW, B., PLUMMER, A. R., & SAHINKAYA, M. N. **A review of wave energy converter technology.** 2009.

ENGINEERS, T.A.S. o. M. **Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer.** New York, NY: ASME, 2009.

EL MARJANI, A. et al. 3D unsteady flow simulation in an OWC wave converter plant. In: **International Conference on Renewable Energy and Power Quality-ICREPQ'06.** 2006.

Elhannafi, A. et al. “Investigations on 3D effects and correlation between wave height and lip submergence of an offshore stationary OWC wave energy converter”. **Applied Ocean Research**, v. 64, p. 203-216, 2017.

ESTEFEN, S. F., FERNANDES, A. C., ESPERANÇA, P. D. T. T., et al., 2003. "**Energia das Ondas**". In: M. T. Tolmasquim, Ed., *Fontes Renováveis de Energia no Brasil*, Capítulo 10, Rio de Janeiro: Interciência Ltda., pp.485-515

STEWART, R. H. **Introduction to physical oceanography.** Texas: Department of Oceanography, 2005. Disponível em: <https://www.uv.es/hegigui/Kasper/por%20Robert%20H%20Stewart.pdf>. Acesso em: 31 maio 2019.

FALCÃO, A. F. de O., Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v. 14, p. 899-918, 2010.

FLEMING, Fernanda Pereira. **Avaliação do potencial de energias oceânicas no Brasil.** Universidade Federal do Rio de Janeiro–UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, 2012.

FREDSØE, F.; DEIGAARD, R. **Mechanicals of Coastal Sediment Transport.** Advanced Series on Ocean Engineering, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering – Technical University Denmark. Singapore, New Jersey, Hong Kong: ed. World Scientific, 1997. v. 3.

GARANOVIC, A. **Wave energy plant in South Korea to produce green hydrogen**. Disponível em: <<https://www.offshore-energy.biz/wave-energy-plant-in-south-korea-to-produce-green-hydrogen/>>. Acesso em: 14 set. 2023.

GOMES, M. das N. **Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna d'Água Oscilante de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica**. Dissertação - Mestrado em Modelagem Computacional – Universidade Federal de Rio Grande, 2010.

GOMES, M. N., SANTOS, E. D. DOS, ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., **Análise de malhas para geração numérica de ondas em tanques**. In Proceedings VII Congresso nacional de Engenharia Mecânica (COBEM 2012), São Luiz, 2012a.

GOMES, M. N., NASCIMENTO C. D., BONAFINI, B. L., DOS SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., “Two-Dimensional Geometric Optimization of an Oscillating Water Column Converter in Laboratory Scale”. *ReTerm*, Vol. 11, pp. 30-36, 2012b.

GOMES, M. N., DOS SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., **Two-Dimensional Geometric Optimization of an Oscillating Water Column Converter of Real Scale**. 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), Ribeirão Preto, SP, Brazil, 2013a.

GOMES, M. N., WAESS, K. R., SANTOS, E. D. DOS, ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., **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, Goiás, Brasil, 2013b.

GOMES, Mateus das Neves. **Constructal design de Dispositivos conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante**. 2014. Tese - Doutorado em Engenharia Mecânica – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

GOMES, M. N., OLEINIK, P. H., MARQUES, W. C., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D., ROCHA, L. A. O. **Constructal design for numerical evaluation of a rectangular shape oscillating water column devices subject to a jonswap wave spectrum**. Proceeding of Constructal law & Second Law Conference. Porto Alegre/RS. 2019.

GOULART, M. M., **Estudo Numérico da Geometria de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real Empregando Constructal Design**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Rio Grande, 2014.

GUIMARÃES, R. C., OLEINIK, P. H., DE PAULA KIRINUS, E., LOPES, B. V., TROMBETTA, T. B., & MARQUES, W. C. **An overview of the Brazilian continental shelf wave energy potential**. *Regional Studies in Marine Science*, 25, 100446. 2019.

GREAVES, D.; IGLESIAS, G. **Wave and Tidal Energy**. 1a. ed. Hoboken: Wiley, 2018. iii p.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, **J. Comput. Phys.**, vol. 39, no. 1, pp. 201–225, 1981.

HUBNER, Ricardo G. et al. Numerical Analysis of an Overtopping Wave Energy Converter Subjected to the Incidence of Irregular and Regular Waves from Realistic Sea States. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 8, p. 1084, 2022.

Iahnke, S. L. P. Energia das Ondas: **Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional)** – Universidade Federal de Rio Grande, 2010. International Energy Agency IEA. <http://www.iea.org/topics/renewables/>, 2018.

LETZOW, M., LORENZINI, G., BARBOSA, D. V. E., HÜBNER, R. G., ROCHA, L. A. O., GOMES, M. N., ISOLDI, L. A., DOS SANTOS, E. D., **Numerical Analysis of the Influence of Geometry on a Large Scale Onshore Oscillating Water Column Device with Associated Seabed Ramp**, *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, Vol. 15, No. 6, pp. 873 – 884, 2020.

LEWIS, A., ESTEFEN, S., HUCKERBY, J., et al., 2011. **Ocean Energy**. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. IPCC. O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer e C. V. Stechow, Eds. Cambridge and New York, p.50

LIMA, Y.T.B; Rocha, L.A.O; Plamer, C.B.; Isoldi, L.A.; Santos, E.D.; Gomes, M.N. **Análise numérica com construtal design da forma geométrica na região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante**. Proceedings of the XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2015a.

LIMA, Y. T. B. **Aplicação do método design construtal na avaliação numérica da potência hidropneumática de um dispositivo coluna de água oscilante com região de transição trapezoidal ou semicircular e estudo da influência da turbina no formato elíptico**. Dissertação - Mestrado em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2016.

LIMA, Y. T. B., Rocha, L. A. O., Gomes, M. D. N., & 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(3), 2017.

LIMA, Y. T. B., GOMES, M. N., CARDOZO, C. F., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D., ROCHA, L. A. O. **Análise da variação geométrica de três graus de liberdade através do método design construtal para um dispositivo coluna de água oscilante com câmara hidropneumática dupla**. VIII SEMENGO. Rio Grande, 2018a.

LIMA, Y. T. B., ROCHA, L. A. O., GOMES, M. N., SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A. **Dispositivos coluna de água oscilante acoplados com volumes de entrada distintos: um estudo numérico da geometria usando design construtal**. XXI Encontro Nacional de Modelagem Computacional. Búzios, RJ. 2018b

LIMA, Y. T. B., GOMES, M. N., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D., 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 Hydropneumatic Chamber**. In: Defect and Diffusion Forum. Trans Tech Publications, Vol. 396, pp. 22-31. 2019.

LIMA, Yuri Theodoro Barbosa et al. **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, v. 11, n. 18, p. 8630, 2021.

LISBOA, R.; TEIXEIRA, P. R. F; DIDIER, Eric. Regular and irregular wave propagation analysis in a flume with numerical beach using a Navier-Stokes based model. In: **Defect and Diffusion Forum**. Trans Tech Publications, p. 81-90. 2016.

Lisboa R., Teixeira, P. R. F., Torres, F. R., Didier, E., “**Numerical evaluation of the power output of an oscillating water column wave energy converter installed in the southern Brazilian coast**”. Energy, Vol. 162, pp. 1115-1124. 2018.

LORENTE, S. **The constructal law in engineering and elsewhere....** Proceeding of Constructal Law & Second Law Conference. Porto Alegre/RS. 2019.

López, I., Andewu, J., Ceballos, S., Alegría, I. M., Kortabarria, I. **Review of wave energy Technologies and the necessary power-equipment**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 27, pp. 413 – 434. 2013.

Machado, B. N. Zanella, M. M., Gomes, M. N., Teixeira, P. R., Isoldi, L. A., Santos, E. D., **Constructal Design of an Overtopping Wave Energy Converter**. In Proceedings of the Constructal Law Conference, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil, 2011.

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, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

MAHDY, Ahmed et al. State-of-the-Art of the most commonly adopted wave energy conversion systems. **Ain Shams Engineering Journal**, p. 102322, 2023.

MALISKA, C.R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MARTINS, J. C., **Design Construtal de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real para Diferentes Áreas de Construção e Ondas Monocromáticas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Rio Grande, 2016.

MARTINS, JAIFER CORRÊA ; FRAGASSA, CRISTIANO; GOULART, MARCELO MORAES; SANTOS, ELIZALDO DOMINGUES DOS; ISOLDI, LIÉRCIO ANDRÉ; GOMES, MATEUS DAS NEVES; ROCHA, LUIZ ALBERTO OLIVEIRA. Constructal Design of an Overtopping Wave Energy Converter Incorporated in a Breakwater. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, p. 471, 2022.

MCCORMICK, M. E. **Ocean Wave Energy Conversion**. Dover Publications, Inc. Mineola, New York, USA, 256p., 1981.

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**, 8. Ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2012.

MORK, Gunnar et al. Assessing the global wave energy potential. In: **International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. 2010. p. 447-454.

QIAO, Dongsheng et al. Review of wave energy converter and design of mooring system. **Sustainability**, v. 12, n. 19, p. 8251, 2020.

Khan, N. “Review of ocean tidal, wave and thermal energy Technologies”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 590-604, 2017.

Powering the world with the energy of water. (2018). **University of Miami, Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science**. Recuperado em 06 março, 2023, de <https://sharkresearch.earth.miami.edu/powering-the-world-with-the-energy-of-water/>

RAZERA, A.L. *et al.* Constructal design of a semi-elliptical fin inserted in a lid-driven square cavity with mixed convection. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 126, p. 81-94, 2018.

RODRIGUES, L. **Modelagem computacional da propagação de espectro de ondas em tanques**. Dissertação - Mestrado em Modelagem Computacional. Universidade Federal do Rio Grande. 2018.

ROSA, M. **Plataforma flutuante gera energia através da movimentação das ondas**. Disponível em: <<https://ciclovivo.com.br/inovacao/tecnologia/plataforma-flutuante-gera-energia-atraves-da-movimentacao-das-ondas/>>. Acesso em: 3 set. 2023.

TAVARES, G. P. ; MACIEL, R. P. ; dos SANTOS, E. D.; GOMES, M. N.; ROCHA, L. A. O.; MACHADO, B. N.; OLEINIK, P. H. ; ISOLDI, L. A. . estudo numérico comparativo da potência disponível entre ondas regulares e irregulares: estudo de caso de um dispositivo de coluna de água oscilante na costa de rio grande / rs. **international journal of development research**, v. 11, p. 51265-51271, 2021.

TOLMASQUIM, A. **Energia Renovável Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**, Interciência (ed.), Rio de Janeiro, Brasil. 2016.

TORRES, F. R. Método numérico simplificado para determinação das curvas de potência mecânica de turbina Wells instalada em dispositivo para captação da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante sob incidência de ondas monocromáticas. **Degree of master thesis, Universidade Federal do Rio Grande–FURG**, 2015.

VERDICT MEDIA LIMITED. **Mutriku Wave Energy Plant - Power Technology | Energy News and Market Analysis**. Disponível em: <<https://www.power-technology.com/projects/mutriku-wave/>>.

VERSTEEG, H.K., MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. Longman Scientific and Technical, 2007.

WASHINGTON, S.P.; KARLAFTIS, M.G.; MANNERING, F.L. **Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis**, 2. Ed., Chapman & Hall/CRC, 2011