

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

VINÍCIUS BLOSS

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM CONVERSOR DE ENERGIA TIPO COLUNA  
DE ÁGUA OSCILANTE UTILIZANDO UM MODELO COMPUTACIONAL  
TRIDIMENSIONAL E DESIGN CONSTRUTAL COM TRÊS GRAUS DE  
LIBERDADE**

São Leopoldo

2020

VINÍCIUS BLOSS

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM CONVERSOR DE ENERGIA TIPO COLUNA  
DE ÁGUA OSCILANTE UTILIZANDO UM MODELO COMPUTACIONAL  
TRIDIMENSIONAL E DESIGN CONSTRUTAL COM TRÊS GRAUS DE  
LIBERDADE**

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

Orientadora Profa. Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

São Leopoldo  
2020

B656e Bloss, Vinícius.

Estudo do desempenho de um conversor de energia tipo coluna de água oscilante utilizando um modelo computacional tridimensional e design construtal com três graus de liberdade / Vinícius Bloss. – 2020.

86 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2020.

“Orientadora Profa. Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani  
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha.”

1. Design construtal. 2. Fluidodinâmica computacional.  
3. Conversor de energia das ondas. 4. Coluna de água oscilante. I. Título.

CDU 621

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecária: Amanda Schuster – CRB 10/2517)

## **AGRADECIMENTOS À CAPES**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha professora orientadora, Flávia Schwarz Franceschini Zinani, pelo apoio, compreensão, disponibilizada e paciência na orientação desse projeto, e ao meu coorientador, Luiz Alberto Oliveira Rocha, pelas dicas e apoio.

Agradeço a minha colega Camila Fernandes Cardozo, que me auxiliou durante meu trabalho.

Agradeço aos meus colegas do PPGEM que me acompanharam e fizeram parte de etapas importantes do mestrado.

## RESUMO

Recentemente, os oceanos têm sido vistos como uma fonte promissora de energia renovável. Teoricamente, os oceanos poderiam ofertar energia suficiente para suprir toda a demanda mundial. Dentre as tecnologias disponíveis para conversão de energia dos oceanos (CEO) destacam-se os dispositivos tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), que se caracterizam por uma câmara, na qual a água oscila em seu interior em um movimento semelhante ao de um pistão. Este movimento desloca o ar para uma chaminé, onde uma turbina é acoplada. A passagem do ar pela turbina promove a conversão em energia mecânica. No presente trabalho, foi realizado o estudo do desempenho de um conversor tipo CAO em escala 1:15 utilizando um modelo de fluidodinâmica computacional tridimensional. A análise foi baseada no Método Design Construtal. Nesta abordagem, a energia é a grandeza que flui através do sistema, que possui como propósito a máxima taxa de conversão de energia das ondas em energia mecânica. Foram utilizados três graus de liberdade: razão da altura pelo comprimento da câmara hidropneumática ( $H1/L$ ), razão da altura da chaminé pelo seu diâmetro ( $H2/d$ ) e a razão da largura da câmara hidropneumática pela largura do tanque de onda ( $W/Z$ ). Foi investigado o efeito de diferentes combinações entre os graus de liberdade para um clima de ondas típico da região Sul do litoral brasileiro. A eficiência de conversão foi utilizada como parâmetro de desempenho. Foi realizada a modelagem computacional do sistema, aplicando um software de fluidodinâmica computacional baseado no método de volumes finitos (MVF), utilizando a modelagem *Volume of Fluid* (VoF) para a interface entre as fases gás e líquido. Em uma primeira análise, observou-se que a altura da chaminé sempre tem efeito positivo na eficiência do sistema. No entanto, foram selecionados apenas valores fabricáveis para este grau de liberdade, limitando as análises posteriores a dois graus de liberdade,  $H1/L$  e  $W/Z$ . Através de um Design de Experimentos do tipo Projeto Composto Central, diferentes combinações dos graus de liberdade foram simuladas, permitindo a construção de Superfícies de Resposta e de correlações para a eficiência do sistema em função dos graus de liberdade largura e altura da câmara, bem como a otimização do sistema baseado nas Superfícies de Resposta. Nos testes realizados a eficiência do dispositivo CAO variou de 1,48% até 19,32% no pior e melhor caso, respectivamente. Palavras-chave: Design Construtal. Fluidodinâmica computacional. Conversor de energia das ondas, Coluna de água oscilante.

## ABSTRACT

Recently, the oceans have been seen as a promising source of renewable energy. Theoretically, the oceans could offer enough energy to supply the entire world demand. Among the technologies available for energy conversion from the oceans, the Oscillating Water Column (OWC) type devices stand out, which are characterized by a chamber, in which the water oscillates inside in a movement similar to a piston. This movement moves the air to a chimney, where a turbine is attached. The passage of air through the turbine promotes the conversion into mechanical energy. In the present work, the study of the performance of a 1:15 scale OWC type converter was performed using a three-dimensional computational fluid dynamics model. The analysis was based on the Constructal Design Method. In this approach, energy is the quantity that flows through the system, whose purpose is the maximum rate of conversion of wave energy into mechanical energy. Three degrees of freedom were used: the ratio of height to length of the hydropneumatic chamber ( $H1/L$ ), the ratio of the height of the chimney to its diameter ( $H2/d$ ), and the ratio of the width of the hydropneumatic chamber to the width of the wave tank ( $W/Z$ ). The effect of different combinations between degrees of freedom for a typical wave of the southern region of the Brazilian coast was investigated. Conversion efficiency was used as a performance parameter. Computational modeling of the system was performed, using computational fluid dynamics software based on the finite volume method (FVM), using the Volume of Fluid (VoF) modeling for the interface between the gas and liquid phases. In a first analysis, it was observed that the height of the chimney always has a positive effect on the efficiency of the system. However, only workable values were selected for this degree of freedom, limiting the subsequent analyzes to two degrees of freedom,  $H1/L$  and  $W/Z$ . Through a Design Experiment of the Central Composite Project type, different combinations of degrees of freedom were simulated, allowing the construction of Response Surfaces and correlations for the efficiency of the system depending on the degrees of freedom width and height of the chamber, as well as the optimization of the system based on the Response Surfaces. In the tests carried out, the efficiency of the OWC device varied from 1.48% to 19.32% in the worst and best case, respectively.

Keywords: Constructal Design. Computational Fluid Dynamics. Wave Energy Converter. Oscillating water column.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação das energias renováveis na matriz Brasileira e mundial.....	12
Figura 2 - Pesquisas relacionadas com dispositivos CAO, simulação numérica e CFD de 2009 até 2020 .....	14
Figura 3 - Número de publicações sobre dispositivos CAO e CFD por área de estudo .....	15
Figura 4 - Distribuição do potencial energético da energia das ondas ao redor do globo, em kW/m .....	19
Figura 5 - Posição do dispositivo conforme classificação .....	21
Figura 6 - Tecnologia conversor CAO, conforme estrutura e fixação.....	22
Figura 7 - Tecnologia conversor Corpos Oscilantes, conforme estrutura e fixação ..	22
Figura 8 - Tecnologia conversor por Galgamento .....	22
Figura 9 - Representação de um dispositivo CAO .....	24
Figura 10 - Turbina Tipo Dennis - Auld .....	25
Figura 11 - Turbina a) Tipo Wells e turbina b) tipo Impulso.....	25
Figura 12 - Dispositivo CAO – Ilha de Pico, Portugal .....	26
Figura 13 - Esquemático dos componentes de um dispositivo CAO.....	27
Figura 14 - Classificação das ondas conforme seu período.....	32
Figura 15 - Características de uma onda .....	33
Figura 16 - Validação da teoria das ondas em função de h, H e T.....	35
Figura 17 - Forma geométrica da trajetória de uma partícula em uma onda progressiva.....	36
Figura 18 - Esquema da fração volumetria VoF em uma célula bidimensional.....	41
Figura 19 - Fluxograma do Método Design Construtal aplicado ao presente trabalho .....	43
Figura 20 - Esquemático do domínio computacional criado.....	44
Figura 21 - Condições de contorno do tanque numérico.....	45
Figura 22 - Representação simplificada do dispositivo CAO.....	47
Figura 23 - Regiões da malha do tanque numérico.....	50
Figura 24 - Malha da câmara e chaminé.....	50
Figura 25 - Vista de topo do dispositivo CAO.....	51
Figura 26 - Refino na parede da chaminé .....	51
Figura 27 – Verificação da onda. Elevação da superfície numérica em relação à analítica.....	52



Figura 28 – Validação da onda. Elevação da superfície numérica em relação a experimental.....	53
Figura 29 - Esquemático de experimento planejados do tipo Composto Central .....	59
Figura 30 - Superfície de resposta para dois graus de liberdade com $W/Z=0,9$ .....	62
Figura 31 - Dispositivo CAO em proporcional as dimensões ótimas .....	64
Figura 32 - Projeções das eficiência para $W/Z=0,85$ , $W/Z= 0,90$ e $W/Z 0,95$ .....	66
Figura 33 - Superfície de resposta para dois graus de liberdade e $H2/d=10$ .....	69
Figura 34 - Vista isométrica do dispositivo CAO ideal conforme equação 6.2 .....	71
Figura 35 - Superfície de resposta para dois graus de liberdade ( $0,05 \leq H1/L \leq 1$ e $0,7 \leq W/Z \leq 0,95$ ) e $H2/d=10$ .....	72
Figura 36 - Curva da $\varepsilon h$ conforme variação de $H1/L$ e $W/Z$ .....	73
Figura 37 - Linhas de corrente para o melhor caso (a) e pior caso (b).....	74
Figura 38 - Curva da $\varepsilon h$ conforme variação razão de $H2/d$ de 10 à 50 para $H1/L= 0,05$ e $W/Z= 0,95$ .....	75
Figura 39 - Isorregiões de velocidade na direção Y para uma oscilação completa da onda. ....	76
Figura 40 - Ângulo da chaminé para aumento de eficiência hidrodinâmica .....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de energias renováveis brasileira de 2017 para 2018, em GWh ...	13
Tabela 2 - Evolução da capacidade instalada de micro e minigeração distribuída, em MW.....	13
Tabela 3 - Principais plantas de CAO .....	26
Tabela 4 - Classificação das ondas conforme seu período e força geradora.....	31
Tabela 5 - Características das ondas de 1ª ordem .....	36
Tabela 6 - Métodos de solução utilizados .....	46
Tabela 7 - Características da onda estudada.....	47
Tabela 8 - Validação de modelo numérico .....	54
Tabela 9 - Análise da incerteza associada a malha do modelo estudado .....	56
Tabela 10 - Potência máxima em função da largura do dispositivo CAO.....	61
Tabela 11 - Potência e eficiência para $W/Z= 0,90$ .....	62
Tabela 12 - Configurações ótimas para o dispositivo CAO .....	63
Tabela 13 - Potência e eficiência para $W/Z= 0,85$ .....	65
Tabela 14 - Potência e eficiência para $W/Z= 0,95$ .....	65
Tabela 15 - Resultados simulados para características geometrias fabricáveis para o dispositivo CAO .....	68
Tabela 16 - Resultados simulados para características geometrias fabricáveis para o dispositivo CAO com valor de $H2/d = 10$ .....	69
Tabela 17 - Resultados simulados para características geometrias fabricáveis para $0,05 \leq H1/L \leq 1$ e $0,7 \leq W/Z \leq 0,95$ e valor de $H2/d = 10$ .....	71

## LISTA DE SIGLAS

BEN	Balanço Energético Nacional
CAO	Coluna de Água Oscilante
CEO	Conversores de Energia das Ondas
CFD	Fluidodinâmica Computacional
CFL	Courant-Fridrichs-Lewy
EDP	Equações Diferenciais Parciais
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GCI	<i>Grid Convergence Index</i>
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas (UFRGS)
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
ODCE	Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico
ONU	Organização das Nações Unidas

## LISTA DE SIMBOLOS

A	amplitude [m]
C	celeridade [m/s]
$C_g$	velocidade de propagação da onda [m/s]
d	diâmetro da chaminé [m]
Fr	número de Froude
g	aceleração gravitacional [m/s <sup>2</sup> ]
H	altura da onda [m]
h	profundidade [m]
H1	altura da câmara do dispositivo CAO ao longo do eixo y [m]
H2	altura da chaminé do dispositivo CAO ao longo do eixo y [m]
H3	imersão do dispositivo CAO [m]
k	número de onda [m <sup>-1</sup> ]
L	comprimento da câmara do dispositivo CAO ao longo do eixo x [m]
p	pressão [Pa]
Ph	potência hidropneumática [W]
$P_{onda}$	potência da onda [W/m]
T	período de onda [s]
t	tempo físico da simulação transiente [s]
u	componente de velocidade x da onda [m/s]
$U_r$	número de Ursell
$V_E$	volume de entrada no dispositivo CAO [m <sup>3</sup> ]
$V_T$	volume total do dispositivo CAO [m <sup>3</sup> ]
w(z)	componente de velocidade z da onda [m/s]
W	largura da câmara paralela a largura do tanque, na direção Z

### *Letras Gregas*

$\alpha$	fração volumétrica
$\alpha_1$	ângulo de inclinação da chaminé
$\beta$	Fator de escala
$\varepsilon_h$	Eficiência hidropneumática do dispositivo CAO
$\eta$	elevação da superfície livre [m]
$\lambda$	comprimento de onda [m']
$\omega$	frequência angular [rad/s]

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	Motivação .....	12
1.2.	Proposta do trabalho e objetivos .....	17
2.	ENERGIA DAS ONDAS .....	19
2.1	Dispositivos conversores de energia das ondas .....	20
2.2	Dispositivos CAO .....	23
3.	LEI CONSTRUTAL .....	28
4.	TEORIA DAS ONDAS .....	31
4.1	Equações de Stokes para modelagem de ondas.....	37
4.2	Métodos de simulação para modelos fluidodinâmicos .....	39
4.3	Método de modelagem da superfície livre – <i>Volume of fluid</i> .....	40
5.	METODOLOGIA .....	42
5.1	Fator de escalas para a onda de interesse .....	46
5.2	Graus de liberdade para o dispositivo CAO.....	47
5.3	Validação do modelo numérico.....	49
5.3.1	Validação da onda Stokes 2ª ordem e do dispositivo CAO .....	49
5.4	Incerteza associada à malha - GCI.....	54
5.5	Indicadores de desempenho .....	56
5.6	Planejamento de experimentos (DOE).....	58
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	61
6.1	Resultados preliminares do modelo teórico .....	61
6.2	Simulações para modelo numérico em proporções fabricáveis .....	66
7.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS .....	79
8.	REFERÊNCIAS.....	81
9.	APÊNDICE A – REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL DO TANQUE DE ONDAS DO IPH. ....	86

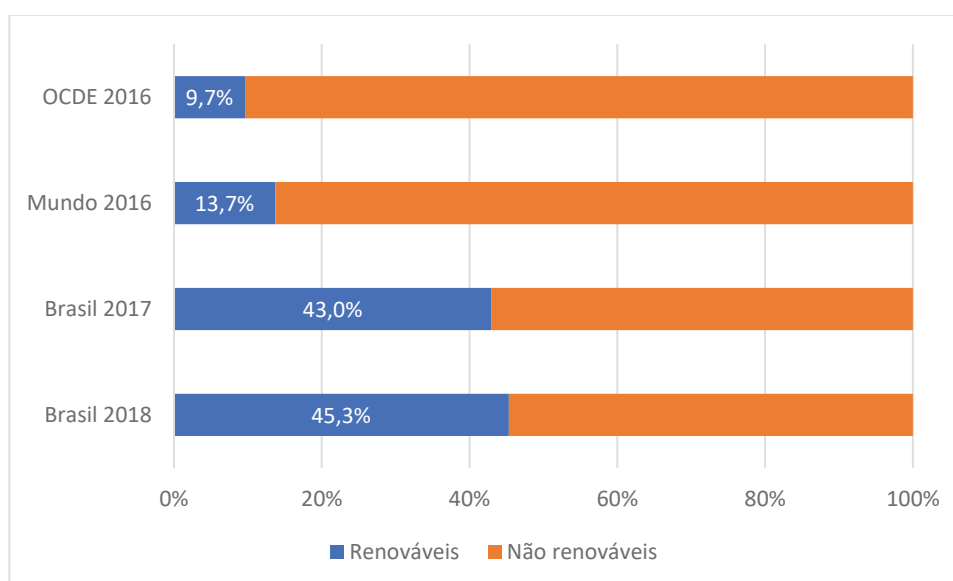
## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivação

O acesso à energia elétrica transformou o padrão de consumo no Brasil e no mundo. Conforme os Objetivos para Desenvolvimento Sustentável (ODS), da Agenda 2030 da ONU, “Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos” é um alvo que pode ser atingido. Para isso deve-se investir em tecnologias que possibilitem a substituição das fontes não renováveis de energia por fontes renováveis NAÇÕES UNIDAS BRASIL (2019) .

No Brasil, conforme o Balanço Energético Nacional (BEN) realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a matriz energética é composta por 45,3% de fontes renováveis em 2018, contra 13,7% do mundo em 2016 EPE (2019). Na Figura 1 observa-se ainda que de 2017 para 2018 ocorreu um aumento de 2,3% na participação das energias renováveis na matriz energética.

Figura 1 - Participação das energias renováveis na matriz Brasileira e mundial



Fonte: Adaptado de EPE, 2019

Ainda na Figura 1, observa-se que os países da Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE) têm apenas 9,7% da matriz energética composta por fontes renováveis.

Comparando a matriz energética renovável de 2017 e 2018, conforme Tabela 1, ocorreram variações significativas nas fontes de energias renováveis no Brasil, com reduções significativas da utilização do gás natural (-16,7%), derivados de

petróleo (- 25,4%), carvão vapor (-12,6%), e aumento significativo das fontes eólica (+14,4%) e solar fotovoltaica (316,7%). Conforme (EPE, 2019), essa mudança é representada pela alta na geração solar distribuída e pela boa capacidade hídrica dos rios, representando um aumento na geração de 18.065 GWh comparando 2017 com 2018 somente pela fonte hidrelétrica.

Tabela 1 - Matriz de energias renováveis brasileira de 2017 para 2018, em GWh

<b>Fonte</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>Diferença 2018/2017</b>
Hidrelétrica	370.906	388.971	4,9%
Gás Natural	65.593	54.622	-16,7%
Biomassa	51.023	52.267	2,4%
Derivados do Petróleo	12.458	9.293	-25,4%
Nuclear	15.739	15.674	-0,4%
Carvão Vapor	16.257	14.204	-12,6%
Eólica	42.373	48.475	14,4%
Solar Fotovoltaica	832	3.461	316,1%
Outras	14.146	14.429	2,0%
Geração total	589.327	601.396	2,0%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em EPE, 2019

Analisando a Tabela 1, a geração total por fontes renováveis foi de 601.396 GWh em 2018, dos quais a fonte hidrelétrica representa 64%. No estudo realizado sobre a EPE, sobre a capacidade instalada de micro e minigeração distribuídas, ou seja, usinas instaladas na unidade consumidora, como residências ou empresas, detectou-se que a capacidade disponível em 2017 saltou de 246,1 MW para 669,6 MW, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Evolução da capacidade instalada de micro e minigeração distribuída, em

	MW	
<b>Fonte</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
Hidráulica	37,3	58,9
Térmica	24,0	38,1
Eólica	10,3	10,3
Solar	174,5	562,3
Capacidade disponível	246,1	669,6

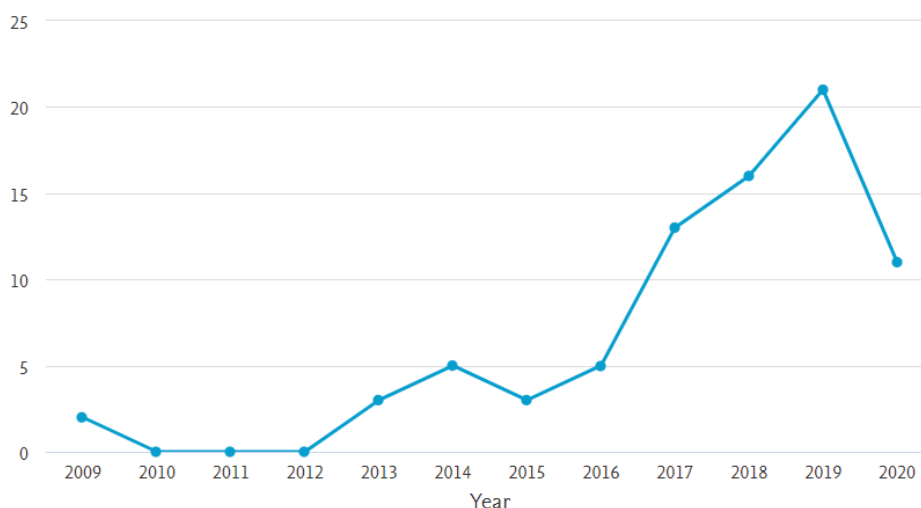
Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em EPE, 2019

A variação da matriz energética brasileira mostra um forte viés sustentável e independente. Procura-se gerar energia elétrica de forma economicamente viável e limpa, o que vem de encontro com o presente estudo, que aborda conversores de energia das ondas em energia elétrica.

A capacidade energética contida nos oceanos é estimada em 3,7 TW (MØRK 2010), e a forma de extração da energia dos oceanos pode ser configurada conforme sua unidade conversora, tema tratado no capítulo 3 do presente trabalho. Dentre as fontes de energia dos oceanos destaca-se a energia das ondas e os dispositivos tipo Coluna de água Oscilante (CAO) como seu meio de conversão. Esses dispositivos apresentam vantagens construtivas e operacionais com relação a outros existentes, pois suas partes móveis não entram em contato com a água do mar, aumentando a vida útil desse tipo de dispositivo (DREW.B, 2016). Os dispositivos tipo CAO, também conhecidos como *Oscillating Water Column (OWC)*, podem ser instalados longe da costa, através de flutuadores ou integrados a quebra mares, encostas plataformas, assim sendo considerados de versátil implantação.

Ao realizar uma busca sobre publicações que contemplem pesquisas sobre dispositivos CAO na plataforma Scopus, da editora Elsevier, em 13 de junho de 2020, que concatena as publicação por ano, termo de busca e revista, observa-se que ao utilizar os termos "*Oscillating Water Column*", "CFD" e "*numerical simulation*" de forma simultânea, 79 resultados são encontrados, de 2009 até 2020, de acordo com a Figura 2 abaixo.

Figura 2 - Pesquisas relacionadas com dispositivos CAO, simulação numérica e CFD de 2009 até 2020

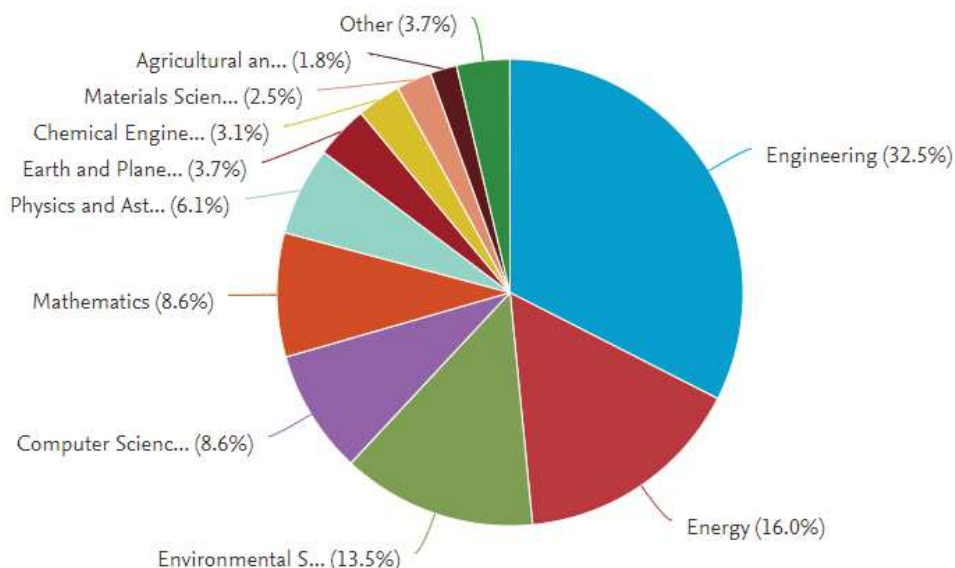


Fonte: Pesquisa realizada na plataforma Scopus em 13 de junho de 2020



Dos 79 resultados mostrados Figura 2, que podem ser distintos entre artigos (59), publicações em congressos (10) e *reviews* (1), 32,5% deles concentram-se na área de engenharia, conforme mostrado na Figura 3

Figura 3 - Número de publicações sobre dispositivos CAO e CFD por área de estudo



Fonte: Pesquisa realizada na plataforma Scopus em 13 de junho de 2020

Considerando os dados mostrados na Figura 2 e na Figura 3, verificou-se que os dados compilados de 2009 até 2020 mostram um aumento no número de publicações sobre o tema. As pesquisas com dispositivos CAO iniciaram antes de 2006 e os estudos que contemplam a análise de desempenho e a otimização de dispositivos CAO modelados numericamente surgiram um pouco mais tarde. Em uma pesquisa realizada no Web Of Science, utilizando os termos “*Oscillating Water Column*” e “*numerical simulation*”, pesquisando pelos termos no título, são encontradas 56 publicações nos últimos 10 anos, correspondente aos periódicos revisados por pares, e 35 publicações utilizando os termos “*Oscillating Water Column*” e “*CFD*” são encontradas 35 publicações. Dentre as publicações pode-se destacar:

- a) no trabalho proposto por Evans e Porter (1995) foi avaliado que as aproximações de Galerkin apresentam um método eficiente e preciso para calcular os coeficientes hidrodinâmicos associados a um modelo de distribuição de pressão de um dispositivo OWC simples;
- b) em Conde e Gato (2008), o escoamento do ar pelo interior de um dispositivo CAO equipado com duas chaminés foi analisado. A metodologia utilizada

consiste em variar a entrada e saída de ar na câmara de acordo com uma função senoidal aplicada à parte inferior do dispositivo CAO;

- c) em Liu et al. (2008) uma modelagem computacional de um dispositivo CAO foi realizada. Foram estudados casos com diferentes características de ondas, em modelos 2D e 3D. Foi utilizado o modelo VoF para avaliar a elevação da onda no interior da câmara hidropneumática encontrando resultados numéricos semelhantes aos resultados experimentais nas simulações bidimensionais e tridimensionais;
- d) em Teixeira et al. (2012), um estudo é conduzido simulando um dispositivo CAO fixo na costa onde a submersão da entrada da câmara hidropneumática foi variada. Utilizando um código próprio, o Fluinco, que emprega o método Taylore-Galerkin semi-implícito de duas etapas, os resultados das simulações são comparados aos obtidos por um código comercial, Fluent. Nas simulações a melhor eficiência do dispositivo é encontrada quando a submersão da parede frontal do dispositivo encontra-se entre 2,5 m e 5,0 m, em um canal com 10,0 m de profundidade;
- e) em Gomes (2014) foi realizado um estudo de um dispositivo CAO para diferentes climas de ondas, em 2D, utilizando o Design Construtal para encontrar a geometria que maximizasse a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica. Foi avaliado o desempenho do dispositivo para um determinado clima de ondas e a perda de carga na turbina foi modelada através de uma restrição física. Os resultados indicam que a razão entre altura e comprimento da câmara devem ser quatro vezes a razão entre altura da onda pelo comprimento característico da onda para melhor eficiência do dispositivo CAO.
- f) no trabalho de Lee e Kim (2018) um modelo CFD de código aberto é utilizado para simular um dispositivo CAO tridimensional, onde estimou-se com precisão a velocidade do ar dentro do dispositivo CAO e além disso, verificou-se que ocorre uma diferença de fase entre as séries temporais de evolução da superfície livre e a evolução da velocidade do ar.
- g) Em Medina-Lopez, Borthwick e Moñino (2019) um estudo bidimensional foi conduzido, simulando numericamente um dispositivo CAO com o solver comercial Fluent, utilizando um modelo de gás natural ,onde a humidade

causada pelo vapor da água foi utilizada no modelo numérica, ocasionando perdas teóricas de até 50% na potência extraída, em alguns casos.

- h) em Cardozo (2020) foi validado um modelo numérico de um tanque de ondas com um dispositivo CAO. O Design Construtal foi utilizado para realizar uma investigação inicial sobre os efeitos dos graus de liberdade em na eficiência do dispositivo CAO em escala de laboratório.
- i) no trabalho de Gonçalves et al. (2020), foi estudada a influência da compressibilidade do ar na performance de dispositivos CAO, mostrando que os efeitos gerados pela compressibilidade do ar no interior da câmara podem diminuir a eficiência em até 20%;

Conforme os trabalhos supracitados, alguns modelos experimentais e numéricos de dispositivos CAO foram estudados, porém nenhum modelo numérico variou três dimensões principais do dispositivo CAO tridimensional de forma simultânea, tampouco limitou os valores das razões entre as dimensões referentes a altura e diâmetro da chaminé para valores fabricáveis, possibilitando assim a construção de um protótipo com estimativas de desempenho. Da mesma forma, nenhum destes trabalhos propôs uma correlação para a eficiência do sistema em função dos graus de liberdade geométricos, utilizando o *Design of Experiments (DOE)* para planejar e apresentar os resultados, como o presente trabalho se propõe a fazer.

O presente trabalho faz parte do projeto “Estudo numérico e experimental de conversores de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante”, apoiado pela FAPERGS, e que tem por objetivo desenvolver um protótipo experimental e simulações numéricas para um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo CAO em escala 1:15. Este dispositivo será instalado no tanque de ondas do Laboratório do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS).

Os resultados do presente trabalho e de Cardozo (2020) servirão como base para a construção dos protótipos experimentais no contexto deste projeto.

## **1.2. Proposta do trabalho e objetivos**

O objetivo desse trabalho é, analisar, simultaneamente, o efeito de três parâmetros geométricos no desempenho de um dispositivo CAO em escala 1:15 sob regime de ondas conhecido característico da costa sul brasileira. As razões entre as

dimensões serão mantidas em uma ordem de grandeza que possibilite a construção de um modelo físico para testes experimentais.

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) sistematizar a análise de um dispositivo CAO utilizando o Método Design Construtal;
- b) analisar a influência da variação do parâmetro  $H1/L$  (altura e comprimento da câmara)  $H2/d$  (altura e diâmetro da chaminé) e  $W/Z$  (largura do dispositivo e largura do tanque de onda) simultaneamente;
- c) avaliar o desempenho do dispositivo utilizando valores fabricáveis para  $H1/L$  (de 0,5 a 0,95),  $H2/d$  (de 1 a 10) e  $W/Z$  (0,7 a 0,95);
- d) propor correlações para o desempenho do sistema baseado em um planejamento experimental de base estatística;
- e) investigar a fluidodinâmica de *designs* de alta e baixa eficiência.

O presente trabalho é composto por 7 capítulos, organizados da seguinte forma:

O Capítulo 1 introduz o tema do trabalho, sua motivação e objetivos;

No Capítulo 2, o conceito da energia das ondas oceânicas é apresentado junto com os dispositivos de conversão dessa energia e suas aplicações;

O Capítulo 3 apresenta a Lei Construtal e como a metodologia originada dessa lei pode ser útil em problemas de engenharia com restrições e graus de liberdade conhecidos;

No Capítulo 4, é apresentada a teoria das ondas e as equações que regem seu comportamento;

O Capítulo 5 descreve a metodologia do trabalho, resumindo o modelo computacional, a formulação matemática do Design Construtal, os indicadores de desempenho do sistema e o planejamento de experimentos, empregados no trabalho;

Capítulo 6, apresenta os resultados e discussões;

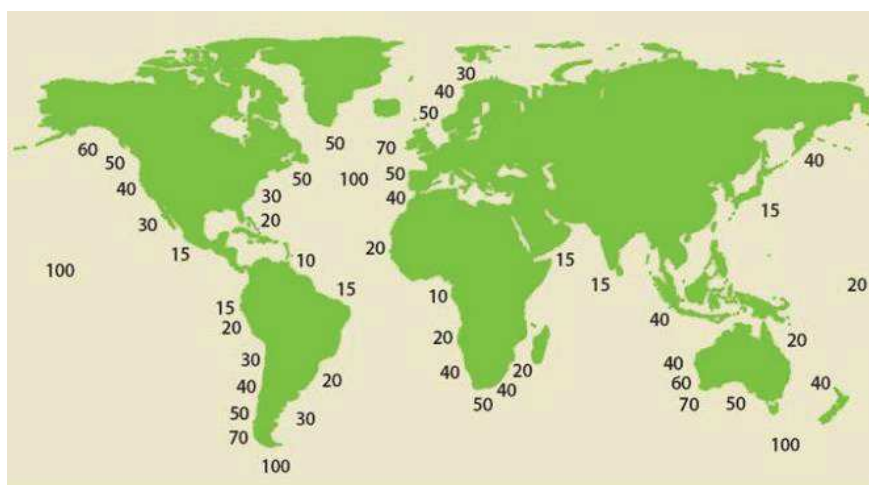
Capítulo 7, apresenta as considerações finais e perspectivas para novas pesquisas.

## 2. ENERGIA DAS ONDAS

Dispositivos conversores de energia das ondas vêm sendo investigados e patenteados desde o final do século XIX. A partir de 1970, quando a crise do petróleo, esforços foram despendidos em pesquisa e desenvolvimento de fontes de energias alternativas (DREW.B, 2016). Além disso, o aumento da concentração de gases do efeito estufa, como o CO<sub>2</sub>, pela queima de combustíveis fósseis, vem causando preocupação com o aquecimento global e motivando o investimento em fontes renováveis de energia elétrica.

Conforme Thorpe (1999) em um relatório produzido para o “*The UK Department of Trade and Industry*” ou “Departamento de Comércio e indústria do Reino Unido” estima-se que o potencial mundial de energia que pode ser extraída das ondas seja de aproximadamente 2 TW com base em um estudo realizado pelo “World Energy Council” em 1993. Em um segundo estudo, Falnes (2007) afirma que o potencial de energia global representado por ondas que atingem as costas é de aproximadamente 1 TW. Em uma pesquisa realizada em 2010 estimou-se que o potencial de energia bruta existente nas ondas seria de aproximadamente 3,7 TW. Excluindo algumas áreas de interesse, o valor passaria a aproximadamente 3 TW, representado o total líquido de energia presente nas ondas (MØRK, 2010). O potencial energético das ondas não é igual em cada país e varia de acordo com sua posição no globo, conforme o diagrama de potencial energético apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Distribuição do potencial energético da energia das ondas ao redor do globo, em kW/m



Fonte: Grimmler (2013)

A imagem da Figura 4 mostra que, na região dos trópicos, a energia disponível encontra-se entre 40 e 100 kW/m e à medida que se aproxima da linha do equador o valor decai ficando entre 10 e 15 kW/m. Conforme Mørk (2010) o conjunto de dados de energia das ondas global consiste em dados operacionais do modelo ECMWF WAM por um período de 10 anos de 1997 a 2006 em intervalos de 6 horas em uma grade de 0,5 ° lat/lon, que foram coletados em todo mundo, validados e calibrados usando o altímetro dos satélites TOPEX e JASON da NASA, o primeiro operou de 1992 a 2002 e o segundo de 2002 até 2006. Foram coletados a altura da onda e dados de velocidade do vento em uma base ponto a ponto para calcular a energia de cada latitude. Os dados de velocidade da onda calculados foram comparados com os medidos em boias de medição de velocidade das ondas.

Ainda na Figura 4, observa-se que na costa brasileira os valores residem entre 15 e 30 kW/m e estima-se que no sul do Brasil o potencial atingido pela onda esteja entre 5 kW/m e 20 kW/m com baixa variabilidade sazonal, uma característica do hemisfério sul (LISBOA, TEIXEIRA E FORTES, 2017).

Ao avaliar os tipos de movimentos do oceano associando com a energia das ondas, existem 4 movimentos principais que são capazes de gerar energia cinética que pode ser reaproveitada, nesse conceito destaca-se abaixo:

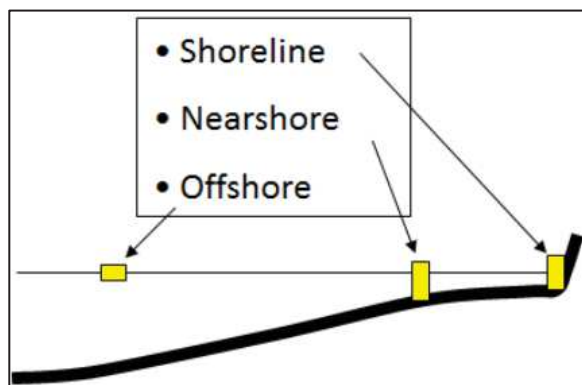
- a) energia das marés;
- b) energia associada ao diferencial térmico (OTEC);
- c) energia das correntes marítimas;
- d) energia das ondas.

## **2.1 Dispositivos conversores de energia das ondas**

Como critério para classificação dos dispositivos conversores de energia das ondas (CEO) do mar em energia elétrica, adotou-se a relação entre a posição do dispositivo e a distância da costa, classificando-os como dispositivos costeiros com acesso por terra, chamados de *on-shore*, dispositivos próximos à costa, porém sem acesso por terra, em profundidade de 8 m até 20 m, chamados de *near-shore*, e dispositivos afastados da costa, instalados em profundidades acima de 25 m, chamados de *offshore* (CRUZ e SARMENTO, 2004).

Na Figura 5, as três posições que os dispositivos CEO podem ocupar foram representadas.

Figura 5 - Posição do dispositivo conforme classificação

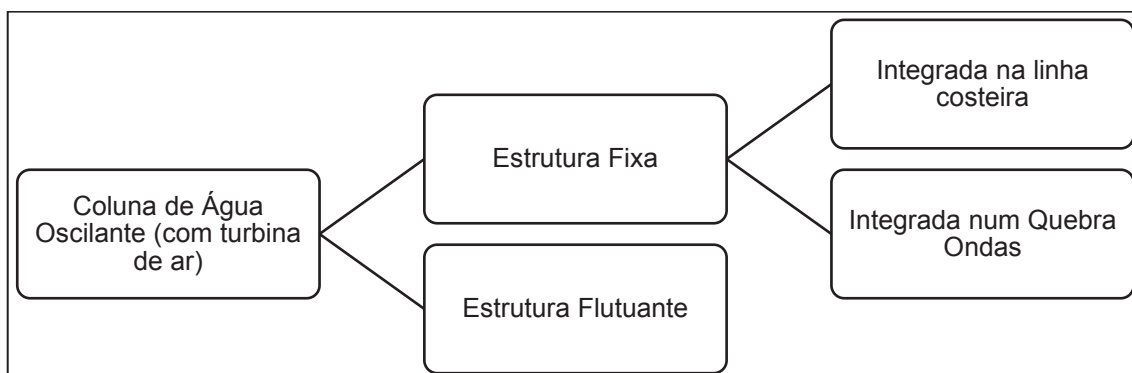


Fonte: Grimmler (2013)

Além da posição em relação à costa, os dispositivos CEO são classificados de acordo com o princípio de funcionamento, sendo eles Coluna da água Oscilante, Corpos submersos ou flutuantes e Galgamento (CRUZ e SARMENTO 2004).

- CEO por Coluna de Água Oscilante caracteriza-se por um corpo parcialmente submerso em que uma câmara de ar é formada. O movimento oscilatório das ondas provoca variação da quantidade de ar dentro da câmara, e conseqüentemente a variação da pressão. Quando a pressão aumenta, o ar é expulso da câmara passando por uma turbina do tipo Wells, acionando um gerador, produzindo eletricidade. Um esquema que mostra o desmembramento da construção e posicionamento desse dispositivo CEO pode ser visto na Figura 6.
- CEO por Corpos Flutuantes ou Corpos Oscilantes podem ser classificados de acordo com o tipo de absorção, podendo ser pontual (*Point Absorbers*) ou progressivos (*Surging devices*). Na absorção, considera-se que o dispositivo é pequeno em relação ao comprimento da onda. O movimento oscilatório do conversor excita sistemas hidráulicos que acionam um gerador, produzindo eletricidade. Na Figura 7 observa-se um esquema que mostra o tipo de construção desse dispositivo.
- CEO por Galgamento conhecido como *Overtopping devices* são dispositivos nos quais ondas que passam pela estrutura fixa são encaminhadas para um reservatório que se encontra em um nível acima do mar. A água armazenada retorna ao oceano após passar por turbinas, que estão abaixo do reservatório, simulando uma hidrelétrica. A Figura 8 apresenta o esquema de funcionamento e construção.

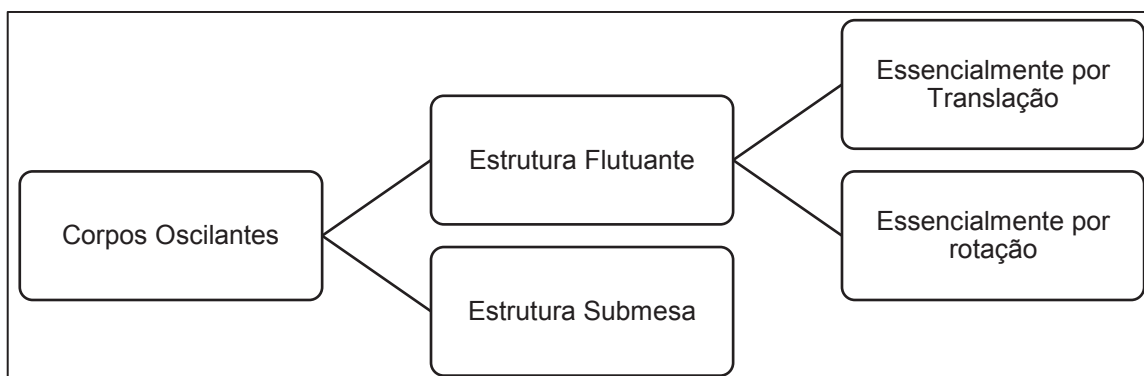
Figura 6 - Tecnologia conversor CAO, conforme estrutura e fixação



Fonte: Adaptado de Beirão (2010)

Na Figura 7 o esquema de construção e funcionamento de um dispositivo CEO tipo corpos oscilantes é exemplificado, adaptado de Beirão, 2010.

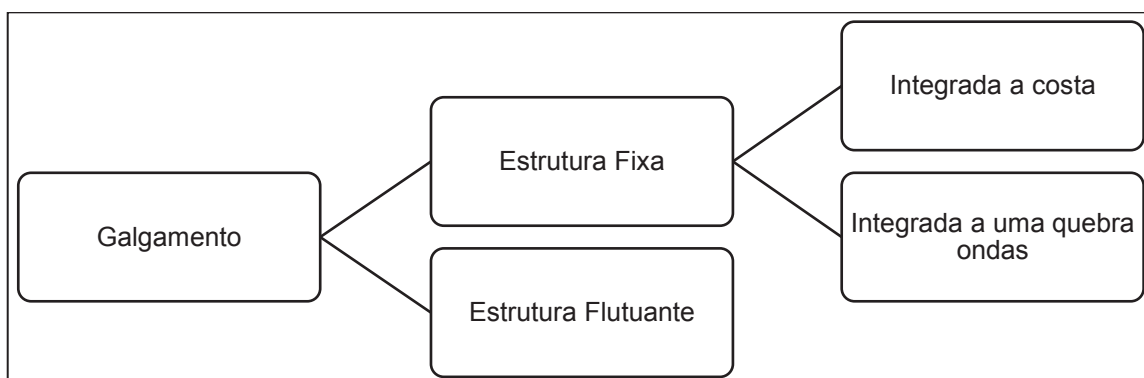
Figura 7 - Tecnologia conversor Corpos Oscilantes, conforme estrutura e fixação



Fonte: Adaptado de Beirão (2010)

Na Figura 8 é apresentado o esquema de funcionamento e posicionamento de um dispositivo CEO por Galgamento.

Figura 8 - Tecnologia conversor por Galgamento



Fonte: Adaptado de Beirão (2010)



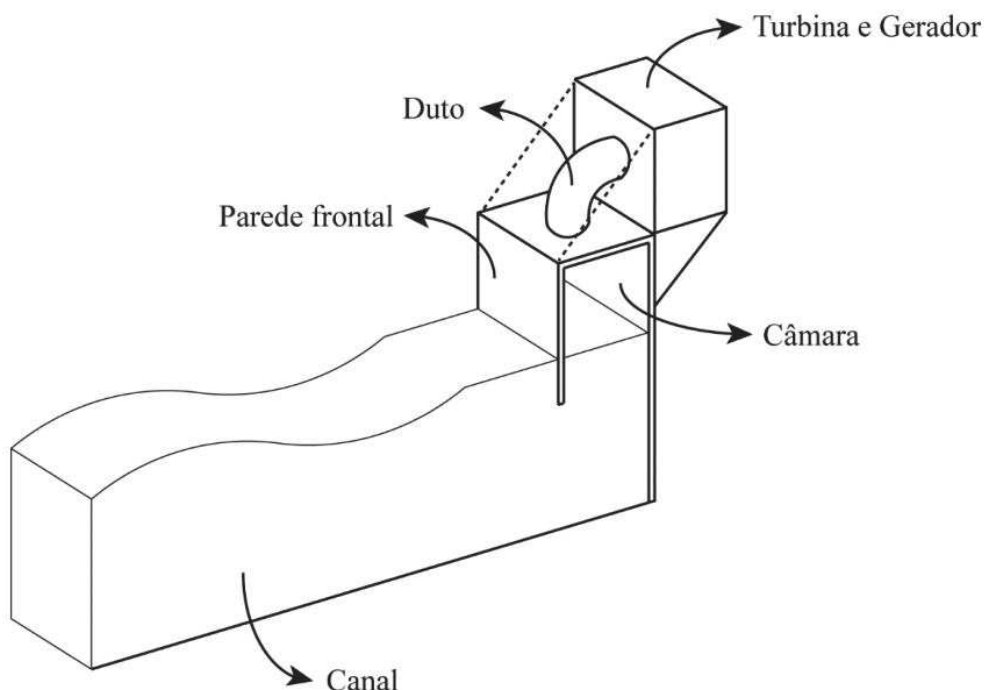
Nos esquemas representados pelas Figura 6, Figura 7 e Figura 8, os dispositivos CEO foram classificados conforme seu princípio de funcionamento. Conforme Drew (2009), ainda se classifica esses dispositivos quanto à sua orientação em relação a direção principal da onda, seu posicionamento e dimensão.

- a) Atenuador: os atenuadores ficam paralelos à direção predominante das ondas e 'surfam' as ondas.
- b) Absorvedor pontual: um absorvedor pontual é um dispositivo pequeno em comparação com o comprimento da onda incidente. Devido a sua dimensão, a direção da onda não é importante para esses dispositivos.
- a) Terminadores: os dispositivos terminadores têm seu eixo principal perpendicular à direção predominante da onda.

## **2.2 Dispositivos CAO**

Os dispositivos tipo CAO são interessantes principalmente devido à sua construção, em que a estrutura fica parcialmente submersa, com uma abertura na parte inferior, conforme Figura 9, a qual fica em uma linha abaixo do nível do mar e em contato com a água. Segundo Falcão (2009), a região no interior da estrutura que é composta por uma câmara pneumática que aprisiona o ar, e com a oscilação da onda o ar é comprimido e conduzido a passar por uma turbina localizada no topo do dispositivo CAO. Essa turbina é acoplada em um gerador, produzindo eletricidade. Como suas partes móveis permanecem sem contato com a água do mar, que é um ambiente agressivo, a vida útil desse dispositivo é prolongada com relação a outros dispositivos CEO.

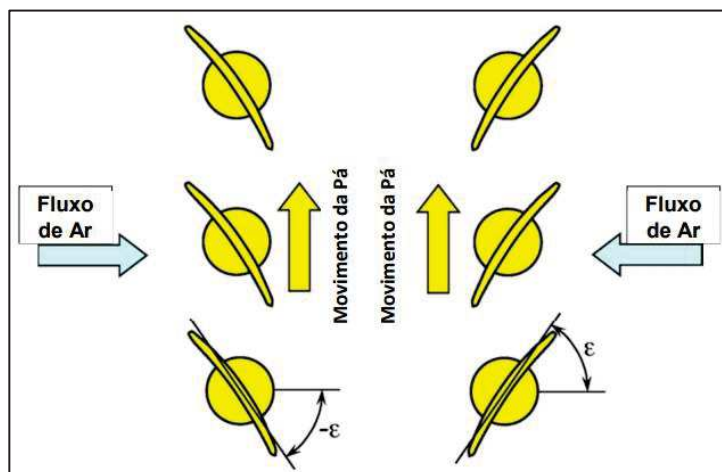
Figura 9 - Representação de um dispositivo CAO



Fonte: SCHÄFER (2012); GONÇALVES (2018)

Consideram-se três tipos de turbinas tecnicamente viáveis para serem utilizadas em dispositivos do tipo CAO: a turbina Wells, mais comum nesses tipos de conversores, a Dennis-Auld e a de Impulso. Aproveitando o movimento do ar de saída da câmara e o de entrada da câmara, o que força o ar a passar pela turbina em sentidos opostos, a turbina tipo Wells é a mais indicada, pois possui a propriedade de manter o sentido de rotação, independentemente do sentido do escoamento. É acionada pela diferença de pressão nas etapas de compressão e descompressão. Apesar da turbina tipo Wells ser utilizada nesse tipo de dispositivo, a turbina Dennis-Auld posiciona-se como alternativa para esse tipo de dispositivo, pois tem como característica variação maior dos passos das pás comparando-a com a turbina Wells. Essa variação do passo exige que a turbina Dennis-Auld maior robustez, e faz com que tenha maior razão de área total de pá dividida pela área de varredura, conforme esquema representado pela Figura 10 abaixo, o que aumenta a eficiência do mecanismo (Neto, 2017). O conjunto turbina/gerador é o responsável pela conversão de energia elétrica mecânica em energia elétrica (Cruz e Sarmento, 2004; Nielsen et al., 2006; Twidell and Weir, 2006; Gomes, 2010; Neto, 2017; Falcão, 2009).

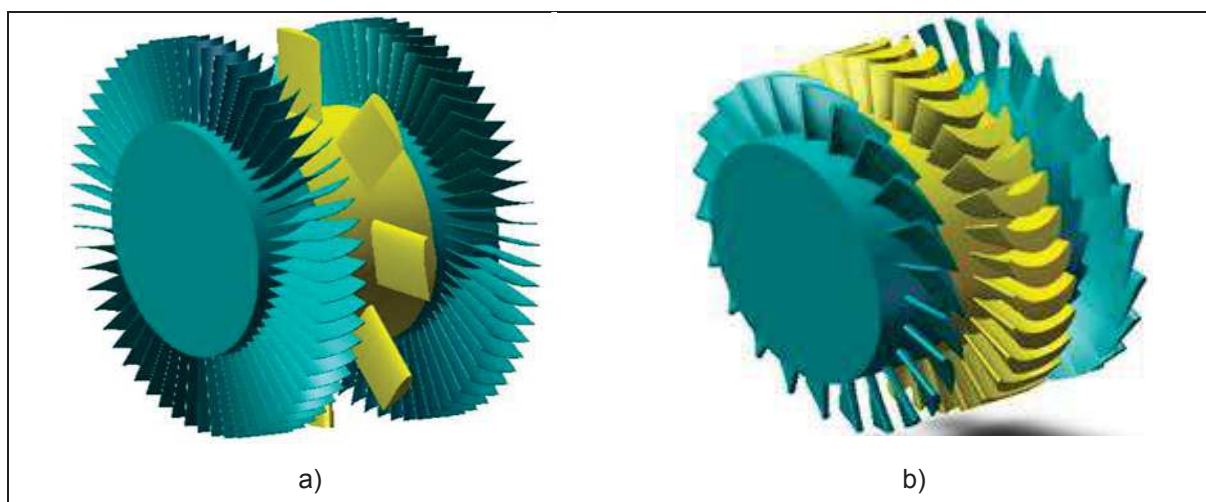
Figura 10 - Turbina Tipo Dennis - Auld



Fonte: Falcão (2009)

Outro tipo de turbina de ar que pode ser utilizada é a do tipo Impulso. Quando colocada em comparação com a turbina Wells, pode-se dizer que é caracterizada por velocidades rotacionais consideravelmente mais altas, o que amplifica o armazenamento de energia através de volante de inércia. As turbinas de impulso não são auto retificadas, acarretando em perdas de energia decorrente do direcionamento do escoamento na entrada do rotor, porém utilizam-se pás direcionadoras de escoamento, aumentando a eficiência em ambos os sentidos do escoamento do ar, adicional a isso, a turbina de impulso apresenta níveis de eficiência mais elevados em comparação com a Wells em variadas frequências de ondas, pois tem menos sensibilidade a essa variação (NETO, 2017). Na Figura 11 observam-se as duas turbinas, lado a lado.

Figura 11 - Turbina a) Tipo Wells e turbina b) tipo Impulso



Fonte: Falcão (2009)

Com o fomento da pesquisa dedicada na área de aproveitamento da energia dos oceanos, diversas pesquisas surgiram e plantas de dispositivos CAO foram construídas em diversos locais, como a Ilha de Pico, em Portugal, e na Ilha de Islay, na Escócia (Gonçalves, 2018). Na Tabela 3 são apresentados alguns protótipos avançados, seu tipo, localização, país onde está implantado e capacidade de geração, em kW.

Tabela 3 - Principais plantas de CAO

Tipo	Localização	País	Capacidade (kW)
Onshore	Pico	Portugal	400
Onshore	Mutriku	Espanha	296
Onshore	Islay	Escócia	500
Onshore	Toftestallen	Noruega	500
Onshore	Kujukuri	Japão	30
Onshore	Vizhinjam Harbour	Índia	150

Fonte: Adaptado de Clément, 2007 e Gonçalves, 2018

O dispositivo CAO mostrado na tabela acima, localizado na Ilha de Pico, em Portugal possui uma estrutura ao nível de superfície livre de 12 m x 12 m no seu interior, e a entrada da onda localiza-se a aproximadamente 8m de profundidade a partir da superfície livre (nível do mar), com essa estrutura, conforme Tabela 3, obtém-se potência instalada de 400 kW (MELO, 2018). A Figura 12 mostra o dispositivo COE tipo CAO instalado na Ilha de Pico.

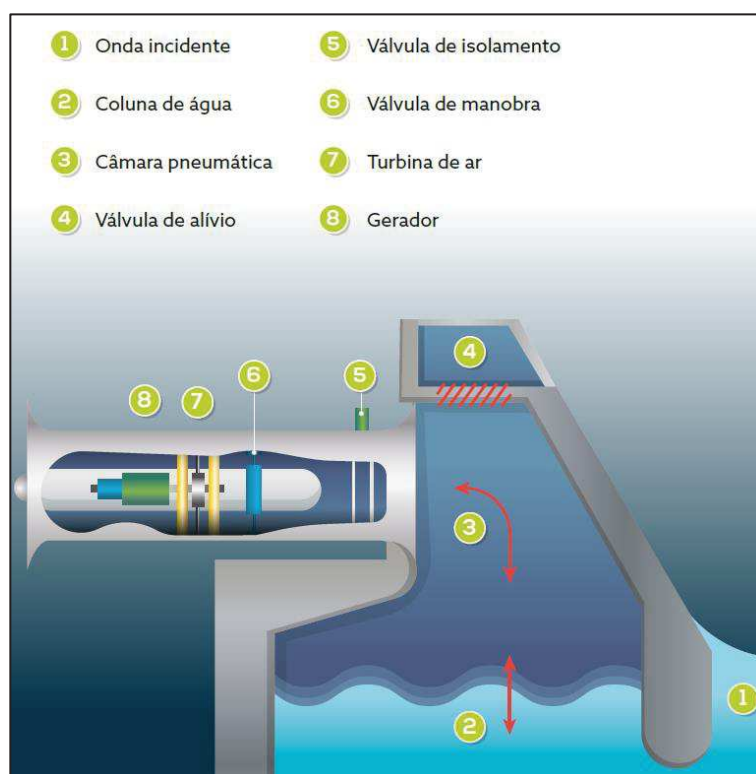
Figura 12 - Dispositivo CAO – Ilha de Pico, Portugal



Fonte: OWC Pico Power Plant

Na Figura 13 um esquema detalhado do dispositivo CAO discriminando todos os seus componentes é apresentado, esse esquema refere-se ao dispositivo CAO que está em funcionamento na Ilha de Pico. No que diz respeito ao seu funcionamento, no presente trabalho será avaliada a eficiência do dispositivo CAO levando em consideração os parâmetros 1, 2 e 3, que é a onda incidente, a coluna da água gerada e a câmara de ar (MELO, 2018). Desses três parâmetros a coluna da água gerada pela onda incidente e a própria onda incidente são características fixas originadas do clima de onda. A câmara pneumática ou hidropneumática, outra nomenclatura encontrada, e a chaminé são os únicos componentes cujas geometrias são analisadas no presente estudo.

Figura 13 - Esquemático dos componentes de um dispositivo CAO



Fonte: WavEC (2018)

No esquemático acima é possível verificar que o movimento da onda é vertical sem componente horizontal, ou seja, apenas a energia contida na onda através da oscilação comprime o ar na câmara, item 3 da figura acima.

### 3. LEI CONSTRUTAL

Uma lei da física é um enunciado comprovado através de um método científico, que por fim, nos traz uma verdade científica traduzida por equações associadas a fatos observados na natureza de forma sistêmica. O princípio da ciência conhecido como Lei Construtal foi observado a partir da constatação que o *design* é um fenômeno físico universal, que integra o animado e inanimado com o único objetivo de facilitar o escoamento de um ponto A até o ponto B, prevendo como esse escoamento deverá ocorrer (BEJAN; ZANE, 2012).

Segundo a Teoria Construtal, sistemas vivos são aqueles em que existe movimento, ou seja, escoamento. Isto acontece em sistemas que apresentam algum desequilíbrio e a procura pelo equilíbrio faz com que o sistema se transforme, procurando a configuração que facilite o escoamento de todas as suas correntes ao longo do tempo. Pode-se afirmar que só existe vida onde há escoamento e logo é possível comparar a vida (seres vivos, rios, sistemas conversores de energia das ondas) a um sistema em desequilíbrio termodinâmico (BEJAN, 1997; BASAK, 2011).

A Teoria Construtal, conforme Bejan e Zane (2012), diz que um sistema real de escoamento apresentará imperfeições, que podem ser caracterizadas pela dissipação de energia, por exemplo. Porém o *design* deve evoluir de tal forma que seu escoamento seja facilitado e as imperfeições sejam distribuídas ao longo da geometria e tempo. Então, entende-se que o *design* ou padrão é, na verdade, um fenômeno espontâneo que surge e evolui na natureza. A Lei Construtal enuncia que “para um sistema de escoamento finito persistir no tempo (viver), ele deve evoluir livremente de modo a prover fácil acesso às correntes que escoam através dele” (BEJAN, 1997a, p. 815).

O Design Construtal faz parte de uma metodologia para a obtenção de geometrias de melhor desempenho para sistemas vivos, do ponto de vista da Teoria Construtal. Conforme Rocha, Lorente e Bejan (2017), com este método a geometria pode ser deduzida a partir de um princípio de maior acesso aos escoamentos. É necessário entender as restrições do sistema e a geometria, que submetida a restrições globais, é variada de acordo com seus graus de liberdade até que melhores configurações sejam obtidas (BEJAN, 2000). Dentre as publicações sobre a Teoria Construtal, destacam-se:

- a) no trabalho de Bejan (1996) foi mostrado como o Design Construtal pode auxiliar na predição de geometrias otimizadas para condução de calor, quando o trocador de calor tem um volume baixo, mostrando geometrias que imitam as ramificações de árvores apresentam melhor rendimento;
- b) a publicação de Nelson e Bejan (1998) mostra que ao otimizar a forma do sistema, é possível prever analiticamente as principais características estruturais e de transferência de calor do sistema, por exemplo, o início da convecção, a relação entre o número de Nusselt e o número de Rayleigh. O escoamento convectivo, surge como resultado de um processo de investigação das modificações geométricas e seu efeito no desempenho, ou facilitar o fluxo de calor, no qual a difusão é atribuída a escalas de comprimentos menores que o menor elemento de escoamento macroscópico, denominado como “sistema elementar”;
- c) no artigo de Bejan e Almogbel (2000) é relatada uma análise baseada na Teoria Construtal de montagens de aletas em forma de T, onde o objetivo é maximizar a condutividade térmica global da montagem, sujeita a restrições de volume total e material de aleta;
- d) na revisão de Lorente e Bejan (2011) que aborda os artigos publicados sobre a Lei Construtal, são abordados temas como a evolução do *design* na natureza, a hierarquia do *design* e a Lei Construtal versus a segunda lei da termodinâmica;
- e) no trabalho de Gomes (2014), foi apresentado um estudo numérico com o objetivo de maximizar a conversão de energia das ondas em energia elétrica através de um dispositivo conversor de energia das ondas tipo CAO. Através de uma variação estruturada dos parâmetros geométricos do sistema, utilizando uma abordagem com Design Construtal, uma combinação ideal entre os parâmetros geométricos foi definida atendendo o objetivo de maximizar a conversão da energia das ondas em energia elétrica;
- f) no artigo de Gomes, Lorenzini e Rocha (2018) o objetivo foi maximizar, através de um estudo numérico e Design Construtal, a potência hidrodinâmica do dispositivo, sujeito a ondas em escala real com diferentes períodos. O problema tem duas restrições: volume da câmara hidropneumática (VHC) e volume total do dispositivo CAO (VT), e tem dois

graus de liberdade:  $H1/L$  (razão entre altura e comprimento da câmara hidropneumática) e  $H3$  (submersão do dispositivo CAO). Nesse estudo os resultados indicam que a razão entre altura e comprimento da câmara devem ser quatro vezes a razão entre altura da onda pelo comprimento característico da onda para melhor eficiência do dispositivo CAO, já a submersão do dispositivo CAO sugere que a submersão ideal, medida do leito até a entrada da câmara, é aproximadamente o valor da altura de água da superfície livre, ou seja, a entrada da câmara está próxima superfície.

- g) no artigo de Lima et al. (2019) o método Design Construtal foi aplicado no estudo numérico de um dispositivo CAO bidimensional de câmara dupla, em escala real, em que as características geométricas do conjunto, submetido a um clima de ondas regular, foram estudadas.

Os trabalhos supracitados mostram que o Design Construtal aplicado a um sistema de escoamento gera um método válido para determinar geometrias que apresentam melhor rendimento ou eficiência, bem como o efeito dos parâmetros geométricos no desempenho do sistema, quando submetidas a restrições e com graus de liberdade definidos, possibilitando a investigação do efeito das variações geométricas em diversos sistemas de escoamento.



#### 4. TEORIA DAS ONDAS

Ondas são geradas pela ação do vento incidente sobre a superfície do oceano e a energia transferida do vento para a água depende da velocidade do vento, tempo de incidência e da área de incidência, portando entende-se que as ondas podem surgir com diferentes tamanhos e formas, de acordo com as direção e intensidade das forças que agem sobre a superfície do oceano (GONÇALVES, 2018).

As ondas oceânicas são compostas de diferentes ondas, o que comprova seu comportamento aleatório e de difícil previsibilidade. Porém, grandes ondas em uma série de ondas aleatórias podem ser determinadas na forma de ondas regulares, podendo, então, ser descritas através de teorias determinísticas (CHAKRABARTI, 2005 apud GOMES, 2014). Descrever as ondas em um modelo matemático apresenta grande complexidade, uma vez que diversos fatores corroboram para sua formação e comportamento. Os principais fatores que influenciam na agitação marítima são as ondas gravitacionais, as marés, os ventos, as tempestades e os deslocamentos de gelo ou de terra. (CARNEIRO, 2007 e GOMES, 2014).

As ondas oceânicas podem ser classificadas conforme seu período. Na Tabela 4 são apresentadas as ondas catalogadas para cada período.

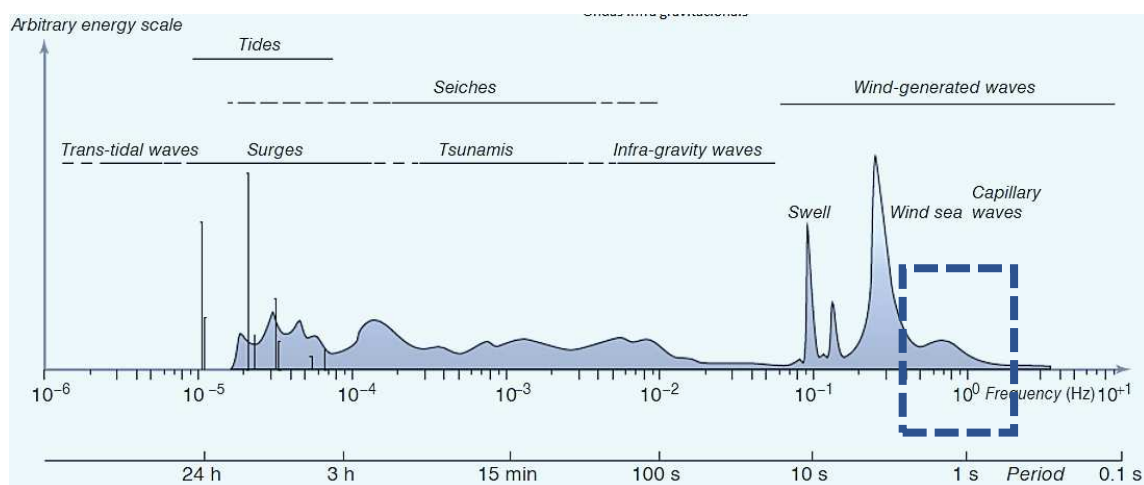
Tabela 4 - Classificação das ondas conforme seu período e força geradora

<b>Classificação</b>	<b>Período</b>	<b>Forças geradoras</b>
Ondas capilares	$T < 0,1s$	Vento
Ondas de ultra gravidade	$0,1s < T < 1s$	Vento
Ondas de gravidade	$1s < T < 20s$	Vento
ondas de infragravidade	$20 s < T < 5min$	Vento e gradiente de pressão atmosférica
Ondas de longo período	$5min s < T < 12h$	gradiente de pressão atmosférica e terremoto
Maremoto	$2h < T < 24h$	Atração gravitacional
Tsunami	$T > 24h$	Fenômenos extremos a atração gravitacional

Fonte: Elaborado pelo autor bom base em Toffoli e Bitner-Gregersen (2017)

Na Figura 14 as classificações das ondas conforme seu período, sua energia, em uma escala arbitrária, e sua força geradora.

Figura 14 - Classificação das ondas conforme seu período



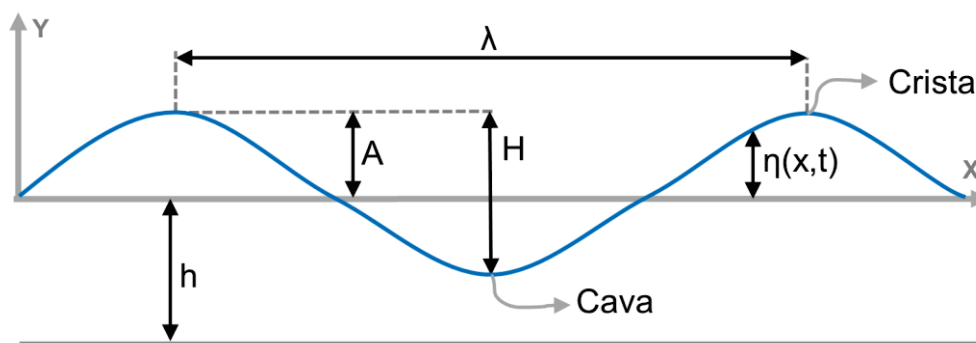
Fonte: Toffoli e Bitner-Gregersen (2017)

O quadro pontilhado na imagem acima refere-se a onda que utilizada para estudar a melhor configuração para o dispositivo CAO.

O comportamento das ondas pode ser descrito e classificado de acordo com a teoria das ondas regulares e irregulares, modelo de classificação também conhecida como teoria das ondas determinísticas e aleatórias. A teoria das ondas regulares descreve o comportamento de onda bem definido e constante, com repetibilidade e características idênticas em todos os períodos, o que não representa uma onda em sua totalidade e difere do modelo das ondas irregulares, no qual uma onda é composta por ondas regulares pequenas, com diferentes períodos e alturas. O comportamento descrito pelo modelo das ondas irregulares caracteriza com mais fidelidade o movimento das ondas oceânicas, entretanto para estudar e avaliar numericamente os efeitos das ondas em um dispositivo tipo CAO aproxima-se o comportamento das ondas oceânica ao comportamento das ondas regulares

Para caracterizar uma onda, usualmente utiliza-se o comprimento da onda ( $\lambda$ ), altura da onda ( $H$ ) e a profundidade ( $h$ ), a partir dessas características, que são características fixas para um determinado tipo de onda, outras características são derivadas, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Características de uma onda



Fonte: Adaptado de GOMES, 2014

- Profundidade (h): é a profundidade do canal, ou a distância entre a superfície livre até o leito;
- Crista: é o ponto mais alto atingido pela onda ou superfície livre da água, comparando com a altura média do nível da água;
- Cava: é o ponto mais baixo atingido pela superfície livre da água comparando com a altura média do nível da água;
- Amplitude (A): é a distância medida a partir da superfície livre e a cava ou da superfície livre até a crista;
- Altura (H): é a distância entre as cristas e cavas sucessivas;
- Elevação da superfície livre ( $\eta$ ): representa a distância instantânea da superfície livre ao plano médio do nível da água;
- Comprimento ( $\lambda$ ): é a distância entre duas cristas ou cavados sucessivos;
- Período (T): é o tempo necessário para a forma da onda percorrer um ciclo completo;
- Celeridade (C): representa a velocidade de propagação da crista da onda.

O comprimento da onda, representado por ( $\lambda$ ) pode ser calculado de forma direta através da Equação (4.1):

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \quad (4.1)$$

A celeridade (C), que representa a velocidade de propagação da onda, conforme descrito no item i) acima, pode ser calculado em função do comprimento da onda ( $\lambda$ ) e pelo período (T), conforme Equação (4.2):

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad (4.2)$$

Conforme Gomes (2014), a teoria das ondas abrange diferentes comportamentos, de acordo com as condições do meio onde estão inseridas, portanto para determinar a correta teoria das ondas a ser aplicada, 3 parâmetros básicos são utilizados, sendo eles a altura da onda (H), o comprimento ( $\lambda$ ) e a profundidade da água (h). Conforme os 3 parâmetros acima calcula-se os parâmetros adimensionais que servem como base para determinar a correta teoria das ondas a ser aplicada (UNNA, 1943). Abaixo os parâmetros adimensionais:

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

Assumindo que as ondas possuem pequena amplitude utiliza-se a Teoria de Airy, ou Stokes de 1ª ordem, que se baseia na hipótese que a altura da onda é pequena em relação ao comprimento e a profundidade. Conforme Albuquerque (2008), a hipótese anterior assume que as condições de superfície livre podem ser linearizadas na superfície média, e não na superfície livre. Teoricamente as equações fornecidas são exatas quando a soma do movimento da onda é igual a zero, altura da onda e altura da cava, porém assume-se a mesma solução para movimento de onda em que a soma é diferente de zero.

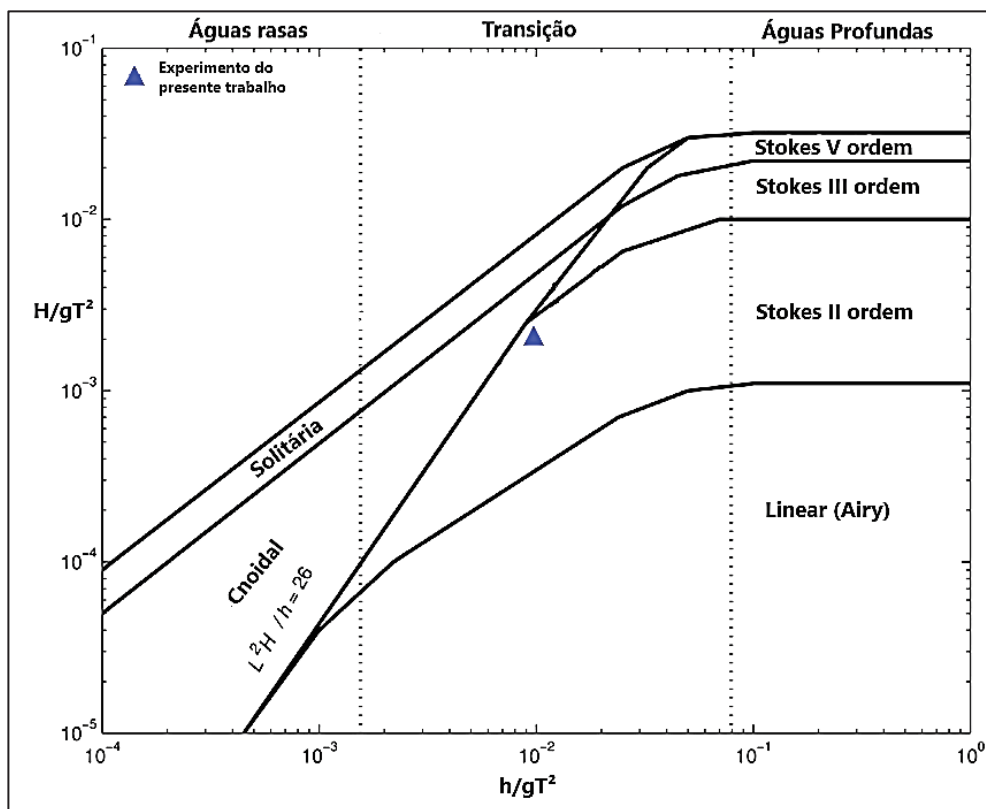
A simplificação acima só é possível para ondas de pequena altura, pois a velocidade da partícula fluida é menor e, em consequência, o termo de inércia convectiva, que depende do quadrado da velocidade, pode ser desprezado relativamente ao termo de inércia local. Para avaliar se a onda se encaixa na Teoria de Airy estabelece-se algumas relações adicionais àquelas mostradas acima:

Em grandes profundidades, conforme Albuquerque (2008), as relações  $(H/h)$  e  $(\lambda/h)$  são menores que  $(H/\lambda)$ , ou seja, a altura relativa da onda e a profundidade relativa são menores que a declividade, já em pequenas profundidades, ou seja, em águas rasas o parâmetro mais significativo é a altura relativa da onda  $(H/h)$ , já em águas intermediárias avalia-se a declividade multiplicada pelo cubo do comprimento da onda dividido pela profundidade  $(H/\lambda) \times (\lambda/h)^3$ . Na Figura 16 é mostrado graficamente a divisão entre águas rasas, intermediárias e profundas,

conforme a correlação entre os parâmetros das ondas. A teoria linear de Airy é aplicável para situações onde  $(H / \lambda) \ll 1$ , ou seja, o comprimento da onda é muito maior que a altura da onda e  $(h / H) \gg 1$ , ou seja, a profundidade é muito maior que a altura da onda.

Simplificando a relação para definir a profundidade da água e determinar a teoria a ser utilizada, utiliza-se a razão entre a profundidade ( $h$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ), classificando a propagação das ondas em águas rasas ( $h/\lambda < 0,05$ ), águas intermediárias ( $0,05 < h/\lambda < 0,5$ ) ou águas profundas ( $h/\lambda > 0,50$ ) (GONÇALVES, 2018). Observa-se que a teoria linear, ou teoria de Airy, conforme discutido acima, não apresentam características próximas às ondas reais, pois só permite a análise de ondas altas em águas rasas. Na Figura 16 é possível validar a teoria da onda em função do período  $T$ , altura da onda  $H$  e profundidade do leito  $h$ . A Figura 16 representa graficamente a aplicação da teoria de Stokes rasas, profundas e de transição, relativa à altura da onda, seu período e a profundidade do leito.

Figura 16 - Validação da teoria das ondas em função de  $h$ ,  $H$  e  $T$

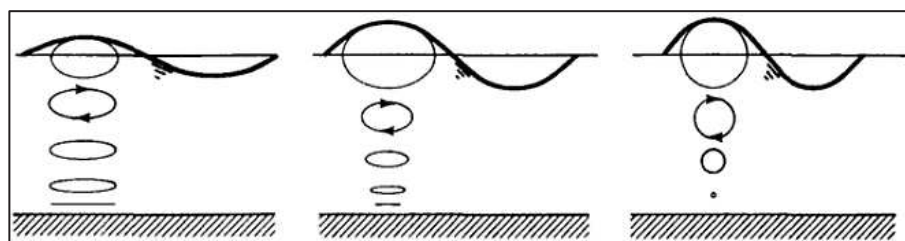


Fonte: Adaptado de MÉHAUTÉ (1976)

A Figura 17 representa a trajetória da partícula de uma onda progressiva, para águas rasas, intermediárias e profundas, da esquerda para a direita. A aplicação da

teoria de Stokes 2º ordem tem boa aderência para águas intermediárias, com trajetória das partículas semi-ovais, pois atende a relação ( $0,05 < h/\lambda < 0,5$ ) mostrada acima e atende as relações da Figura 16 para profundidade e altura de onda.

Figura 17 - Forma geométrica da trajetória de uma partícula em uma onda progressiva



Fonte: Gonçalves (2018)

Ainda se observa na Figura 16 que para água rasas somente é possível aplicar a teoria Cnoidal e para águas profundas aplica-se Stokes de 2ª, 3ª, 4ª e 5ª ordem. Na Tabela 5 encontram-se as equações que descrevem o comportamento das ondas para águas rasas, profundas e de profundidade intermediária.

Tabela 5 - Características das ondas de 1ª ordem

Profundidade relativa	Águas rasas $Kh < \pi/10$	Profundidade de transição $\pi/10 < kh < \pi$	Águas profundas $Kh > \pi$
Perfil da onda	$\eta = a \sin(kx - wt)$	$\eta = a \sin(kx - wt)$	$\eta = a \sin(kx - wt)$
Celeridade	$C = \sqrt{gh}$	$C = \frac{g}{w} \tanh(kh)$	$C = \frac{g}{w}$
Comprimento	$\lambda = T\sqrt{gh}$	$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)$	$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$
Frequência angular	$\omega^2 = gk^2h$	$\omega^2 = gk \tanh(kh)$	$\omega^2 = gk$
Velocidade	$C_g = \sqrt{gh}$	$C_g = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right]$	$C_g = \frac{g}{2\omega}$
Componentes de velocidade	$u = a\sqrt{\frac{g}{h}} \sin(kx - wt)$ $w = a\omega \left( 1 + \frac{h}{d} \cos \right) (kx - wt)$	$u = \frac{agk \cosh[k(y+h)]}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - wt)$ $w = -\frac{agk \sinh[k(x+h)]}{\omega \cosh(kd)} \cos(kx - wt)$	$u = awe^{ky} \sin(kz - wt)$ $w = -awe^{ky} \sin(kx - wt)$
Deslocamento de partículas	$\xi = \frac{a}{\omega} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos(kx - wt)$ $\zeta = a \left( 1 + \frac{y}{h} \right) \sin(kx - wt)$	$\xi = \frac{agk \cosh[k(h+y)]}{\omega^2 \cosh(kh)} \cos(kx - wt)$ $\zeta = -\frac{agk \sinh[k(h+y)]}{\omega^2 \cosh(kh)} \sin(kx - wt)$	$\xi = ae^{kz} \cos(kx - wt)$ $\zeta = -ae^{kz} \sin(kx - wt)$
Pressão de superfície	$\frac{p}{\rho\omega g} = \eta - y$	$\frac{p}{\rho\omega g} = \eta \frac{\cosh[k(h+y)]}{\cosh(kh)} - y$	$\frac{p}{\rho\omega g} = \eta e^{ky} - y$

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1 Equações de Stokes para modelagem de ondas

Escolher corretamente a teoria a ser aplicada também determina que o movimento da onda em sua superfície será corretamente calculado. A teoria de Stokes de 2ª ordem é, conforme mencionado nos capítulos anteriores, uma teoria não-linear que descreve ondas progressivas. A partir da teoria de Stokes de 2ª ordem é possível obter equações que descrevem o movimento da onda, traduzido pelo seu campo de velocidade e a posição da superfície livre ( $\eta$ ) para cada posição e tempo.

Conforme Gomes (2014), a teoria de Stokes se aplica para alturas de ondas maiores em águas relativamente profundas e a partir da teoria de 2ª ordem aparecem componentes de frequências com o dobro, triplo... n vezes a mais que a frequência natural, criando ondas com a crista mais alta e cava mais achatada. Outro fenômeno que ocorre é o transporte de massa na direção de propagação da onda, uma vez que a solução não apresenta mais o caminho das partículas como uma órbita fechada, sendo que a teoria linear permite sua aplicação somente em ondas simétricas e com orbitas circulares fechadas (CARNEIRO, 2007).

Conforme Carneiro (2007), a solução de Stokes é válida para  $kh < 1$  e  $H/\lambda < 1$  sendo  $k = 2\pi/\lambda$ . Em relação ao número de Ursell a solução de Stokes limita-se a  $Ur < 26$ .

Para a correta aplicação da teoria de Stokes para cálculos das ondas de ordens superiores, entende-se que o fluido está em contato com o ar, atmosfera ou um meio gasoso. Essa região de contato é denominada de superfície livre, e a elevação da superfície é dada pela equação de Stokes de 2ª ordem (RIVAS, 1981. GOMES, 2013). A Equação (4.3) mostra como calcular a elevação da superfície livre para cada instante de tempo e posição.

$$\eta = H\cos(kx - \omega t) + \frac{H^2 k \cosh(kh)}{16 \sinh^3(kh)} (2 + \cosh 2kh) \cos 2(kx - \omega t) \quad (4.3)$$

onde H representa a altura da onda, medida da crista, que é o ponto mais alto, até a cava, ponto mais baixo, comportamento que pode ser observado na Figura 15.

Uma nova variável necessária para a resolução da equação da elevação da onda é o “k”, conhecido como o “número de onda”, obtido através de uma relação não

linear, conforme a equação (4.4) e  $\omega$ , que é a frequência angular, calculada conforme a equação (4.5).

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.4)$$

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kh)} \quad (4.5)$$

A frequência angular ( $\omega$ ), representada na equação (4.5), pode ser escrita de forma simplificada, sendo a razão de  $2\pi/T$ , sendo T o período da onda, conforme Equação (4.6).

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (4.6)$$

Com a equação da elevação da superfície,  $\eta$ , é possível calcular o nível da água para cada instante de tempo em uma posição específica a partir do início da fonte geradora, ou início do tanque, essa posição da superfície em relação ao fundo do tanque pode ser calculada de forma analítica e comparada com os resultados numéricos, podendo utilizar essa comparação para validação da onda numérica.

Conforme a teoria de Stokes de Segunda Ordem, a velocidade de propagação da onda nas direções u (horizontal) e v (vertical) pode ser calculada a partir da soma do componente de primeira ordem mais o componente de segunda ordem. A equação potencial (4.7) da origem aos componentes de velocidade de 1° ordem e 2° ordem nos eixos X e Z.

$$\phi(x, y, z) = \frac{Ag \cosh(ky + kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (4.7)$$

A partir da equação (4.7) obtém-se os componentes de velocidade de 1ª ordem para o movimento da onda, Equação (4.8) e Equação (4.9).

$$w(x) = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{Hgk \cosh(ky + kh)}{2\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (4.8)$$

$$w(z) = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{Hgk \sinh(ky + kh)}{2\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (4.9)$$



Aplicando as condições de contorno de superfície livre e fundo impermeável, obtém-se os componentes de velocidade de 2ª ordem para a teoria de Stokes (RIVAS, 1981), (CHAKRABARTI, 1987), (GOMES et al, 2009), (MACHADO, 2017).

$$u(x) = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{3H^2 \omega k \cosh^2(ky + kh)}{16 \sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (4.10)$$

$$w(z) = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{3H^2 \omega k \sinh^2(ky + kh)}{16 \sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (4.11)$$

## 4.2 Métodos de simulação para modelos fluidodinâmicos

Essa subseção busca dissertar sobre os métodos de fluidodinâmica computacional para simulação de ondas na forma do escoamento de água, ar e sua interface.

Conforme Bhaskaran e Collins (2002), a simulação de escoamento por meio da resolução de equações diferenciais parciais e equações diferenciais ordinárias utilizando modelagem computacional, é um ramo da mecânica dos fluidos chamado de Fluidodinâmica Computacional (CFD).

Sabe-se que o movimento dos fluidos incompressíveis é regido pelas Equações de Navier-Stokes, que descrevem o comportamento do fluido macroscopicamente. Estas consistem em um conjunto de Equações Diferenciais Parciais (EDP) não lineares derivadas das leis básicas da conservação de massa, momento linear e energia (SILVA, 2018).

Pela complexidade a solução analítica de muitos problemas práticos não é viável para problemas complexos, logo a resolução das EDP's que descrevem o problema deve ser feita de forma numérica.

Os métodos numéricos de CFD procuram transformar equações diferenciais no domínio contínuo em sistemas de equações algébricas, resolvidas para pontos discretos ao longo do domínio. Os métodos numéricos para escoamentos mais tradicionais são os Método de Diferenças Finitas (MDF), Método de Volumes Finitos (MVF) e Método de Elementos Finitos (MEF), diferindo entre si pela maneira como as variáveis e equações são aproximadas (MALISKA, 2004).

Os problemas de interesse no presente trabalho são modelados pela equação de balanço de massa, Equação. (4.12), e equação de balanço de quantidade de movimento para fluidos incompressíveis, Equação (4.13):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4.12)$$

onde  $\mathbf{u}$  é o vetor velocidade e  $\nabla$  é o operador divergente.

A equação de Navier-Stokes que descreve o escoamento de fluidos incompressíveis e pode ser escrita como:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (4.13)$$

onde  $t$  é o tempo,  $p$  é a pressão cinemática,  $\nu$  é a viscosidade cinemática e  $\mathbf{g}$  é a aceleração gravitacional.

Para que seja possível simular corretamente escoamentos incompressíveis com o método mencionado, deve haver similaridade dinâmica das simulações com os escoamentos reais.

$$\text{Re} = \frac{uD}{\nu} \quad (4.14)$$

O número de Reynolds, Equação (4.14), é útil na explicação da similaridade dinâmica, que significa que escoamentos com mesmo número de Reynolds, mas com diferentes velocidades de escoamento  $u$  e comprimento característico  $D$ , com viscosidades cinemáticas  $\nu$ , possuem a mesma solução e o escoamento pode ser estudado em escalas diferentes, como acontece quando se realiza uma simulação ou um modelo físico é construído.

### 4.3 Método de modelagem da superfície livre – *Volume of fluid*

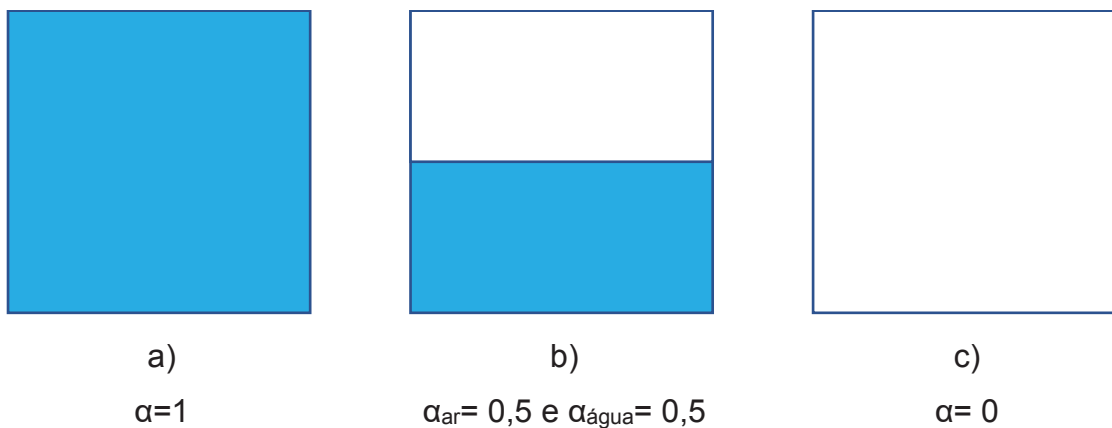
Para resolver as equações de conservação de massa onde existe a interação de dois fluidos, ou seja, um caso multifásico, utilizando o método *Volume of Fluid* (VoF), água e ar, apresentado por Hirt e Nichols (1981), considera-se que os fluidos não se misturam, ou seja, existem 2 fases perfeitamente separadas. Neste modelo, cada fase é tratada em termos de fração volumétrica, onde é medida fração volumétrica da fase do fluido mais denso, considerando que a fase ( $\alpha$ ) de cada fluido

faz parte de um volume de controle de soma 1, sendo que quando uma célula está totalmente preenchida com ar,  $\alpha=0$ , e totalmente água,  $\alpha=1$ , portanto  $0 \leq \alpha \leq 1$ , para cada volume de controle. Em um dispositivo CAO, que está parcialmente submerso em um fluido, há escoamento de ar e água ao longo do domínio, portanto a soma da fração volumétrica de ar e água deve satisfazer a parcela de água mais a parcela de ar:

$$\alpha_{ar} + \alpha_{\acute{a}gua} = 1$$

Na Figura 18 foi representada uma célula em três estágios, a, b e c, de uma simulação VoF, o primeiro estágio a) totalmente cheia ou preenchida com a fase mais densa em uma simulação multifásica, representada pelo quadrado totalmente preenchido de azul, onde  $\alpha=1$ , a fase b) com metade água e metade ar, sendo  $\alpha_{ar}=0,5$  e  $\alpha_{\acute{a}gua}=0,5$  e a fase c) totalmente preenchida com ar, sendo  $\alpha=0$

Figura 18 - Esquema da fração volumetria VoF em uma célula bidimensional



Fonte: Elaborada pelo autor

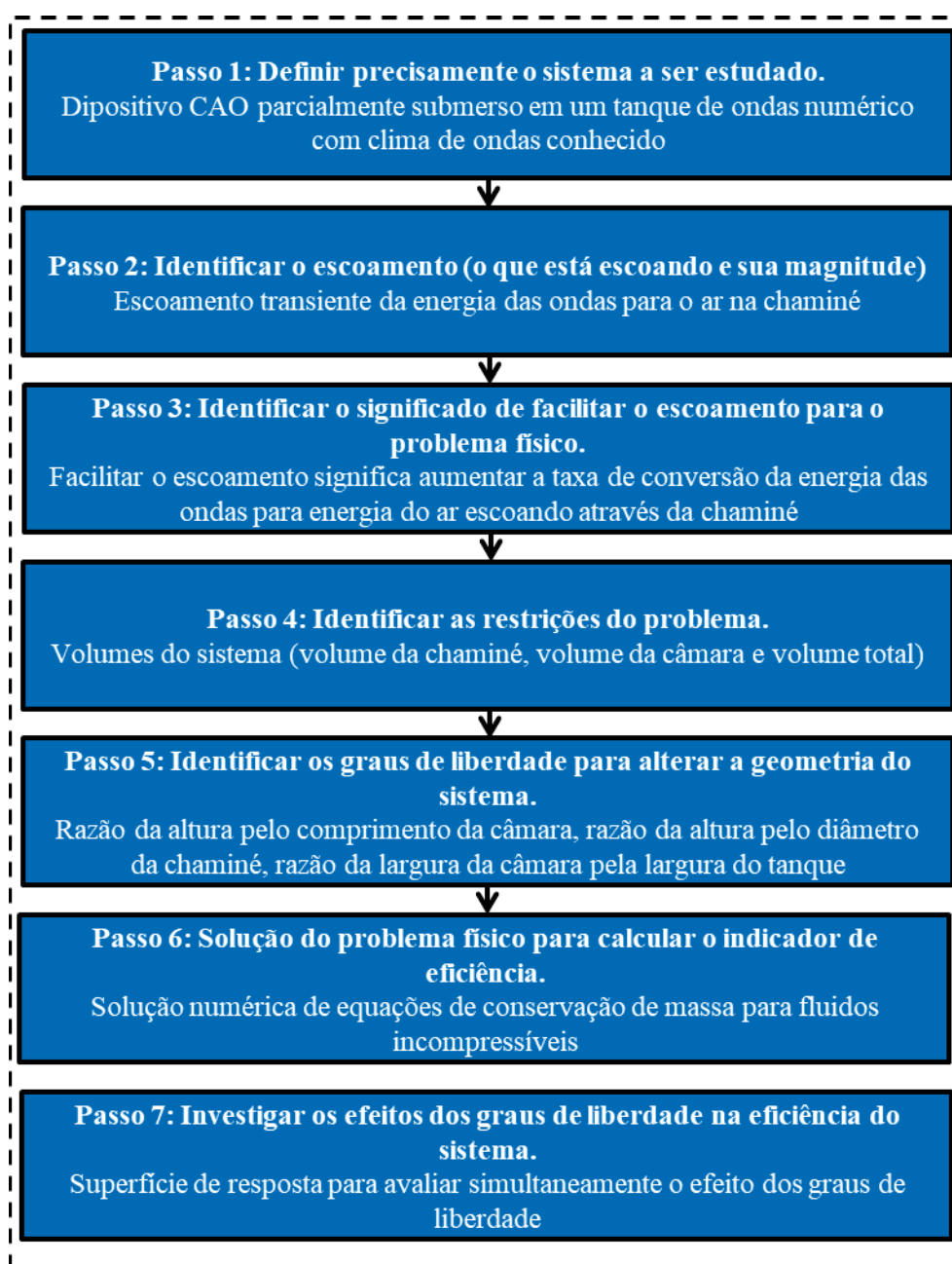
## 5. METODOLOGIA

Para o presente estudo, a metodologia utilizada consiste na aplicação do Design Construtal, conforme Capítulo 2, para a análise de um dispositivo CAO em escala de laboratório, submetido a modificações simultâneas de três e dois graus de liberdade, simulando a potência hidrodinâmica medida na chaminé, em busca da maior eficiência hidrodinâmica.

Conforme o Método Design Construtal descrito por Dutra et al. (2020), a análise do desempenho de dispositivos CAO pode ser realizada em 7 etapas. Na Figura 19 esta metodologia é sumarizada.

O primeiro passo é definir o sistema em análise, que no caso é o dispositivo CAO. O que escoia fisicamente é o ar e a água, mas o propósito do dispositivo é a conversão de energia. O Método Design Construtal leva em conta o propósito dos sistemas que analisa e projeta. Assim, o passo 2, que consiste em identificar o que escoia, tem como conclusão que o que escoia é a energia. O passo 3 consiste em identificar o que significa facilitar o escoamento. No caso, significa facilitar o escoamento da energia das ondas para o gerador. Assim, facilitar o escoamento é permitir que o máximo de energia das ondas possa ser convertido em energia mecânica. O parâmetro de desempenho do sistema, neste caso, é a eficiência, definida como a razão da potência hidropneumática obtida no dispositivo CAO pela potência contida em uma onda. As restrições e graus de liberdade do sistema, identificados nos passos 4 e 5, são os volumes do sistema, e suas razões de aspecto, respectivamente. O passo 6 consiste na solução numérica do escoamento para determinação do parâmetro de desempenho, e o passo 7 na análise do efeito dos graus de liberdade sobre o desempenho do sistema, o que no presente trabalho é realizado utilizando dinâmica dos fluidos computacional e design de experimentos do tipo composto central.

Figura 19 - Fluxograma do Método Design Construtal aplicado ao presente trabalho

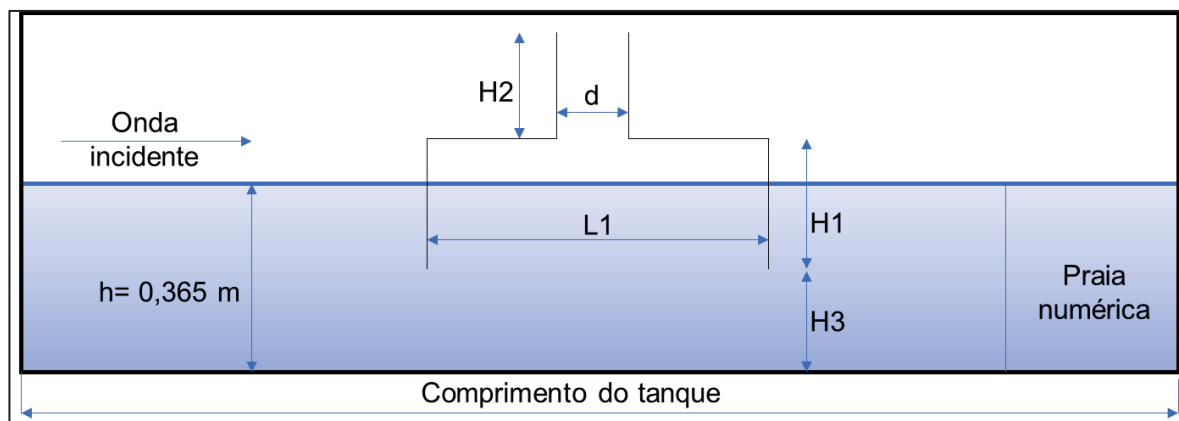


Fonte: Elaborado pelo autor

Com o objetivo de avaliar precisamente o sistema a ser estudado, o esquemático abaixo, representado pela Figura 20, foi criado. Ele representa um tanque de ondas numérico, baseado no canal de onda do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do sul (UFRGS). O canal de onda do IPH possui 1 m de altura, 1 m de largura de 40 m de comprimento, conforme Apêndice A. O tanque de ondas numérico tem seu comprimento correspondente a 5 vezes o comprimento da onda estudada ( $\lambda$ ) respeitando a altura e

comprimento supracitadas. Para utilizar uma onda estável, o tanque foi modelado em uma região correspondente ao final da rampa, conforme detalhe D do Apêndice A.

Figura 20 - Esquemático do domínio computacional criado



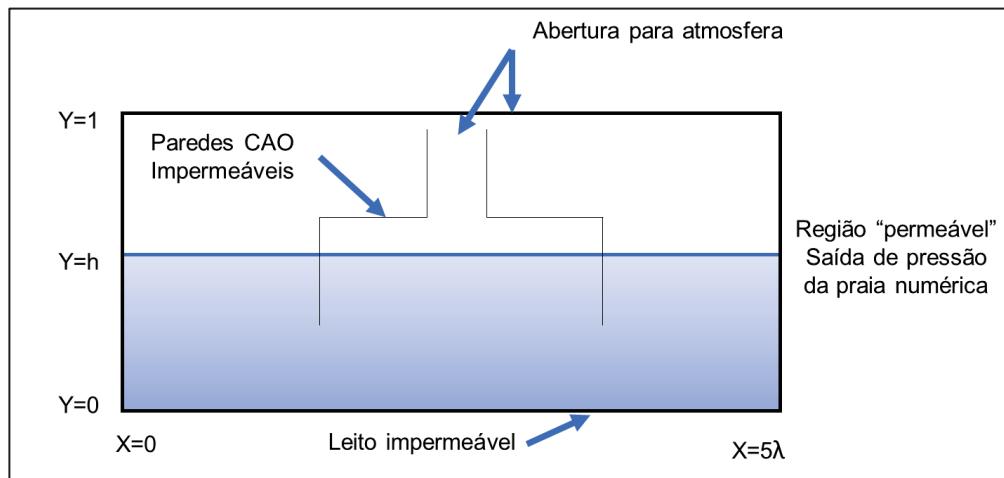
Fonte: Elaborado pelo autor

O comprimento total do tanque de ondas numérico foi limitado em cinco vezes o comprimento da onda estudada, a fim de diminuir a dimensão do domínio computacional e conseqüentemente diminuindo o tempo de cálculo computacional. Algumas características, como a posição do dispositivo CAO no tanque numérico, o comprimento do tanque e o comprimento da praia numérica respeitam algumas orientações, em função do comprimento de onda ( $\lambda$ )

- a) Comprimento do tanque =  $5 \lambda$
- b) Comprimento da praia numérica =  $2 \lambda$
- c) Distância do início do tanque até o início da câmara =  $1,5 \lambda$

Para o correto cálculo da fração volumétrica ocupada por cada uma das fases em cada instante da simulação, é necessário definir a interação de cada uma das paredes na simulação, ou seja, as condições de contorno. No fundo, nas paredes laterais do tanque de ondas e nas paredes do dispositivo CAO, é aplicada condição cinemática de não deslizamento e impermeabilidade. Na Figura 21, onde o esquemático das condições de contorno é apresentado, foram definidas as regiões impermeáveis, permeáveis e as saídas para atmosfera. No Apêndice A foi criada uma representação tridimensional do tanque de ondas do IPH. O tanque de onda numérico é criado a partir da rampa, onde a profundidade do tanque é uniforme.

Figura 21 - Condições de contorno do tanque numérico



Fonte: Elaborada pelo autor

Como o tanque de ondas foi definido em função do comprimento da onda, é necessário definir a região de amortecimento, para diminuir o efeito da refração das ondas. Uma região chamada de praia numérica, com uma característica de amortecimento, também conhecida como "*damping region*", foi atribuída ao tanque de onda numérico, conforme região "praia numérica" da Figura 20. Nos trabalhos de Lisboa, Teixeira e Didier (2017) e Cardozo (2020), os coeficientes de amortecimento, conhecidos como C1 e C2, foram configurados como 20 e 0, respectivamente. Os coeficientes C1 e C2 diminuem a refração da onda no final do tanque, permitindo a medição mais precisa da sua altura. A região da praia numérica, nas equações de conservação de movimento, é um sumidouro S, dado por ANSYS R2 (2019):

$$S = - \left( C_1 \rho V + \frac{1}{2} C_2 \rho |V|V \right) \left( 1 - \frac{y - y_{sl}}{y_b - y_{sl}} \right) \left( \frac{x - x_s}{x_e - x_s} \right)^{1/2} \quad (5.1)$$

Na Tabela 6 são apresentados os métodos de solução utilizados para aproximação das equações algébricas. Esses métodos foram configurados no *solver* do ANSYS R2 2019.

A onda simulada é inicializada com a condição "*Flat*", essa condição no software de simulação compreende que não há movimento na superfície livre no início do tempo físico simulado, ou seja, a água está parada. A condição *Flat* é importante pois mantém a estabilidade dos resultados, convergindo mais rapidamente.

Tabela 6 - Métodos de solução utilizados

Parâmetro	Configuração
Acoplamento pressão-velocidade	PISO
Discretização da pressão	PRESTO!
Quantidade de movimento	<i>Upwind</i> de 2ª ordem
Discretização da fração geométrica	<i>Compressive</i>
Formulação transiente	1ª ordem implícita

Fonte: Elaborado pelo autor

### 5.1 Fator de escalas para a onda de interesse

Conforme o trabalho de Cardozo (2020), para haver possibilidade de reprodução experimental da onda simulada no canal de ondas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS, as características da onda adotada, aplicadas a uma escala de 1:15, foram modificadas utilizando a similaridade de Froude, que representa a razão entre as forças gravitacionais e inerciais. O número de Froude é dado pela Equação (5.2)

$$Fr = \frac{u^2}{gD} \quad (5.2)$$

onde  $u$  é a velocidade do escoamento, que no presente estudo foi calculada conforme a celeridade, representada pela Equação (4.2), e  $D$  é o comprimento característico, representado pelo comprimento característico da onda  $\lambda$ .

Na Tabela 7 encontram-se as características da onda em escala 1:1 e em escala 1:15. As características da onda foram ajustadas, conforme coluna “IPH”, que se refere aos valores que podem ser reproduzidas experimentalmente no canal de ondas do IPH, que possibilita a validação experimental dos resultados obtidos numericamente.



Tabela 7 - Características da onda estudada

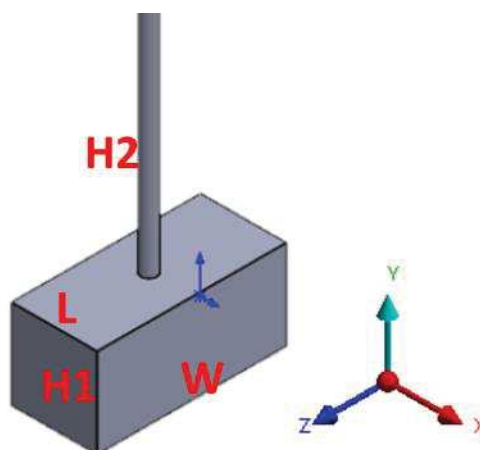
Características	Escala real (1:1)	Escala laboratório (1:15)	IPH (1:15)	Fator de escala
T(s)	7,5	1,940	2,022	$\beta^{1/2}$
H (m)	1,0	0,067	0,073	$\beta$
h (m)	14,0	0,933	0,365	$\beta$
$\lambda$ (m)	73,4	4,890	3,601	$\beta$

Fonte: Cardozo (2020)

## 5.2 Graus de liberdade para o dispositivo CAO

Com base no Design Construtal, que inclui os graus de liberdade e as restrições, as equações que regem as dimensões do dispositivo CAO foram definidas. O dispositivo CAO, representado na Figura 22, é composto por uma câmara retangular, com o comprimento L paralelo ao eixo X e com a altura H1 perpendicular ao solo. A chaminé possui comprimento H2 e diâmetro d e está posicionada exatamente no centro da parede superior da câmara. A largura do dispositivo CAO, representada por W, é paralela a largura do canal de ondas.

Figura 22 - Representação simplificada do dispositivo CAO



Fonte: Elaborada pelo autor

As restrições do problema, mostradas na Figura 19, são: Volume de entrada ( $V_e$ ) e Volume total do sistema ( $V_t$ ). Conforme Gomes (2014), a melhor combinação entre  $V_t$  e  $V_e$  ocorre quando o volume da chaminé corresponde a 10% do volume de entrada, isto é,  $V_t = V_e + 0,1V_e$ . O volume de entrada é calculado conforme a Equação (5.3) e o Volume total é calculado conforme a equação (5.4)

$$V_e = LH_1W \quad (5.3)$$

$$V_t = LH_1W + \left( \frac{\pi d^2 H_2}{4} \right) \quad (5.4)$$

Através das equações (5.3) e (5.4) obtém-se as relações entre L e H1, H2 e d. Essas relações são paramétricas, ou seja, uma dimensão é variada em função da razão entre elas, o que permite manter os volumes constantes.

$$L = \left( \frac{V_e}{\left(\frac{H_1}{L}\right)w} \right)^{1/2} \quad (5.5)$$

$$H_1 = L \left( \frac{H_1}{L} \right) \quad (5.6)$$

$$d = \left( \frac{4(V_t - V_e)}{\pi \left(\frac{H_2}{d}\right)} \right)^{1/3} \quad (5.7)$$

$$H_2 = d \left( \frac{H_2}{d} \right) \quad (5.8)$$

Conforme as orientações de Gomes (2014), os parâmetros iniciais para L, H1, d e H2 são:

$$L = \lambda/2$$

$$H_1 = 2H$$

$$d = 0,14L$$

$$H_2 = 3H_1$$

A partir dos parâmetros da onda, da Tabela 6, e das equações 5.3 e 5.4, o valor de  $V_e$  e  $V_t$  foram calculados, sendo  $V_e \cong 0,16 \text{ m}^3$  e  $V_t \cong 0,18 \text{ m}^3$ . Esses volumes são os parâmetros iniciais para definir as dimensões do dispositivo CAO, conforme as razões  $H_1/L$ ,  $H_2/d$  e  $W/Z$ .

### 5.3 Validação do modelo numérico

Para validar o modelo numérico, o experimento realizado por Cardozo (2020) foi reproduzido, primeiramente realizando a verificação e validação da onda no tanque numérico, desconsiderando o dispositivo CAO, e posteriormente verificando e validando o escoamento bifásico de água e ar através do domínio, avaliando esse escoamento dentro da câmara (GOMES, 2014).

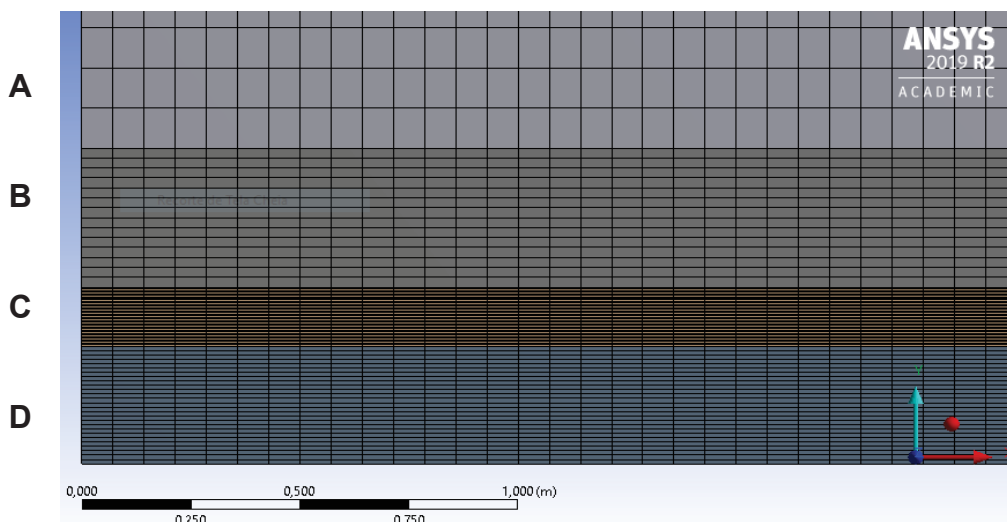
#### 5.3.1 Validação da onda Stokes 2ª ordem e do dispositivo CAO

Para validação do modelo numérico, que representa o tanque de ondas experimental, conforme mostra a Figura 20, as dimensões do tanque variaram conforme o comprimento de onda. A altura do tanque foi calculada a partir da altura da superfície livre ( $h$ ) e a altura da onda ( $H$ ), sendo  $Y = 2H+h$ .

As dimensões da malha foram ajustadas em função do comprimento de onda, conforme Barreiro (2009) e Gomes et al. (2012). Na superfície livre, que é caracterizada pela região onde há interação entre os dois fluidos, água e ar, a altura de cada elemento da malha foi ajustada como  $y(+)=h+H$  e  $y(-)=h-H$ . Na região de superfície livre, a malha deve ter 40 volumes em  $Y$ , sendo 20 para baixo e 20 para cima do nível da água em repouso, esses 40 volumes equivalem a  $H/20$ . Na direção  $X$  e  $Z$ , a dimensão do elemento de malha deverá corresponder a  $\lambda/50$  (LIU, HYUN e HONG, 2011).

Na Figura 23, foi exemplificado o refinamento da malha em 4 regiões no eixo  $Y$ . A região "A" correspondente ao domínio que não sofre influência das ondas, a região "B" que se caracteriza pelo domínio onde encontra-se somente ar, porém pode sofrer influência das ondas, a região "C" é o domínio da superfície livre, onde a oscilação da onda pode ser percebida e medida, por isso a malha é mais refinada, já região "D", apresenta somente água. A malha foi dividida em 4 regiões para que o domínio "A" pudesse ter um elemento de malha mais grosseiro em casos que a chaminé fosse muito longa, aumentando o domínio no eixo  $Y$ , isso possibilita um menor número de elementos de malha em domínios grandes, sem aumentar a incerteza numérica das simulações.

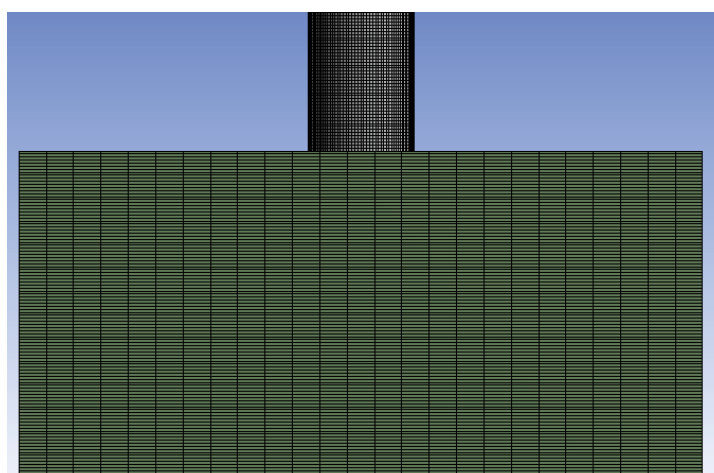
Figura 23 - Regiões da malha do tanque numérico



Fonte: Elaborada pelo autor

A malha da Figura 23 corresponde ao tanque numérico, já o dispositivo CAO teve um refino de malha na chaminé e na câmara hidropneumática. O elemento de malha foi configurado para atender a relação  $H/20$ , correspondente a 0,004 m para a onda incidente no presente estudo. Na Figura 24 representa graficamente o refino da malha na câmara e na chaminé, conforme relação  $H/20$  supracitada. A parede da chaminé foi refinada para que a pressão de saída e a velocidade, variáveis de saída medidas na chaminé, sofressem a menor alteração possível por problemas relacionados à dimensão dos elementos de malha.

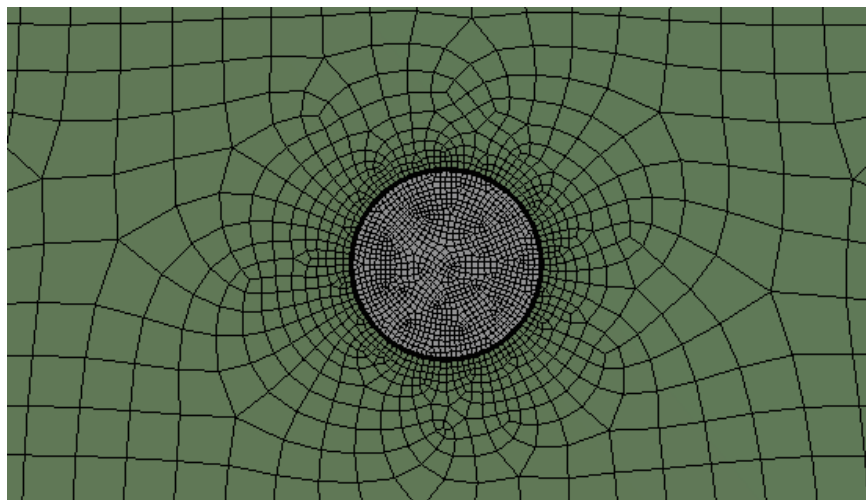
Figura 24 - Malha da câmara e chaminé



Fonte: Elaborada pelo autor

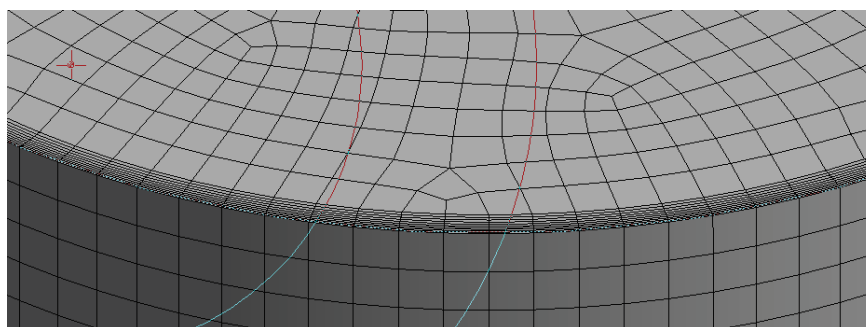
A região de refino na parede da chaminé pode ser observada na Figura 25 e Figura 26.

Figura 25 - Vista de topo do dispositivo CAO



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 - Refino na parede da chaminé



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme realizado em Lisboa, Teixeira e Didier (2017) e Cardozo (2020), o passo de tempo (*time step*), foi determinado através do critério de Courant-Fridrichs-Lewy (CFL), ou número de Courant, que é dado por:

$$CFL = U \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (5.9)$$

onde  $U$  é a velocidade do escoamento, que pode ser substituída pela celeridade, conforme equação (4.2), e  $\Delta x$  é o comprimento do elemento de malha, sendo  $(\Delta x) = \lambda/50$ . Ao reescrever a solução o *time step* é definido pela Equação (5.9).

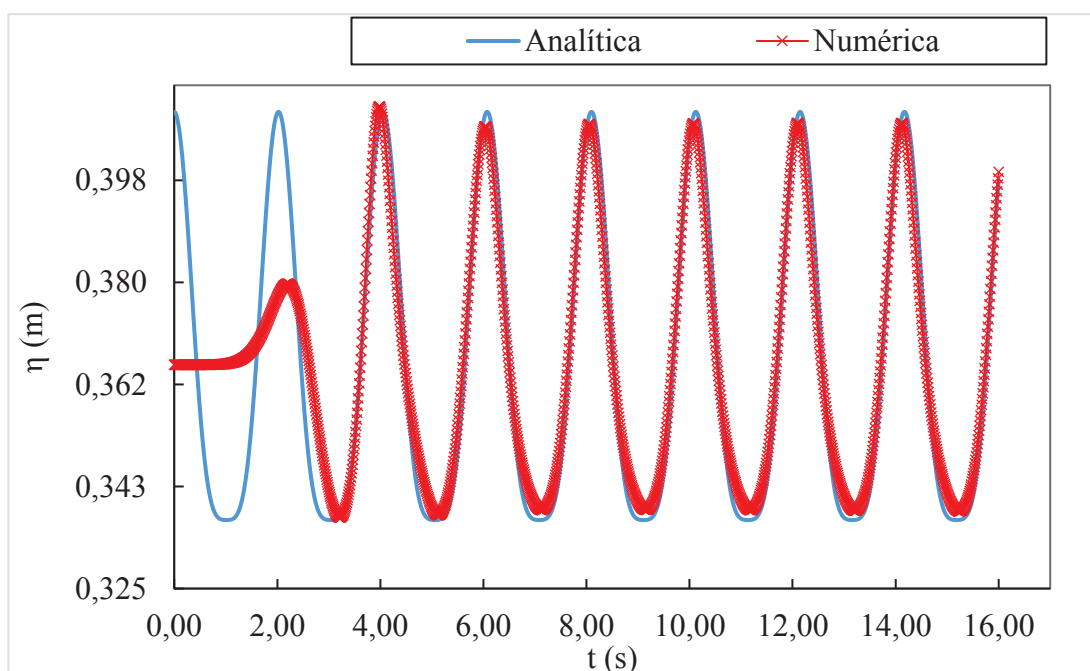
$$\Delta t = CFL \frac{T}{50} \quad (5.10)$$

Com o valor de  $CFL = 0,25$ , indicado de forma automática pelo Fluent, o *time step* adotado foi de 0,01 s. Conforme Ning e Teng (2006), o *time step* máximo de um

problema transiente pode ser calculado como  $T/40$ , valores superiores a esse podem causar problemas de instabilidade na solução numérica. Para uma solução computacional mais rápida poderia ser adotado valores entre  $T/200 < \text{time step} < T/40$ .

Para validar o tanque numérico, os resultados obtidos através da elevação da superfície, calculada pelo Fluent® para cada *time step*, foram comparadas com a elevação da superfície obtida de forma analítica, calculadas pela equação (4.1). As ondas, numérica e analítica, foram sobrepostas, conforme Figura 27, para serem comparadas.

Figura 27 – Verificação da onda. Elevação da superfície numérica em relação à analítica



Fonte: Elaborada pelo autor

A onda numérica, foi verificada comparada com a analítica em um intervalo definido entre  $4 \text{ s} < \Delta t < 16 \text{ s}$ , apresentando diferenças de máximas de  $1,13 \times 10^{-2}$ , correspondendo a aproximadamente 3,24% de diferenças percentual na elevação da superfície, diferença absoluta de  $6,23 \times 10^{-3}$  e 1,74% de diferença relativa, em média.

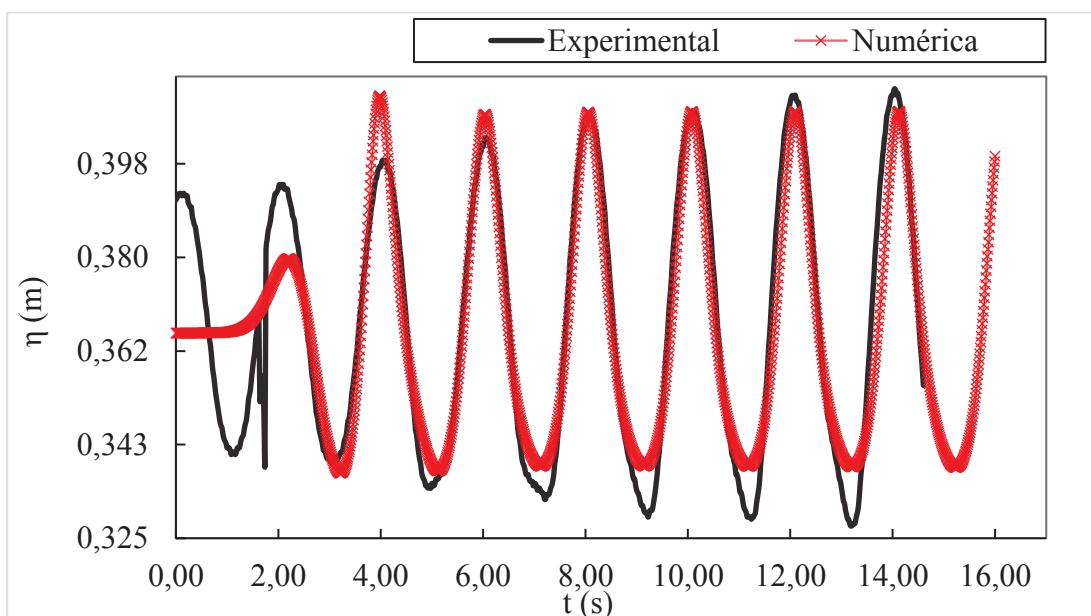
A diferença máxima é corresponde a maior diferença absoluta encontrada entre os resultados numéricos e analíticos, para cada *time step*.

Ao compararmos os valores numéricos com os valores experimentais, obtidos a partir de medições realizadas no IPH, os erros absolutos e experimentais são

maiores, pois existem fenômenos físicos que são simplificados numericamente, porém não podem ser simplificados experimentalmente.

No mesmo intervalo dos testes analíticos,  $4 \text{ s} < \Delta t < 16 \text{ s}$ , os dados experimentais foram comparados com os numéricos para cada intervalo de tempo, etapa chamada de validação da onda numérica. Ao comparar a onda experimental com a onda numérica o erro absoluto médio, que anteriormente chamamos de diferença, pois nessa etapa um dado experimental foi comparado a um numérico, foi de  $1,74 \times 10^{-2}$  e o relativo foi de 4,86%.

Figura 28 – Validação da onda. Elevação da superfície numérica em relação a experimental



Fonte: Elaborado pelo autor

Além da verificação da onda numérica em relação a onda analítica e a validação da elevação da superfície da onda numérica em relação a experimental, a validação do modelo numérico completo, com o dispositivo CAO inserido no tanque de ondas foi realizado no estudo de Cardozo (2020). O presente estudo utilizou as validações realizadas pela autora supracitada. Nas simulações realizadas por Cardozo (2020) foram reproduzidos de forma numérica os experimentos realizados por Ning et al. (2016), utilizando as recomendações de malha de Gomes (2014). Na verificação foi comparada a elevação máxima da superfície livre ( $\eta_{\text{máx}}$ ) no interior do

dispositivo CAO, a pressão máxima ( $|p|_{\max}$ ) na chaminé e a eficiência hidrodinâmica ( $\epsilon$ ), para diferentes períodos e comprimentos de onda. Nos 8 testes realizados, a maior diferença relativa entre os resultados numéricos e experimentais para a elevação máxima  $|\eta|_{\max}$ , pressão  $|p|_{\max}$  e eficiência  $\epsilon$ , conforme Tabela 8, são:

Tabela 8 - Validação de modelo numérico

Característica	Diferença máxima	Diferença média
Elevação ( $\eta$ )	8,03%	4,04%
Potência ( $ p _{\max}$ )	16,53%	7,71%
Eficiência ( $\epsilon$ )	10,32%	6,94%

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Cardozo (2020)

A validação realizada por Cardozo (2020), conforme Tabela 7 supracitada, e a validação realizada presente estudo, conforme Figura 27 e Figura 28, validam o modelo numérico adotado. Sabe-se que existe uma incerteza numérica associada aos valores encontrados, quando comparado com resultados experimentais.

#### 5.4 Incerteza associada à malha - GCI

Conhecer a incerteza dos resultados associada à malha computacional é fundamental para simulações numéricas. Essa incerteza também é conhecida como índice de convergência de malha ou *Grid Convergence Index* (GCI).

O método de obtenção do GCI é caracteriza-se pela realização de, no mínimo, três simulações, com malhas sucessivamente refinadas, e comparação dos resultados obtidos. À medida que a malha é refinada os elementos de malha se tornam menores bem como os erros de discretização espacial e temporal, respectivamente, pois reduz-se o erro de arredondamento associado aos cálculos computacionais (ROCHE, 1994 e ROCHE, 1997).

Conforme Zhou, Kun e Liu (2017), o método para examinar a convergência espacial e temporal das simulações de CFD são baseados no uso da extrapolação de Richardson, e, conforme apontado por Roache (1994), o GCI fornece uma estimativa conservadora do erro em relação à solução exata ou analítica, que é desconhecida. Conforme Soliman (2018), o GCI pode ser calculado conforme a equações a seguir, da (5.11) até (5.16):



$$r_{fg} = \left( \frac{N_f}{N_g} \right)^{\frac{1}{DM}} \quad (5.11)$$

onde na Equação (5.11)  $r_{fg}$  é a razão de refinamento entre as malhas, sendo o subíndice “ $f$ ” para a malha mais refinada e “ $g$ ” para a malha mais grosseira.  $N$  é o número de elementos de malha e  $DM$  é o número de dimensões, portanto, como o problema é tridimensional utiliza-se  $DM=3$ . A partir da Equação (5.11) pode-se calcular a ordem de convergência,  $p$ , e um parâmetro  $q$ , conforme Equação (5.12) para  $p$ :

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} |\ln|\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}| + q(p) \quad (5.12)$$

onde  $q$ , variável para o cálculo de  $p$ , é obtida a partir da Equação (5.13):

$$q(p) = \ln \left( \frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad (5.13)$$

e o valor da variável  $s$  pode ser calculada como:

$$s = 1. \text{sng}(\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}) \quad (5.14)$$

Se o valor de  $s$  for menor que 0, indica que convergência é oscilatória. A partir dos valores obtidos acima calculam os parâmetros de interesse extrapolados através da Equação (5.15):

$$\phi_{\text{ext}}^{21} = (r_{21}^p \phi_1 - \phi_2) / (r_{21}^p - 1) \quad (5.15)$$

Como penúltimo passo antes de calcular o GCI, calcula-se o erro aproximado relativo dado pela Equação (5.16):

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (5.16)$$

e o GCI pode ser calculado conforme Equação (5.17):

$$GCI_{12} = \frac{Fs e_a^{21}}{(r_{21}^p - 1)} \quad (5.17)$$

sendo  $F_s$ , adicionado na equação acima, o fator de segurança, normalmente  $F_s = 1,25$ .

A partir das equações supracitadas, calculou-se o GCI para o modelo estudado, utilizando os resultados obtidos no tempo físico de 10,5 segundos, onde 3 parâmetros de interesse foram utilizados. Os parâmetros de interesse são: a elevação máxima no interior da câmara, a pressão máxima na chaminé e a velocidade do ar na chaminé, paralela ao eixo Y. A incerteza associada à simulação para cada um dos parâmetros de interesse é mostrada na Tabela 9, onde o GCI calculado é menor que 5%, para os três parâmetros.

Tabela 9 - Análise da incerteza associada a malha do modelo estudado

	<b>Número elementos</b>	$\eta_{max}(m)$	$p_{max}(Pa)$	$v_{max}(m.s^{-1})$
N3	206591	0,0220	66,421	2,681
N2	582060	0,0280	75,476	2,629
N1	1454920	0,0284	78,969	2,603
GCI_12		<b>0,189%</b>	<b>4,965%</b>	<b>1,715%</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

## 5.5 Indicadores de desempenho

No presente trabalho, o indicador de desempenho, necessário para aplicação Design Construtal, é a eficiência hidrodinâmica, calculada como a razão entre a Potência hidrodinâmica do dispositivo CAO e a potência da onda incidente.

Conforme Rodrigues (2017), determina-se a energia ou potência disponível nas ondas através da soma da energia cinética com a energia potencial, associada à deformação da superfície livre contra a força da gravidade e velocidade das partículas. A equação da energia total é dada por:

$$E_w = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (5.18)$$

e a energia total transportada por uma onda é:

$$E_t = E_w C_g \quad (5.19)$$

A potência total que atinge um dispositivo CAO retangular de largura “W” pode ser calculada como:

$$P_w = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g \quad (5.20)$$

A potência ou energia transferida por uma onda é diferente para águas rasas, intermediárias e profundas. Para águas intermediárias, que engloba o clima de ondas estudado no presente trabalho, a potência da onda é calculada como:

$$P_w = \frac{1}{8} \rho g H^2 \frac{C_g}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (5.21)$$

Conforme a Equação (5.21), estima-se que uma onda com características informadas na Tabela 6 tenha uma potência de aproximadamente  $P_w = 10,56 \text{ W/m}$ .

O comprimento do dispositivo CAO, paralelo à direção de propagação da onda incidente, é menor que a metade do comprimento de onda  $L = < \left( \frac{\lambda}{2} \right)$ , portanto o comportamento da elevação da superfície livre de água no interior da câmara pode ser tratado como o movimento de um pistão, que se desloca verticalmente ao longo do eixo y. Para uma superfície livre oscilando verticalmente, a equação da potência hidrodinâmica do dispositivo CAO pode ser escrita como:

$$P_h = \frac{1}{T} \sum_t^{t+T} p(t) v_y(t) A \quad (5.22)$$

em que A é a área da chaminé, p(t) é a pressão obtida na metade da altura da chaminé para cada *time step* e  $V_y(t)$  é o componente de velocidade vertical medido no mesmo ponto da pressão para cada *time step*.

Os valores de p e  $V_y$  são calculados para cada *time step* da simulação, o valor de A é constante. A resultante da multiplicação da pressão e velocidade em cada *time step* são multiplicados por A, assim calcula-se a potência hidropneumática. A soma dos valores de pressão hidropneumática equivalente a cada *time step* é dividido pelo

tempo físico (16 segundos) da simulação, resultando na potência hidrodinâmica para o período simulado, que contempla 8 oscilações da onda. O cálculo do indicador de desempenho, que é a Eficiência Hidrodinâmica ( $\varepsilon_h$ ), pode ser escrito como:

$$\varepsilon_h = \frac{P_h}{P_w} \quad (5.23)$$

O valor de  $P_w$  foi adimensionalizado, conforme Tabela 9 presente no Capítulo 6. O cálculo da eficiência hidropneumática desconsidera a turbina ou outros acoplamentos, focando apenas na geometria do dispositivo CAO.

## 5.6 Planejamento de experimentos (DOE)

No processo de investigação e planejamento de experimentos decidir a influência entre as diferentes variáveis nos resultados sem um método estatístico pode levar à realização de experimentos ou testes desnecessários, aumentando o tempo empregado para realização de inúmeras simulações e o custo para o desenvolvimento de um novo produto, quando protótipos ou experimentos físicos são realizados.

O *Design of Experimentes* (DOE) ou planejamento de experimentos, é um método utilizado para definição de quais dados devem ser coletados e em que condições essa coleta deve ser realizada, com o objetivo de atingir a maior precisão estatística no parâmetro de saída, ou resultado, com o menor custo (COLEMAN e MONTEGOMERY, 1993).

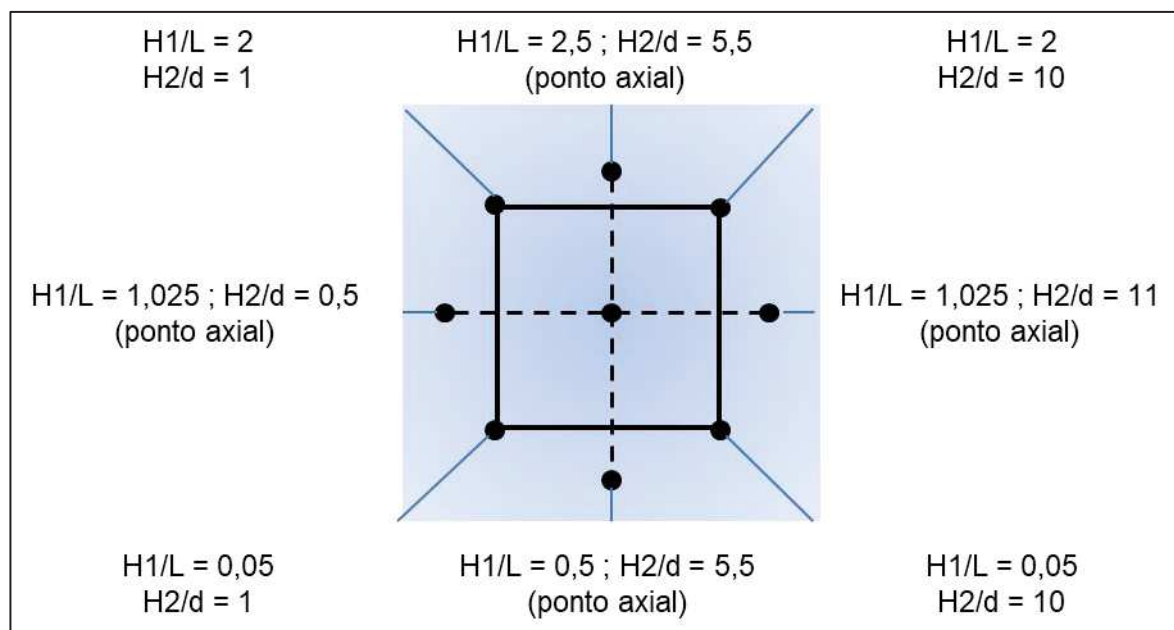
Uma das formas de apresentar resultados de forma gráfica é utilizando uma superfície de resposta, que consiste em fornecer gráficos de contorno, estes mapas ilustram a forma pela qual as variáveis estudadas, que podem ser testadas em diferentes combinações, influenciam a variável resposta escolhida. A partir dos resultados encontrados como parâmetro de saída, uma regressão, que é uma técnica que permite explorar a relação de uma variável dependente, que é a variável de resposta, com variáveis independentes específicas, que são as variáveis exploradas, ou graus de liberdade, como tratado no presente trabalho, é realizada.

A análise da regressão pode ser usada como um método descritivo da análise de dados e a partir da regressão uma equação matemática, que descreva a relação entre duas ou mais variáveis e o parâmetro de saída ou de interesse, uma relação pode ser estabelecida, isso permite que resultados obtidos através de um método numérico possam ser traduzidos em uma equação que rege esses resultados (BAS e BOYAC, 2007).

No presente trabalho, para determinação da superfície de resposta, foi utilizado o Design Composto Central. Esse tipo de planejamento, exemplificado no esquemático da Figura 29, mais comumente utilizado, pode ajustar a curva da superfície de resposta em um modelo quadrático completo, a partir da definição dos valores iniciais, máximos e mínimos. Eles são frequentemente usados quando o planejamento dos experimentos exige que sejam realizados de forma sequencial. Os experimentos planejados do tipo Composto Central são um projeto fatorial ou fatorial fracionário com pontos centrais, aumentados com um grupo de pontos axiais (também chamados de pontos estrela) que permitem estimar a curvatura.

Um projeto fatorial ou experimento fatorial, é aquele que permite analisar a influência de um ou mais fatores no parâmetro de resposta, ou seja, no presente trabalho esses fatores são os graus de liberdade e o parâmetro de resposta é a eficiência do dispositivo CAO.

Figura 29 - Esquemático de experimento planejados do tipo Composto Central



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 29 acima, os valores “ponto axial”, paralelos ao eixo tracejado, são calculados a partir dos valores máximos e mínimos definidos. A escolha dos pontos, utilizados como parâmetros máximos e mínimos no planejamento dos experimentos, baseou-se no comprimento da onda, para  $H1/L$ , em que a menor razão aceita foi de 0,05, forçando o valor de  $L \leq \lambda/2$ , limitando  $H1/L_{\text{máx}} = 2$ . O valor mínimo de  $H2/d = 1$ , em que  $H2 = d$  e o  $H2/d_{\text{máx}}$  foi definido, e posteriormente fixado, em 10, conforme

seção 6.2 do presente trabalho. Os valores de  $W/Z$  foram definidos de  $W/Z = 0,5$ , correspondendo a 50% da largura total do tanque, até  $W/Z = 0,95$ , correspondendo a 95% da largura total do tanque.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos estudos realizados, para investigação do *design* do dispositivo CAO de melhor eficiência, as características da onda simulada referem-se a um clima de ondas apresentado por Lisboa, Teixeira e Fortes (2017) e Cardozo (2020), para uma cidade do litoral do Rio Grande do Sul. As características das ondas aplicadas à similaridade de Froude, conforme Equação (5.1), apresentada no capítulo 5, possibilitam escalar essas características, a fim de diminuir o domínio computacional e facilitar as simulações computacionais. As características da onda estudada são informadas na Tabela 6.

Para a onda com características da Tabela 6, estima-se que a densidade de potência da onda, calculada conforme a equação (5.20) é de aproximadamente 10,56 W/m. Como o valor calculado pela equação (6.4) é por metro de frente de onda, para os estudos posteriores, onde o dispositivo CAO tem a razão  $W/Z$  igual 0,85, 0,90 e 0,95, no eixo Z, paralelo a largura do tanque de ondas, entende-se que a potência máxima que pode ser extraída da onda é  $P_{\max} = P_w W$ , onde  $W$  é a largura do dispositivo CAO, logo a potência máxima que pode ser extraída é dada pela Tabela 10.

Tabela 10 - Potência máxima em função da largura do dispositivo CAO

W (m)	$P_w$ máx (W/m)	$P_w$ (W)
0,85	10,56	8,98
0,90	10,56	9,50
0,95	10,56	10,32

Fonte: Elaborada pelo autor

### 6.1 Resultados preliminares do modelo teórico

Para avaliar a melhor configuração do dispositivo CAO, utilizando o método Design Construtal, foram executadas 5 simulações utilizando o *Design of Experiments* (DOE) do software Ansys® *Design Explorer* 2019 R2, no qual o método *Sparse Grid index initialization* foi utilizado, e 5 combinações dos parâmetros  $H1/L$  e  $H2/d$  foram sugeridas. Com base nos resultados das 5 simulações e a partir de uma regressão quadrática, determinou-se a equação que rege a superfície de resposta e seu ponto crítico, que que é o ponto de maior eficiência.

Com base nos valores atribuídos às razões  $H1/L$  e  $H2/d$  foram calculadas a  $P_h$  e a  $\varepsilon_h$ , para  $W/Z = 0,90$ , conforme resultados apresentados na Tabela 11.

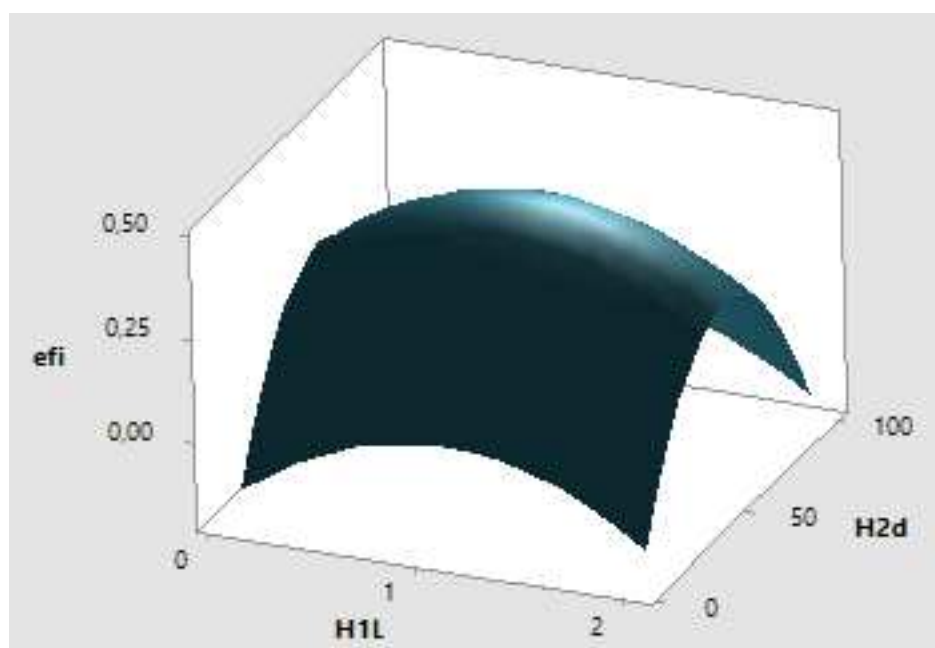
Tabela 11 - Potência e eficiência para  $W/Z= 0,90$ 

W/Z	H1/L	H2/d	H1 (m)	L (m)	H2 (m)	d (m)	Ph (w)	$\epsilon_h$ (%)	Teste
<b>0,90</b>	1,025	55,000	0,4126	0,4025	4,058	0,0738	4,45	43,24%	1
<b>0,90</b>	0,050	55,000	0,0911	1,8225	4,058	0,0738	2,56	24,91%	2
<b>0,90</b>	2,000	55,000	0,5763	0,2882	4,058	0,0738	2,68	26,05%	3
<b>0,90</b>	1,025	10,000	0,4126	0,4025	1,303	0,1303	0,31	3,02%	4
<b>0,90</b>	1,025	100,000	0,4126	0,4025	6,046	0,0605	5,19	51,67%	5

Fonte: Elaborado pelo autor

Para os pontos calculados, conforme resultados apresentados na Tabela 10, foi plotada uma superfície de resposta (SR), representada na Figura 30. Essa SR tem como objetivo identificar graficamente o ponto de maior eficiência para as simulações realizadas, a partir dela pode-se extrair a equação que representa sua curva. A equação analítica originada da SR permite calcular a eficiência para qualquer combinação das razões H1/L e H2/d de forma analítica.

Figura 30 - Superfície de resposta para dois graus de liberdade com  $W/Z=0,9$



Fonte: Elaborada pelo autor

A Equação (6.1), que representa de forma analítica o comportamento da curva da Figura 30, originada a partir da regressão quadrática. A regressão quadrática, que originou a equação analítica, só foi viabilizada pois as combinações das razões simuladas foram geradas a partir de um planejamento de experimentos (DOE),



permitindo que os o comportamento da curva pudesse ser previsto, de forma estatística.

$$\varepsilon_{h\text{-analítica}} = -0,3736 + 0,3888H1L + 0,02220H2d - 0,1868H1L^2 - 0,000204H2d^2 \quad (6.1)$$

Na Equação (6.1) H1L é a razão H1/L, H2d é a razão H2/d. Na Equação (6.1) o ajuste R<sup>2</sup> foi de 100%, indicando um ajuste ótimo para os casos simulados.

A partir da Equação (6.1) definiu-se analiticamente a configuração ótima do dispositivo, para as razões simuladas. A melhor combinação para H1/L e H2/d obtém-se quando:

$$H1/L = 1,0448 \sim 1,05$$

$$H2/d = 54,5455 \sim 54,55$$

Nas configurações otimizadas para a máxima eficiência, as dimensões do dispositivo CAO, em metros, que promovem maior eficiência, mantendo a largura fixa, são representadas na Tabela 12

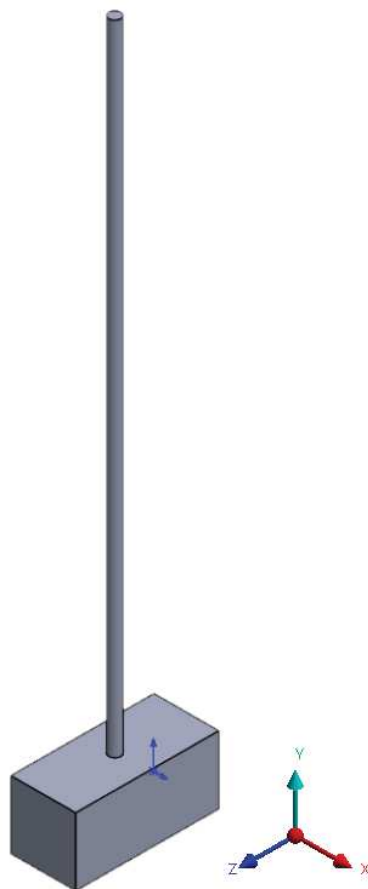
Tabela 12 - Configurações ótimas para o dispositivo CAO

<b>W/Z</b>	<b>H1/L</b>	<b>H2/d</b>	<b>H1</b>	<b>L</b>	<b>H2</b>	<b>d</b>	<b><math>\varepsilon_h</math> %</b>
<b>0,9</b>	1,050	54,550	0,4290	0,4086	4,036	0,074	43,25 %

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 31, que representa a geometria final do dispositivo CAO otimizado, de acordo com a Equação (6.1), mostra que os melhores resultados são gerados quando a altura da chaminé é muito maior que o diâmetro, nesse caso, 55 vezes o valor do diâmetro.

Figura 31 - Dispositivo CAO em proporcional as dimensões ótimas



Fonte: Elaborada pelo autor

Essa combinação mostra que, caso um dispositivo CAO fosse construído respeitando essas configurações, ele deveria ter uma chaminé com 4,036 metros de altura, a câmara deve ter 0,41 m de comprimento e 0,43 m de altura em uma escala de laboratório 1:15. Se esse dispositivo fosse construído em escala real, ou 1:1, teria que ter uma chaminé com aproximadamente 60 m de altura, uma câmara com 6 m de comprimento e 6,5 m de altura. Os valores acima, obtidos através do Design Construtal, provam que os valores mínimos e máximos para os graus de liberdade precisam ser definidos a partir de uma nova restrição, que é a possibilidade de construção ou fabricação do dispositivo, tanto em escala de 1:15 como sua construção em escala 1:1.

Os mesmos pontos simulados para construção da SR representada pela Figura 29 foram simulados novamente alterando o valor de  $W/Z$ , para 0,85 e 0,95, conforme Tabela 13 e Tabela 14. Na Tabela 13, que corresponde aos resultados das simulações realizada para  $W/Z=0,85$ , mantendo as relações de  $H1/L$  e  $H2/d$  das simulações

anteriores, o valor da  $\varepsilon_h$  é menor para os mesmos pontos simulados anteriormente, isso mostra que quanto maior a razão  $W/Z$  maior a potência de onda que pode ser extraída.

Tabela 13 - Potência e eficiência para  $W/Z= 0,85$

<b>W/Z</b>	<b>H1/L</b>	<b>H2/d</b>	<b>H1 (m)</b>	<b>L (m)</b>	<b>H2 (m)</b>	<b>d (m)</b>	<b>Ph (W)</b>	<b><math>\varepsilon_h</math> (%)</b>	<b>Teste</b>
<b>0,85</b>	1,025	55,000	0,4239	0,4136	4,058	0,0738	3,21	32,99%	1
<b>0,85</b>	0,050	55,000	0,0936	1,8725	4,058	0,0738	3,18	32,01%	2
<b>0,85</b>	2,000	55,000	0,5921	0,2961	4,058	0,0738	2,91	29,54%	3
<b>0,85</b>	1,025	10,000	0,4239	0,4136	1,303	0,1303	0,48	4,43%	4
<b>0,85</b>	1,025	100,000	0,4239	0,4136	6,046	0,0605	4,37	42,33%	5

Fonte: Elaborado pelo autor

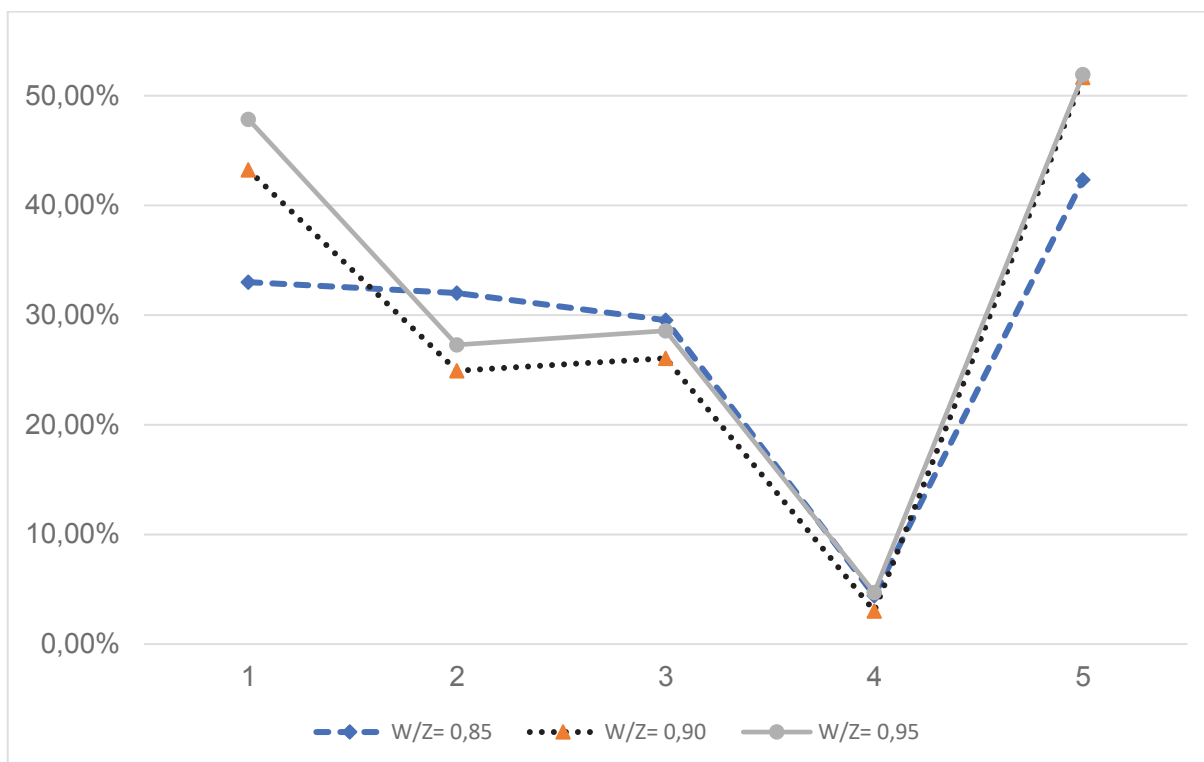
Na Tabela 14 os resultados para  $W/Z=0,95$  são apresentados, e os valores da eficiência para os pontos simulados são maiores em comparação com os resultados de  $W/Z=0,85$  e  $W/Z=0,90$ . Esses resultados corroboram com a teoria de que quando maior a razão  $W/Z$ , limitando-se a 1, maior a potência de onda que pode ser extraída.

Tabela 14 - Potência e eficiência para  $W/Z= 0,95$

<b>W/Z</b>	<b>H1/L</b>	<b>H2/d</b>	<b>H1 (m)</b>	<b>L (m)</b>	<b>H2 (m)</b>	<b>d (m)</b>	<b>Ph (W)</b>	<b><math>\varepsilon_h</math> (%)</b>	<b>Teste</b>
<b>0,95</b>	1,025	55,000	0,4126	0,4025	4,058	0,0738	5,07	47,86%	1
<b>0,95</b>	0,050	55,000	0,0911	1,8225	4,058	0,0738	2,76	27,28%	2
<b>0,95</b>	2,000	55,000	0,5763	0,2882	4,058	0,0738	2,85	28,58%	3
<b>0,95</b>	1,025	10,000	0,4126	0,4025	1,303	0,1303	0,52	4,71%	4
<b>0,95</b>	1,025	100,000	0,4126	0,4025	6,046	0,0605	5,23	51,92%	5

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme resultados apresentados nas tabelas 11, 13 e 14, foram projetadas a  $\varepsilon_h$  dos dispositivos CAO para os 3 valores distintos de  $W/Z$ . No eixo X do gráfico tem-se os pontos simulados e no eixo Y a eficiência hidropneumática.

Figura 32 - Projeções das eficiência para  $W/Z=0,85$ ,  $W/Z= 0,90$  e  $W/Z 0,95$ 

Fonte: Elaborada pelo autor

Na projeções da

Figura 32 observa-se a  $\varepsilon_h$  tem valores semelhantes ao variar apenas o valor de  $W/Z$ , comportamento que pode ser verificado nas tabelas 11, 13 e 14. O comportamento reportado no gráfico da figura supracitada indica que o resultado obtido para a eficiência hidropneumática, ao variar apenas um grau de liberdade ( $W/Z$ ), mantendo as proporções de  $H1/L$  e  $H2/d$ , está correto, pois apresenta o mesmo comportamento.

## 6.2 Simulações para modelo numérico em proporções fabricáveis

A partir dos resultados preliminares apresentados na seção 6.1, na qual as dimensões resultantes da combinação das razões  $H1/L$  e  $H2/d$  foram consideradas tecnicamente inviáveis de serem fabricadas, os limites mínimos e máximos das razões de  $H1/L$  e  $H2/d$  foram ajustadas no planejamento de experimentos para serem

variadas de forma controlada, em um intervalo que possibilitasse a construção de um protótipo a partir para a melhor combinação entre as variáveis.

Para entender o efeito de uma terceira variável, resultando em três graus de liberdade, e criar uma superfície de resposta, o valor de W/Z foi variado junto com as razões H1/L e H2/d. Essa estratégia possibilita simular pontos estratégicos, e através do DOE definir de forma controlada os pontos a serem simulados.

No DOE a razão W/Z foi configurada de 0,5 até 0,95, sendo que a razão máxima é um para W/Z. Para os valores de H1/L os valores, mínimo e máximo, foram definidos como 0,05 e 2, respectivamente, pois nas simulações anteriores o melhores resultados foram encontrados com H1/L menor que 2. Os valores de H2/d foram variados entre 1 e 10, conforme restrição adotada para valores fabricáveis. As simulações realizadas mostram que a  $\varepsilon_h$  do dispositivo CAO aumenta conforme razão H2/d aumenta.

A partir das restrições adotadas, 15 pontos de simulação foram determinados utilizando um planejamento compósito central (REF), conforme Tabela 15, obtendo o pior resultado para o ponto 1 e o melhor resultado para o ponto 14, sendo a  $\varepsilon_h$  do dispositivo CAO foi de 0,11% a 7,77%, para o pior e melhor caso, respectivamente. Esses resultados, que contemplam a eficiência utilizando três graus de liberdade, podem ser de difícil interpretação, e avaliar o efeito de um dos três parâmetros no aumento ou baixa da  $\varepsilon_h$  pode levar a interpretações erradas.

Na Tabela 15, o teste 14, que se caracteriza pela maior  $\varepsilon_h$  encontrada na série de simulações realizadas, mostra o efeito de W/Z na  $\varepsilon_h$ , ou seja, quando maior W/Z maior a  $\varepsilon_h$ . A razão H1/L, que proporciona aumento da  $\varepsilon_h$  é pequena, ou seja, H1 é muito menor que L. Essas características permitem que o formato final do dispositivo CAO, que apresenta a melhor eficiência, possa ser encontrado e que as razões entre as características possam ser refinadas.

Ao adicionar um terceiro grau de liberdade no DOE, simular os 14 pontos sugeridos, ao tentar gerar a SR e regressão quadrática, que gera a equação analítica da curva, o erro residual, ou erro padrão da estimativa, ficou elevado, indicando uma incerteza na equação calculada, invalidando a utilização da regressão quadrática para determinar a equação analítica quando uma terceira variável é adicionada.

Tabela 15 - Resultados simulados para características geometrias fabricáveis para o dispositivo CAO

W/Z	H1/L	H2/d	H1	L	H2	d	Ph (w)	$\varepsilon_h$ (%)	Teste
0,725	1,025	1,000	0,472	0,461	0,281	0,281	0,011	0,11%	1
0,863	0,428	2,744	0,280	0,654	0,550	0,200	0,152	1,48%	2
0,587	1,622	2,744	0,660	0,407	0,550	0,200	0,021	0,20%	3
0,587	0,428	2,744	0,339	0,792	0,550	0,200	0,084	0,82%	4
0,863	1,622	2,744	0,545	0,336	0,550	0,200	0,034	0,33%	5
0,725	1,025	5,500	0,472	0,461	0,874	0,159	0,153	1,48%	6
0,725	2,000	5,500	0,660	0,330	0,874	0,159	0,066	0,64%	7
0,725	0,050	5,500	0,104	2,086	0,874	0,159	0,583	5,67%	8
0,950	1,025	5,500	0,413	0,403	0,874	0,159	0,211	2,05%	9
0,500	1,025	5,500	0,569	0,555	0,874	0,159	0,082	0,79%	10
0,863	1,622	8,256	0,545	0,336	1,146	0,139	0,194	1,88%	11
0,587	0,428	8,256	0,339	0,792	1,146	0,139	0,456	4,43%	12
0,587	1,622	8,256	0,660	0,407	1,146	0,139	0,127	1,24%	13
0,863	0,428	8,256	0,280	0,654	1,146	0,139	0,800	7,77%	14
0,725	1,025	10,000	0,472	0,461	1,303	0,130	0,352	3,42%	15

Fonte: elaborada pelo autor

Conforme dados da Tabela 15, Tabela 11, Tabela 13 e Tabela 14, a  $\varepsilon_h$  dispositivo CAO aumenta conforme a razão H2/d aumenta, porém o valor de H2, que é a altura da chaminé fica desproporcionalmente grande quando a razão H2/d é maior que 10.

Ao fixar o valor de razão H2/d em 10 e manter o intervalo já utilizado para W/Z e H1/L, 09 novos pontos foram simulados, com base no DOE. A partir  $\varepsilon_h$  do dispositivo CAO calculada para os pontos sugeridos, foi definida a equação analítica que rege o comportamento da SR, e a partir da equação analítica, para qualquer valor de W/Z e H1/L, a  $\varepsilon_h$  dispositivo CAO pode ser estimada analiticamente, sem a necessidade de realizar novas simulações computacionais.

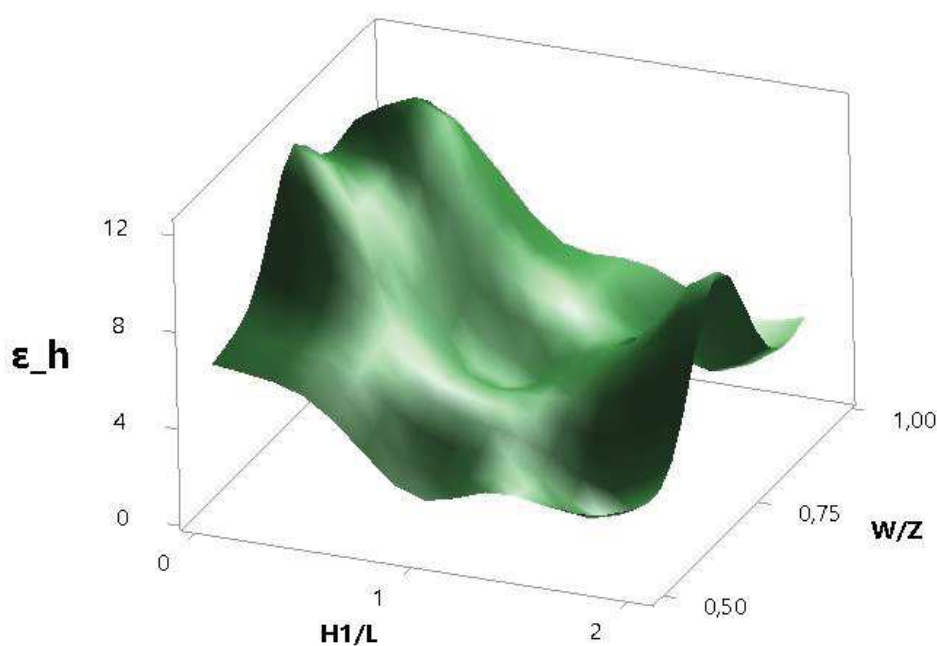
Tabela 16 - Resultados simulados para características geometrias fabricáveis para o dispositivo CAO com valor de  $H2/d = 10$

W/Z	H1/L	H2/d	H1	L	H2	d	Ph (w)	$\epsilon_h$ (%)	Teste
0,725	1,025	10	0,472	0,461	1,303	0,130	0,353	3,44%	1
0,566	1,714	10	0,691	0,403	1,303	0,130	0,152	1,48%	2
0,950	1,025	10	0,413	0,403	1,303	0,130	0,555	5,40%	3
0,884	1,714	10	0,553	0,323	1,303	0,130	0,262	2,55%	4
0,500	1,025	10	0,569	0,555	1,303	0,130	0,223	2,16%	5
0,884	0,336	10	0,245	0,729	1,303	0,130	1,225	11,90%	6
0,725	0,050	10	0,104	2,086	1,303	0,130	1,240	12,05%	7
0,566	0,336	10	0,306	0,911	1,303	0,130	0,664	6,46%	8
0,725	2,000	10	0,660	0,330	1,303	0,130	0,982	9,55%	9

Fonte: Elaborada pelo autor

Conforme procedimento realizado na seção 6.1 para os dados da Tabela 11, o mesmo procedimento foi realizado para os dados da Tabela 15, e uma SR foi criada para a  $\epsilon_h$  em função de  $H1/L$  e  $H2/d$ , a partir da equação da SR o ponto crítico da equação, que representa o maior valor para  $\epsilon_h$ , foi extraído. O valor do ponto crítico representa a melhor combinação entre  $W/Z$  e  $H1/L$  entre os pontos simulados.

Figura 33 - Superfície de resposta para dois graus de liberdade e  $H2/d=10$



Fonte: Elaborada pelo autor

A curva apresentada na Figura 33, que representa graficamente as simulações realizadas entre os intervalos definidos para as razões de H1/L e W/Z. O R<sup>2</sup> do ajuste da Equação (6.2) foi igual a 85%, indicando que a combinação dos valores simulados pode não captar o comportamento correto da SR para as combinações entre os graus de liberdade que foram simulados. A partir dos resultados, caracterizado pelo campo “ $\varepsilon_h$  %” da Tabela 16, definiu-se a Equação (6.2), que representa matematicamente a SR, e através do mesmo processo estatístico, utilizando uma regressão quadrática, o ponto crítico ou máximo da curva, que representa a maior eficiência, foi definido.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{h-analítica} = & -5 + 33,4WZ - 10,06H1L - 10W^2 + 6,85H1L^2 \\ & - 9,96W \times H1L \end{aligned} \quad (6.2)$$

Os resultados indicam que o ponto máximo se encontra quando o valor de H1/L atinge o limite inferior estabelecido e W/Z atinge o limite superior estabelecido, resultando em  $\varepsilon_h = 16,74\%$ .

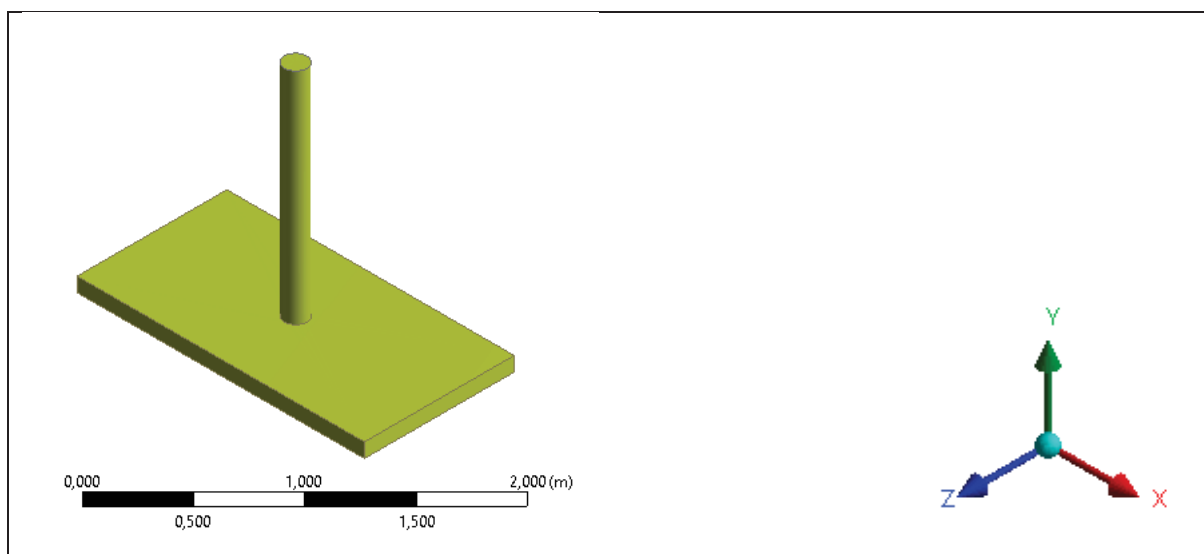
H1/L= 0,05

W/Z= 0,95

Com os valores acima o dispositivo CAO com a razão W/Z= 0,95, onde a largura W corresponde a 95% da largura do tanque numérico simulado, Z, e a altura (H1) é muito menor que o comprimento L, correspondendo a 5% de L. Na Figura 34 o dispositivo CAO foi representado para os melhor combinação entre as razões, que proporciona a maior  $\varepsilon_h$ .



Figura 34 - Vista isométrica do dispositivo CAO ideal conforme equação 6.2



Fonte: Elaborada pelo autor

Para obter uma SR fidedigna a variação das razões  $H1/L$  e  $W/Z$ , pois conforme resultados obtidos a partir da Equação (6.2) existe uma erro associado de 15%, os limites inferiores e superiores foram modificados para  $0,05 \leq H1/L \leq 1$  e  $0,7 \leq W/Z \leq 0,95$ , isso faz com que o comportamento da curva possa ser refinado na região de interesse, que é próxima aos valores atribuídos as razões acima. Com base nos novos limites novos pontos foram simulados. Os resultados para a  $\varepsilon_h$  dos novos pontos simulados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados simulados para características geometrias fabricáveis para  $0,05 \leq H1/L \leq 1$  e  $0,7 \leq W/Z \leq 0,95$  e valor de  $H2/d = 10$

W/Z	H1/L	H2/d	H1	L	H2	d	Ph (w)	$\varepsilon_h$ (%)	Teste
0,825	0,050	10	0,098	1,956	1,303	0,130	0,353	16,00 %	1
0,825	0,525	10	0,317	0,604	1,303	0,130	0,152	8,36 %	2
0,737	0,189	10	0,201	1,064	1,303	0,130	0,555	13,32 %	3
0,913	0,189	10	0,181	0,956	1,303	0,130	0,262	16,16 %	4
0,700	0,525	10	0,344	0,655	1,303	0,130	0,223	6,41 %	5
0,950	0,525	10	0,295	0,562	1,303	0,130	1,225	9,01 %	6
0,825	1,000	10	0,437	0,437	1,303	0,130	1,240	4,27 %	7
0,737	0,861	10	0,429	0,499	1,303	0,130	0,664	4,13 %	8
0,913	0,861	10	0,385	0,448	1,303	0,130	0,982	5,62 %	9

Fonte: Elaborada pelo autor.

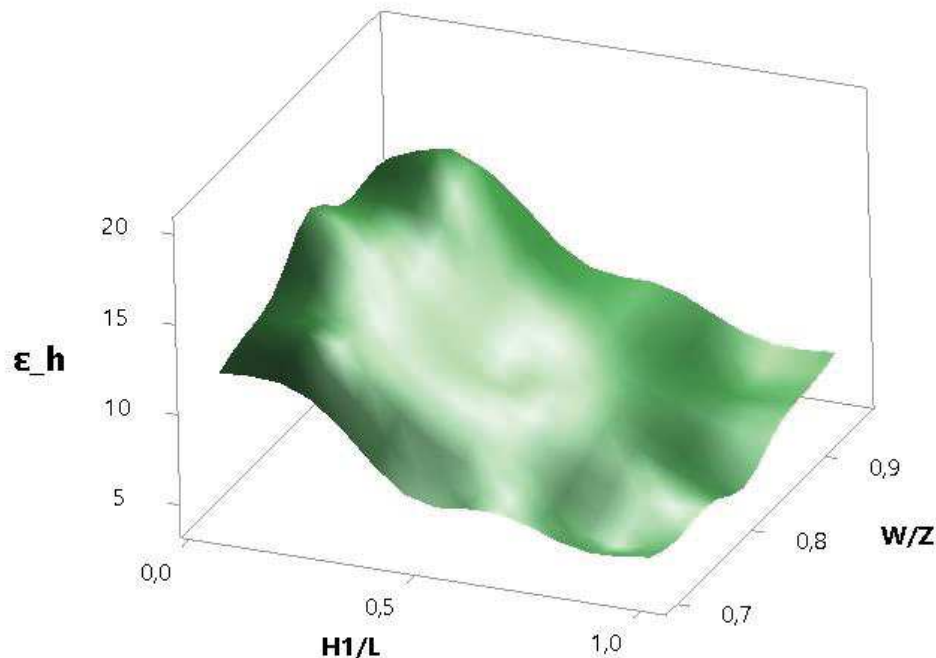
Conforme resultados da tabela supracitada, uma nova SR foi criada, representada pela Figura 35 abaixo. A Equação (6.3), associada a SR da Figura 35,

tem o  $R^2$  de ajuste igual a 98,46%, indicando que a equação abaixo prevê com uma boa exatidão a variação das razões  $W/Z$  e  $H1/L$ , dentro do intervalo definido.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{h\text{-analítica}} = & -5,1 + 39,2WZ - 14,46H1L - 13,3W^2 + 9,83H1L^2 \\ & - 14,4W \times H1L \end{aligned} \quad (6.3)$$

Como resultado para a equação analítica acima, o ponto máximo encontra-se em  $W/Z$  (0,95) e  $H1/L$  (0,05), obtendo uma eficiência teórica de  $\varepsilon_h = 18,90\%$ .

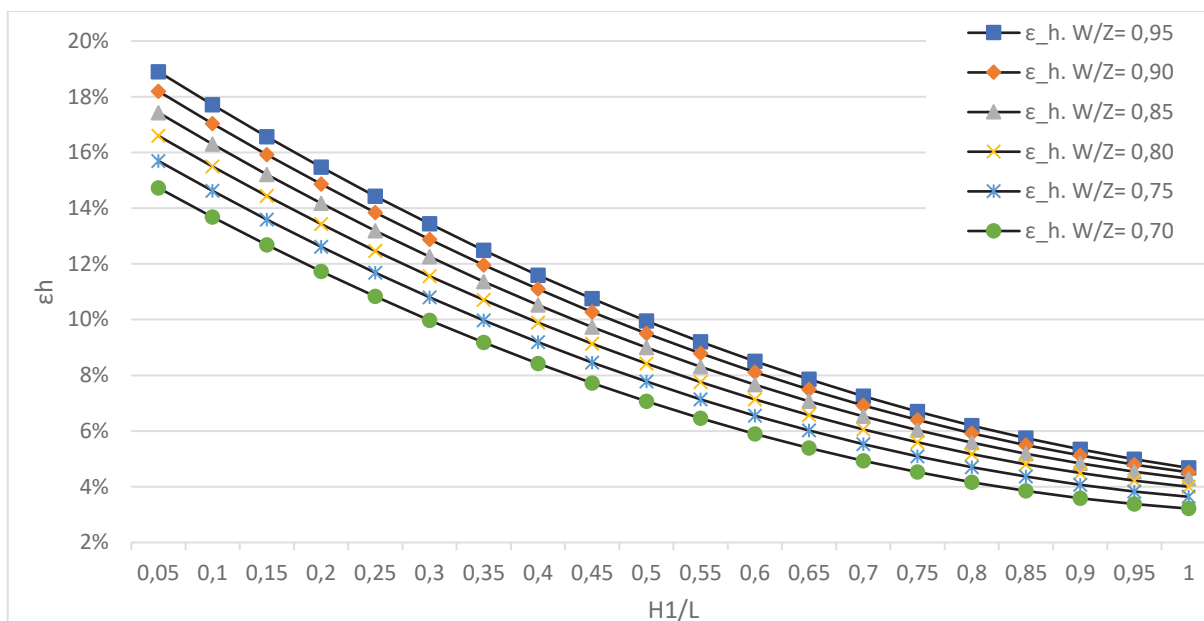
Figura 35 - Superfície de resposta para dois graus de liberdade ( $0,05 \leq H1/L \leq 1$  e  $0,7 \leq W/Z \leq 0,95$ ) e  $H2/d=10$



Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados mostram que a razão  $H1/L$  apresenta forte efeito para eficiência do dispositivo. Ao traçar a curva da  $\varepsilon_h$ , representada pela Figura 36, utilizando a Equação (6.3), observa-se que quanto menor o valor de  $H1/L$  maior o efeito do valor de  $W/Z$  para a  $\varepsilon_h$  do dispositivo, variando 4% quando  $H1/L$  é igual a 0,05 e  $W/Z$  varia de 0,95 e 0,70, para o melhor e pior resultado, em função de  $W/Z$ , respectivamente.

Ao realizar a simulação computacional para validar o resultado analítico calculado a partir da Equação (6.3), a  $\varepsilon_h$  simulada foi igual  $\varepsilon_h = 19,32\%$ .

Figura 36 - Curva da  $\varepsilon_h$  conforme variação de H1/L e W/Z

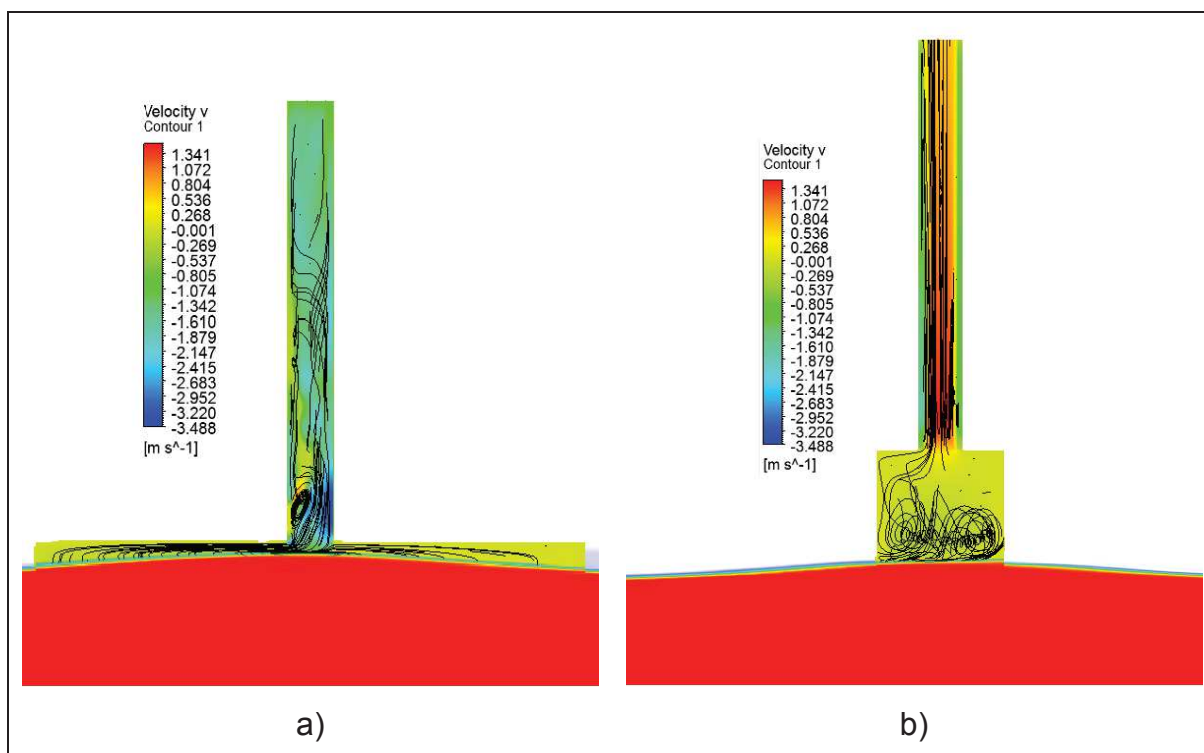
Fonte: Elaborada pelo autor

Ainda na Figura 36, é possível ver que a diferença entre a maior e menor  $\varepsilon_h$  quando  $H1/L=1$  diminui consideravelmente, onde a  $\varepsilon_h$  é igual a 5% ( $W/Z=0,95$ ) e 3% ( $W/Z=0,70$ ), essa diferença representa 50% a menos de divergência em comparação aos resultados mostrados no parágrafo anterior, quando  $H1/L=0,95$ .

Os resultados mostram que a melhor  $\varepsilon_h$  é encontrada quando a variável  $H1$ , que é a altura da câmara hidropneumática, dimensão regida pela razão  $H1/L$ , está próxima ao valor de  $H$ , que é a altura da onda, e quando o valor de  $L$ , que é o comprimento da câmara, está próximo a  $\lambda/2$ , que é a metade do comprimento de onda.

Na Figura 37, o caso com melhor (a) e pior (b)  $\varepsilon_h$  foram postos lado a lado com suas linhas de corrente plotadas em preto e com elevação máxima da superfície na mesma posição da câmara hidropneumática. No caso (a) existe menos zonas de recirculação de ar dentro da câmara, em comparação com caso (b), onde a câmara é mais alta e não tão comprida, porém na chaminé do caso (a) há mais recirculação de ar comparado com a chaminé do caso (b).

Figura 37 - Linhas de corrente para o melhor caso (a) e pior caso (b)

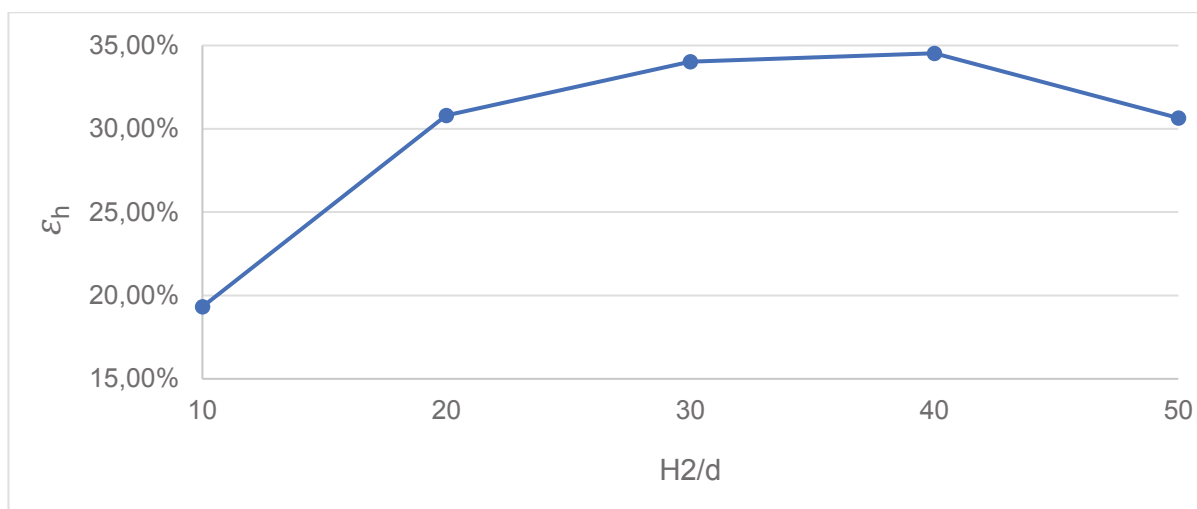


Fonte: Elaborada pelo autor

O melhor caso, que é referente à geometria otimizada, foi aquele obtido a partir da Equação (6.3), sendo  $W/Z$  (0,95) e  $H1/L$  (0,05), já o pior caso, que apresenta a menor eficiência, é a simulação número 09 da Tabela 17, sendo  $W/Z$  (0,737) e  $H1/L$  (0,861).

A fim de entender o limite da razão  $H2/d$ , que nos últimos testes foi fixado em 10 para limitar a altura da chaminé, ela foi variada de 10 à 50 em um passo de 10, obtendo o valor para o qual o aumento do valor da razão  $H2/d$ , que quanto maior diminui o diâmetro da chaminé “d” e aumenta a altura da chaminé “H2”, não interfira negativamente na  $\varepsilon_h$  obtida para o dispositivo CAO. Os resultados das simulações são apresentados na Figura 38, onde é observado que o valor de  $\varepsilon_h$  atinge seu limite a partir de  $H2/d \geq 40$ , ou seja, quando  $H2/d \geq 40$  a  $\varepsilon_h \sim 35\%$ . Os valores acima mostram que a razão  $H2/d$  apresenta efeito na  $\varepsilon_h$  do dispositivo CAO quando as razões  $H1/L$  e  $W/Z$  permanecem constantes em 0,05 e 0,95. Portanto, para valores diferentes, a influência de  $H2/d$  e seu limite máximo, antes de reduzir a  $\varepsilon_h$ , precisaria ser reavaliado.

Figura 38 - Curva da  $\varepsilon_h$  conforme variação razão de H2/d de 10 à 50 para H1/L= 0,05 e W/Z= 0,95

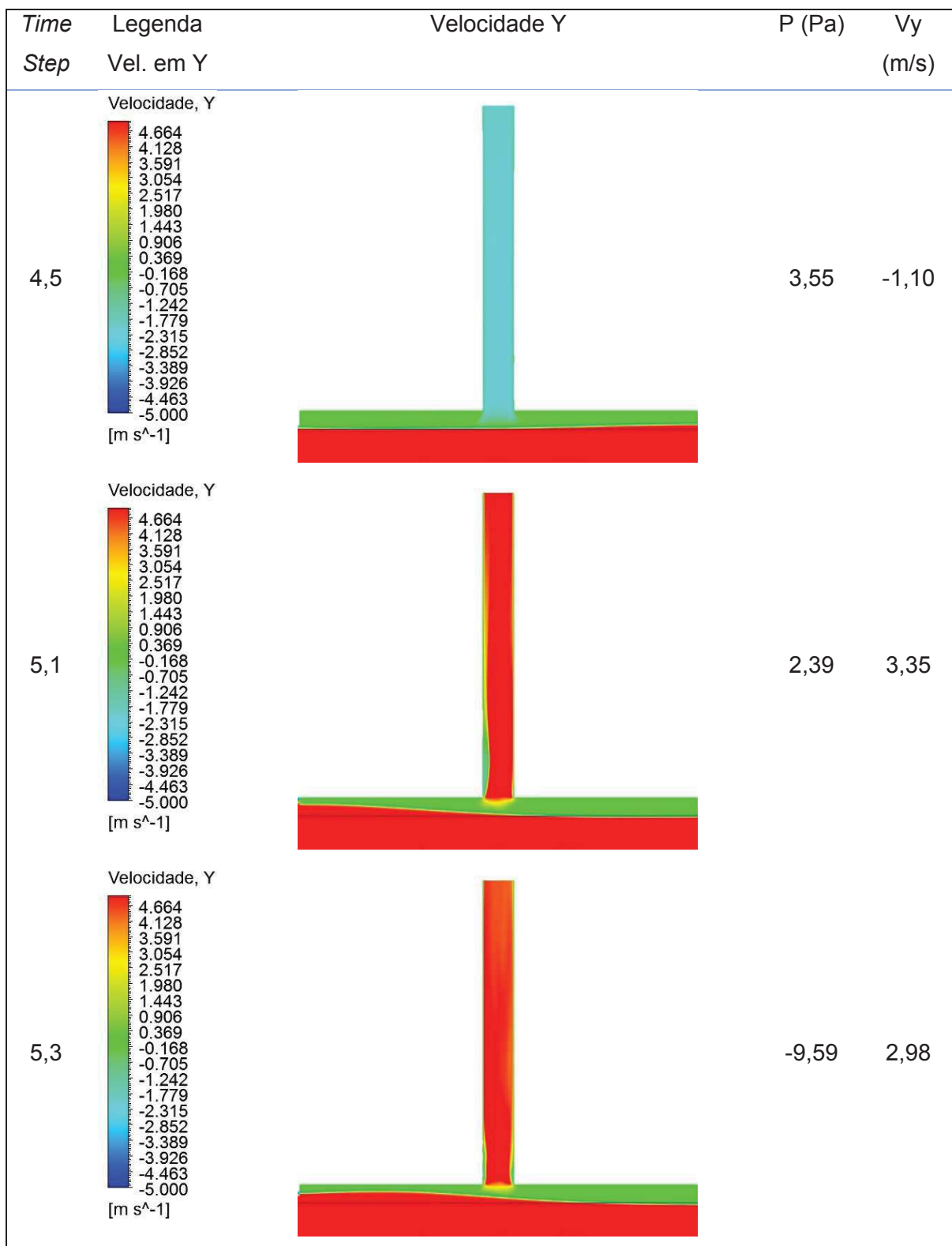


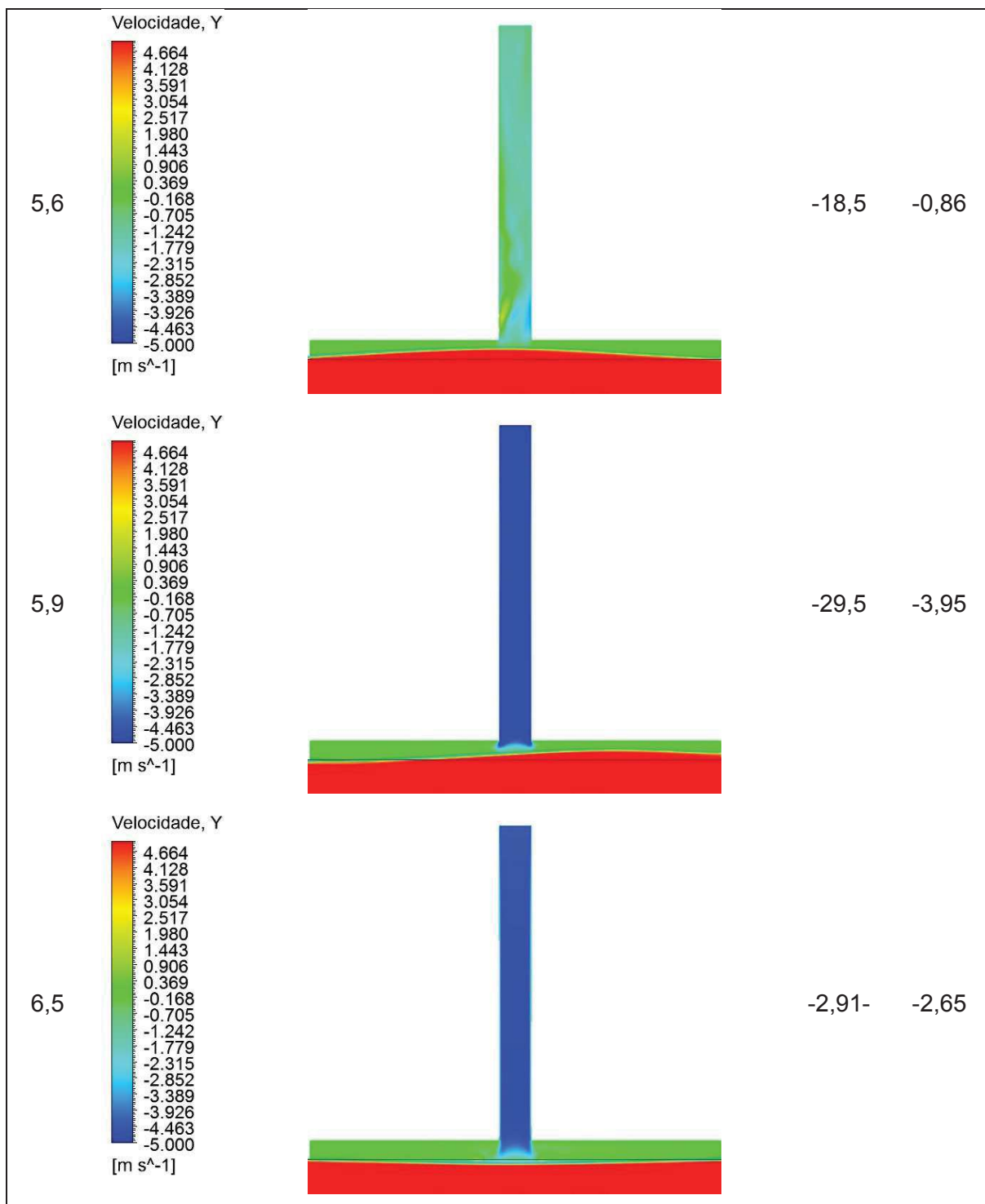
Fonte: Elaborada pelo autor

Ao analisar a Pressão e  $V_y$ , parâmetros utilizados para calcular a potência do dispositivo CAO, a cada *time step* que pertencem a uma oscilação completa da onda dentro da câmara hidropneumática, plotagens de velocidade representadas na Figura 39 abaixo, a  $V_y$ , paralela ao comprimento da chaminé, foi plotada para 6 momentos distintos em relação à posição da altura máxima da onda (crista) ao longo do eixo X, colinear à direção do movimento da onda, da esquerda para direita, e perpendicular à altura da chaminé. Nas plotagens o *time step* 4,5 s corresponde à posição da crista da onda quando está próxima de atingir a parede do início da câmara, em 5,1 s a crista está no início da câmara, em 5,3 s a crista da onda está entre o início da câmara e a chaminé, em 5,6 s a crista está no centro da chaminé, em 5,9 s a crista está entre a posição central da chaminé e o final da câmara e em 6,5 s a crista está fora da câmara.

Os dados da Figura 39 mostram que a maior variação da velocidade encontra-se quando a crista da onda está entre o início da câmara e sua posição quando se aproxima do centro da chaminé, portanto o componente de velocidade do ar no eixo X tem influência significativa na potência que pode ser extraída por um dispositivo CAO.

Figura 39 - Isorregiões de velocidade na direção Y para uma oscilação completa da onda.

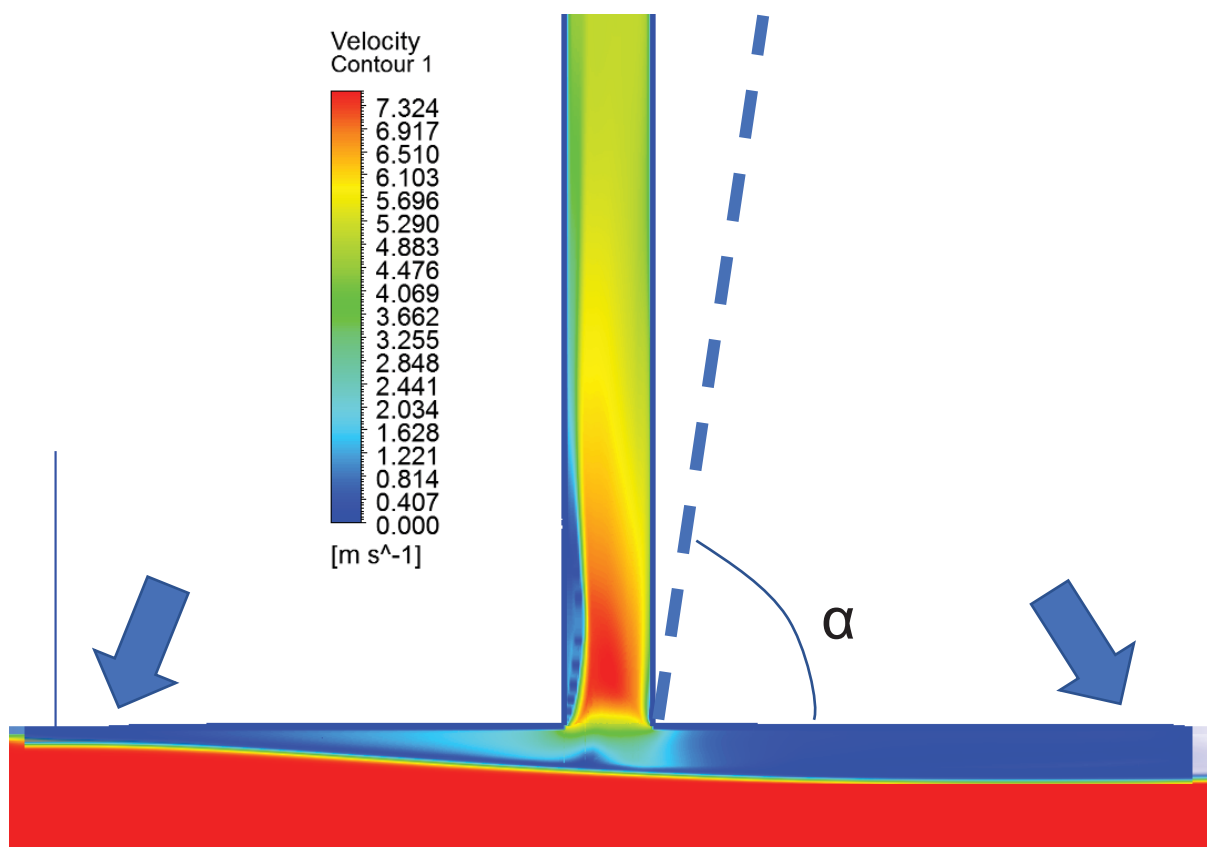




Conforme a Figura 39, onde a velocidade foi plotada para diversos *time steps*, a variação da velocidade nas laterais da câmara hidropneumática, conforme setas na Figura 40 abaixo, é praticamente nula, e a maior velocidade na chaminé é encontrada quando a onda está se aproximando do centro do dispositivo CAO. O vetor velocidade do ar não é paralelo à chaminé, mas tem um ângulo resultante dos componentes de velocidade  $u(x)$ , concordante com a direção de propagação da onda e  $w(z)$ , normal a

entrada da chaminé, conforme equação 4.10 e 4.11. A geometria do dispositivo, numa tentativa de eliminar as zonas com baixa vazão de ar, poderia ser redesenhada no formato trapezoidal e a chaminé, que é perpendicular a face superior da câmara do dispositivo CAO, poderia ser inclinada com um ângulo " $\alpha$ " menor que  $90^\circ$ , conforme projetado pela linha tracejada na Figura 40.

Figura 40 - Ângulo da chaminé para aumento de eficiência hidrodinâmica



Fonte: Elaborada pelo autor

Para avaliar a influência da posição da chaminé inclinada, conforme representado na imagem acima, além do ângulo atribuído a chaminé poderia ser deslocada para a direita, a fim de avaliar a influência da posição da chaminé ao longo do eixo X, paralelo à direção de deslocamento da onda, que resultará na maior eficiência para o dispositivo CAO.



## 7. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O presente trabalho apresentou uma análise do desempenho de um dispositivo conversor de energia do tipo Coluna de Água Oscilante, baseado no Método Design Construtal. Para o dispositivo como sistema, considerou-se que o melhor desempenho é obtido quando se facilita o escoamento da energia a partir das ondas para o conversor fluido mecânico, no presente trabalho determinada pela potência hidropneumática na chaminé. Foram analisados os efeitos de três graus de liberdade,  $H1/L$ ,  $H2/d$  e  $W/Z$ , de forma combinada. Verificou-se que o efeito da altura da chaminé,  $H2$ , é sempre positivo para a maior eficiência do sistema. Porém, existe a limitação de projeto de engenharia para sua altura. Desta forma, considerou-se uma altura fixa para a chaminé, igual a  $H2/d = 10$ , e analisaram-se os efeitos combinados dos graus de liberdade  $H1/L$  e  $W/Z$ . A seguir, são sumarizados os principais resultados do trabalho.

Nos resultados apresentados nas tabelas Tabela 11, Tabela 13 e Tabela 14 em que os valores de  $H1/L$  e  $H2/d$  foram mantidos variando apenas o valor de  $W/Z$ , mostra-se que, quanto mais largo o dispositivo CAO, maior a eficiência extraída. Esse comportamento é compreensível, pois a característica da onda é fixa e ao aumentar a área frontal da câmara hidropneumática aumenta também a quantidade de ar “empurrado” para cima, em direção a chaminé, pelo movimento oscilatório da onda.

Ao analisar os resultados variando os três graus de liberdade ( $W/Z$ ,  $H1/L$  e  $h2/d$ ), conforme experimentos mostrados na Tabela 15, foi identificado que a combinação dessas variáveis para obtenção da melhor eficiência torna-se complexa podendo levar a uma avaliação incorreta da influência dos parâmetros estudados para a melhor eficiência.

Apesar das maiores eficiências serem obtidas quando  $H2/d$ , razão entre a altura e diâmetro da chaminé, estar próxima de 50, conforme dados da Tabela 11, nos casos estudados para o dispositivo CAO em escala de 1:15 valores de  $H2/d$  maiores que 10 levariam, quando o dispositivo fosse fabricado, a uma chaminé muito alta em relação às dimensões dos outros componentes. Devido a isso, estipulou-se uma terceira restrição, além do volume de entrada ( $V_e$ ) e volume total do dispositivo ( $V_t$ ), que é a própria razão  $H2/d = 10$ , com isso a eficiência máxima obtida limitou-se a 19,31%.

O valor da razão  $H1/L$  apresentou melhor resultado para eficiência do dispositivo quando a altura da câmara ( $H1$ ) tinha aproximadamente 5% do comprimento da câmara hidropneumática ( $L$ ), isso fez com que o valor de  $H1$  seja aproximadamente a altura da onda ( $H1 \sim H$ ) e o valor de  $L$  seja aproximadamente a metade do comprimento característico da onda ( $L \sim \lambda/2$ ), concordando com os resultados apresentados por Gomes (2014).

O Design Construtal apresentou metodologia válida para a resolução do problema proposta de forma estruturada. Alinhada ao DOE (*Design of Experiments*), utilizando um planejamento compósito central, foi possível reduzir o número de simulações realizadas para encontrar a melhor combinação entre graus de liberdade.

Os resultados do presente trabalho respondem algumas questões, mas também abrem espaço para maiores investigações. Assim, este trabalho é finalizado com algumas sugestões para pesquisas futuras:

- a) analisar o nível de imersão  $H3$ , que até o momento foi mantido constante com valor aproximado a  $h$ , conforme validado por Gomes (2014);
- b) atribuir condição de parede com rugosidade conhecida no interior da câmara e na chaminé para avaliar a variação da eficiência do dispositivo;
- c) estudar os efeitos de uma turbina acoplada a chaminé, pois no presente estudo os efeitos da turbina são descartados na análise da eficiência;
- d) estudar os efeitos da escala, avaliando os resultados para uma modelo em escala 1:10, 1:5 e 1:1, com o objetivo de entender a influência de um modelo reduzido;
- e) analisar influência da variação da inclinação e posição da chaminé, na eficiência do dispositivo CAO.

## 8. REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, G. R. C. **Modelagem e simulação da dinâmica de boias de superfície ancoradas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). PUC-RIO. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=13395@1/>>. Acessado em: 15 de fev de 2020.
- BARREIRO, T. G., 2009. “**Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia**”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 87 p.
- BAS, D.; BOYAC, I. H. Modeling and optimization I: **Usability of response surface methodology**. Journal of Food Engineering, v. 78, n. 3, p. 836–845, fev. 2007
- BEIRÃO, G. F. **Protótipo de um Gerador Linear para Aproveitamento de Energia das Ondas num Sistema AWS**. 2010. Dissertação (mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Instituto Superior Técnico, 2011.
- BEJAN, A. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [S.l.], v. 40, n. 4, p. 799–811, 1997.
- BEJAN, A.; ZANE, J., Design in O Nature, Doubleday, 2012.
- BEJAN, A.; ALMOGBEL, M., Constructal T-shaped fins. International Journal of Heat and Mass Transfer, junho 2000. Vol. 43, p2101-2115.
- BEJAN, A.; LORENTE, S., Constructal Law of Design and Evolution: **Physics, Biology, technology, and Society**. Journal of Applied Physics, Vol. 113, pp.151301-1 – 151301- 20, 2008.
- BEJAN, A.; LORENTE, S., The constructal law and the evolution of design in nature. Physics of Life Reviews, Vol. 8, p209-240, 2011.
- BEJAN. A. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume. Int Journal Heat Mass Transfer. Duke University. Abril 1996. Vol. 40, No. 4, p 799-810.
- BHASKARAN, R.; COLLINS, L. Introduction to cfd basics. Cornell University-Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering, 2002.
- CARDOZO, C. F. **Estudo numérico de um conversor coluna de água oscilante através do método Design Construtal**. 2020. 56p. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica). UNISINOS.
- CARNEIRO, M. L. **Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaio de estruturas oceânicas**. Dissertação (mestrado em engenharia química) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2007.
- CHAKRABARTI, S. T., Hydrodynamics of Offshore Structures, **Computational Mechanics Publication**, 1987.

COLEMAN, D. E.; MONTEGOMERY, D. C. A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. **Technometrics**, [s. l.], 1993, v. 35, ed. 1.

CONDE, J. M. P.; GATO, L. M. C. Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter. **Renewable Energy**, vol. 33, p. 2637- 2644, 2008.

CRUZ, J. M. B. P., SARMENTO, A. J. N. A., 2004. **Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos**, Econômicos e Ambientais. Ed. Instituto do Ambiente, Amadora, 61 p.

DREW, B., PLUMMER, A. R., & SAHINKAYA, M. N. (2009). A review of wave energy converter technology. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, Part A: Journal of Power and Energy, 223(8), 887–902.

DUTRA, R F; ZINANI, F.S.F; ROCHA, L. A. O; BISERNI, C. Constructal design of an arterial bypass graft. **Heat Transfer**, v. 49, p. 1-21, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019/>>. Acessado em: 15 de set. de 2019.

EVANS, D.V; PORTER, R; Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device. **Applied Ocean Research**. v.17. p. 155-164. 1995.

FALCÃO, A. F. DE O. Wave energy utilization: **A review of the technologies**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2009.

FALNES, Johannes. A review of wave-energy extraction. **Marine Structures**. 2007. Pages 185-201.

GOMES, M. das N, G. LORENZINI, ROCHA, L. A. O. Constructal Design Applied to the Geometric Evaluation of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter Considering Different Real Scale Wave Periods. **Journal of Engineering thermophysics**. v. 27, No. 2, p. 173–190, 2018.

GOMES, M. N; OLINTO, C.R; ROCHA, L.A.O; SOUZA, J.A, ISOLDI, L.A. Computational modeling of a regular wave tank. **Revista de Engenharia Térmica**. Vol. 8, p. 44-50. 2009.

GOMES, M. N. **Constructal Design de Dispositivos Conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna da água oscilante**. 2014. 104p. Tese (Doutorado em Energia Mecânica). UFRGS.

GONÇALVES, R. A. A. C. **Análise numérica dos efeitos de compressibilidade do ar no interior da câmara de um dispositivo de extração de energia das ondas do tipo coluna da água oscilante**. 2018. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). UFRGS.

GONÇALVES, R. A. A. C.; TEIXEIRA, P. R. F.; DIDIER, E.; TORRES, F. R. Numerical analysis of the influence of air compressibility effects on an oscillating water column wave energy converter chamber. [S.l.] **Renewable Energy** v.153. p. 1183-1193, 2020.

GRIMMER, J. A. M. Conversor de energia das ondas em energia elétrica com dispositivo de Coluna de Água Oscilante: **Simulação Numérica e estudo geométrico**. 2013. 118p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Universidade Federal de Rio Grande – FURG.

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

Lee, K.H.; Kim, T.G. Three-dimensional Numerical Simulation of Airflow in Oscillating Water Column Device. **Journal of Coastal Research**. v .85, p.1346- 1350, 2018.

LIMA, Y. T. et al. Analysis of Geometric Variation of Three Degrees of Freedom through the Constructal Design Method for a Oscillating Water Column Device with Double Hidropneumatic Chamber. **Defect and Diffusion Forum**, [S.l.], v. 396, p. 22–31, 2019.

LISBOA, R. C.; TEIXEIRA, P. R.; DIDIER, E. Regular and irregular wave propagation analysis in a flume with numerical beach using a Navier-Stokes based model. **Defect and Diffusion Forum**, [S.l.], v. 372, p. 81–90, 2017.

LISBOA, R. C.; TEIXEIRA, P. R.; FORTES, C. J. Numerical evaluation of wave energy potential in the south of Brazil. **Energy**, [S.l.], v. 121, p. 176–184, 2017.

LIU, Z.; HYUN B.; HONG, K., Application of Numerical Wave Tank to OWC Air Chamber for Wave Energy Conversion. **International Offshore and Polar Engineering Conference**. 2008.

LIU, Z.; HYUN, B.-S.; HONG, K. Numerical study of air chamber for oscillating water column wave energy convertor. **China Ocean Engineering**, [S.l.], v. 25, n. 1, p. 169–178, 2011.

MACHADO, F. M. M. **Simulação numérica do escoamento de superfície livre com rebentação de ondas**. 2017. 78p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica, Energia e Ambiente). Universidade de Coimbra.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MEDINA-LOPEZ, E; BORTHWICK, A.G.L; MOÑINO, A. Analytical and numerical simulations of an oscillating water column with humidity in the air chamber. **Journal of cleaner production**. [S.l.] v. 238. 2019.

MELO, A. B. **Um olhar sobre a central piloto europeia de energia das ondas na ilha do pico**. 2018. 40p. Disponível em: <https://www.wavec.org/contents/reports/brochura-central-do-pico-2018.pdf>>. Acessado em: 04 de jan. de 2020.

MØRK, Gunnar & Barstow, Steve & Kabuth, Alina & Pontes, M. Assessing the Global Wave Energy Potential. ASME 2010 29th International Conference on ocean, offshore and Arctic Engineering. 3. 10.1115/OMAE2010-20473.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: 17 Objetivos para transformar o mundo. C2019. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/ods7/>>. Acessado em :30 de nov. 2019.

NELSON, R. A., Jr.; BEJAN, A. Constructal Optimization of Internal Flow Geometry in Convection. **Journal of Heat Transfer**. Maio 1998; 120(2): p357–364.

NETO, S. A. **Análise, seleção e dimensionamento de sistema mecânico para transmissão de potência em um conversor de energia de ondas oceânicas**. 189p. Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro. UFRJ. 2017.

NING, D. Z. et al. An experimental investigation of hydrodynamics of a fixed OWC Wave Energy Converter. **Applied Energy**, [S.l.], v. 168, p. 636–648, 2016.

NING, D.Z; TENG, B. Numerical simulation of fully nonlinear irregular wave tank in three dimension. **International Journal for numerical methods in fluids**. v. 53, p. 1847 -1862, 2006.

RIVAS, M. E. C. **Análise da resposta de estruturas offshore submetidas a ação do mar**. 1981. 158p Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UFRJ.

ROACHE, P. J. Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies. **Journal of Fluids Engineering** 116, 405–413. 1997.

ROACHE, P. J. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. **Annual Review of Fluid Mechanics** 29, 123–160. 1994.

ROCHA, L. A. O.; LORENTE, S.; BEJAN, A. Constructal Theory in Heat Transfer. **Handbook of thermal science and engineering**. [S.l.]: Springer, 2017. p. 329–360.

RODRIGUES, I. A. **Estudo do Galgamento em Conversor de Ondas Oceânicas**. 137p. Dissertação (Mestrado em Eletrotécnica) - Instituto Superior De Engenharia De Lisboa. 2017.

SCHÄFER, L. B. **Análise computacional e otimização geométrica de um dispositivo conversor da energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante**. 2012. 22p. Monografia. – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

SOLIMAN, P. A. **Estudo numérico do controle passivo de camada limite via geradores de vórtices em perfil aerodinâmico de um veículo de competição**. 2018. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - UFRGS, [S. l.], 2018.

TEIXEIRA, P R.F; DAVYT, D. P; DIDIER, E; RAMALHAIS, R. Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier–Stokes equations. **Energy**. v. 61, p513-530, 2012.

Thorpe, T. W. A brief review of wave energy, Technical report no. R120, EnergyTechnology Support Unit (ETSU), **A report produced for the UK Department of Trade and Industry**, 1999.

UNNA, P.J.H. Theory of sea waves. NATURE. No 3834. Abril de 1943.

WAVEC OFFSHORE RENEWABLES. **OWC Pico Power Plant**. C2006. Disponível em: <<http://www.pico-owc.net/en/gallery.html>>. Acessado em: 27 de nov. 2019.

ZHOU, G; KUN, K; LIU, F. Grid-converged Solution and Analysis of the Unsteady Viscous Flow in a Two-dimensional Shock Tube. **Journal of Fluid Mechanics**, [s. l.], 2017.

## 9. APÊNDICE A – REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL DO TANQUE DE ONDAS DO IPH.

