

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

CAMILA FERNANDES CARDOZO

**ESTUDO NUMÉRICO DE UM CONVERTOR COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE
ATRAVÉS DO MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL**

São Leopoldo
2020

Camila Fernandes Cardozo

**ESTUDO NUMÉRICO DE UM CONVERSOR COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE
ATRAVÉS DO MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL**

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

Orientador:
Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Coorientador:
Profa. Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani

São Leopoldo
2020

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

Cardozo, Camila Fernandes

Estudo Numérico de um Conversor Coluna de Água Oscilante Através do Método Design Construtal / Camila Fernandes Cardozo — 2020.

65 f.: il.; 30 cm.

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

“Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha, Unidade Acadêmica de Pesquisa e Pós-Graduação”.

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

CDU 621

Bibliotecária responsável: Amanda Schuster — CRB 10/2517

CAMILA FERNANDES CARDOZO

**ESTUDO NUMÉRICO DE UM CONVERSOR COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE
ATRAVÉS DO MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL**

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

Aprovado em 25 de juho de 2020.

BANCA EXAMINADORA

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

Profa. Dra. Rejane de Cesaro Oliveski - Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan - Universidade do Vale do Rio dos Sinos

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

Em primeiro lugar, agradeço aos meus professores orientadores Luiz Alberto Oliveira Rocha e Flávia Schwarz Franceschini Zinani, por toda a compreensão, disponibilidade, confiança e afeto prestados durante todo o processo de orientação, fundamentais para que eu pudesse conduzir esta etapa com tranquilidade e foco.

Agradeço também à professora Ana Paula Mallmann, que me acompanhou durante o estágio de docência, pela confiança em mim depositada e por tanto me ensinar sobre o fazer docente.

Agradeço também a todos os professores do PPGEM da Unisinos pelo conhecimento compartilhado e pela acessibilidade fornecida aos estudantes, gerando um ambiente de diálogo e de aprendizagem, elementos fundamentais à pesquisa científica.

Agradeço aos meus colegas do PPGEM por todos os dias de estudo e colaboração, e também pelos dias de risada e descontração, tornando esta fase muito mais leve e prazerosa.

Agradeço em especial ao Yuri Theodoro, que acompanhou o desenvolvimento deste trabalho desde o início, por todo tempo, ajuda e apoio prestados, fundamentais à conclusão desta etapa.

Agradeço ao Diego pelo apoio incondicional e, principalmente, por me lembrar, nos momentos mais difíceis, dos motivos pelos quais escolhi cursar uma pós-graduação.

Por fim, agradeço aos meus pais por todo o empenho que sempre tiveram em oferecer a mim educação de qualidade, sem o qual eu não teria o privilégio de ter chegado ao nível de pós-graduação.

RESUMO

Dispositivos conversores de energia das ondas do mar aproveitam o movimento de água para gerar eletricidade, convertendo energia potencial e cinética em elétrica. O presente trabalho centra-se no estudo de um conversor do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), que utiliza o movimento vertical das ondas no interior de uma câmara semi submersa para obter ar em alta velocidade através de uma chaminé, na qual deve estar conectado um gerador elétrico. Um modelo tridimensional de dispositivo CAO, com câmara retangular e chaminé cilíndrica, em escala 1:15, foi investigado com o objetivo de maximizar a eficiência hidrodinâmica a partir de variações geométricas, utilizando o método Design Construtal. O problema foi resolvido numericamente com o software Fluent, que utiliza o Método dos Volumes Finitos, junto ao modelo *Volume of Fluid* para escoamento multifásico. Os parâmetros analisados foram nível de submersão da câmara (H_3/h), razão entre a largura da câmara e a largura do tanque de ondas computacional (w/Z) e razão entre a altura e o diâmetro da chaminé (H_2/d). Para os casos estudados, os maiores valores de eficiência foram obtidos quando $H_3 \approx h$, $W \approx Z$ e $H_2 \gg d$. Contudo, os campos de pressão no interior do dispositivo apresentaram comportamento simétrico ao longo da largura w , sugerindo que, para os casos estudados, o parâmetro w/Z teve baixa influência nos valores de eficiência. Em contrapartida, variações geométricas na chaminé (H_2/d) apresentaram ganhos de eficiência mais significativos, diminuição de recirculações internas de ar e campos de velocidade e pressão mais uniformes. Entre todos os casos analisados, o pior e o melhor valor de eficiência obtidos foram de, respectivamente, 0,14% e 49,85%.

Palavras-chave: Energia das Ondas. Coluna de Água Oscilante. Design Construtal. CFD.

ABSTRACT

Wave energy converting devices take advantage of the movement of water to generate electricity, converting potential and kinetic energy into electrical. The present work focuses on the study of an Oscillating Water Column (OWC) converter, which uses the vertical movement of the waves inside a semi-submerged chamber to obtain high speed air through a chimney, in which an electrical generator must be connected. A three-dimensional model of the OWC device, with a rectangular chamber and a cylindrical chimney, in a 1:15 scale, was investigated with the objective of maximizing the hydrodynamic efficiency from geometric variations, using the Constructal Design method. The problem was solved numerically with the Fluent software, which uses the Finite Volume Method, along with the Volume of Fluid model for multiphase flow. The parameters analyzed were the chamber submersion level (H_3/h), ratio between the width of the chamber and the width of the computational wave tank (w/Z) and ratio between the height and the diameter of the chimney (H_2/d). For the studied cases, the highest efficiency values were obtained when $H_3 \approx h$, $W \approx Z$ and $H_2 \gg d$. However, the pressure fields inside the device showed a symmetrical behavior along the width w , suggesting that, for the cases studied, the parameter w/Z had a low influence on the efficiency values. In contrast, geometric variations in the chimney (H_2/d) showed more significant efficiency gains, a decrease in internal air recirculations and more uniform velocity and pressure fields. Among all the cases analyzed, the worst and the best efficiency values obtained were 0.14% and 49.85%, respectively.

Keywords: Wave Energy. Oscillating Water Column. Constructal Design. CFD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Custos percentuais para conversor de energia das ondas	17
Figura 2	Número de publicações por ano sobre Coluna de Água Oscilante e CFD	19
Figura 3	Mapa mundial da densidade de potência de onda	23
Figura 4	Cadeia de conversão de energia das ondas em energia elétrica	24
Figura 5	Classificação quanto à localização de instalação de dispositivos CEO	25
Figura 6	Modo de operação do conversor CAO	27
Figura 7	Turbina do tipo (a) Wells e (b) de impulso	28
Figura 8	Pico Plant - Portugal.	28
Figura 9	LIMPET - Islay, Escócia	28
Figura 10	CAO YongSoo - Jeju, Coreia	29
Figura 11	Características das ondas.	30
Figura 12	Classificação das ondas oceânicas de acordo com o período de oscilação	31
Figura 13	Perfil de onda Stokes de 2 ^a ordem	33
Figura 14	Faixa de aplicação das teorias de ondas	33
Figura 15	Fluxograma para aplicação do método Design Construtal	36
Figura 16	Dispositivo CAO em visão bidimensional	38
Figura 17	Método numérico	39
Figura 18	Domínio computacional e condições de contorno	40
Figura 19	Configuração da malha no tanque de ondas numérico	42
Figura 20	Elevação de superfície livre $\eta(x, t)$ numérica em comparação à solução analítica, em $x = \lambda$	43
Figura 21	Elevação de superfície livre numérica $\eta(x, t)$ em comparação a resultados experimentais, em $x = \lambda$	44
Figura 22	Modelo do dispositivo CAO, com base em Ning et al. (2016).	44
Figura 23	Configuração da malha na região da câmara do dispositivo CAO.	45
Figura 24	Configuração da malha na região da chaminé do dispositivo CAO.	45
Figura 25	Elevação máxima de superfície livre $ \eta _{\max}$, em comparação aos resultados de Ning et al. (2016)	46
Figura 26	Pressão máxima $ p _{\max}$, em comparação aos resultados de Ning et al. (2016)	47
Figura 27	Eficiência ε , em comparação aos resultados de Ning et al. (2016)	47
Figura 28	Potência hidropneumática em função de H_3/h	49
Figura 29	Amplitude relativa no interior do dispositivo CAO	49
Figura 30	Eficiência e potência hidrodinâmica em função de w/Z	50
Figura 31	Linhas de corrente para diferentes valores de w/Z	51
Figura 32	Campo de pressão no interior chaminé, para diferentes valores de w/Z	52
Figura 33	Campo de pressão no interior da câmara hidropneumática, para diferentes valores de w/Z	53
Figura 34	Eficiência hidrodinâmica em função de H_2/d	54
Figura 35	Linhas de corrente para diferentes valores de H_2/d	55
Figura 36	Campo de pressão no interior chaminé, para diferentes valores de H_2/d	56
Figura 37	Campo de pressão no interior da câmara hidropneumática, para diferentes valores de H_2/d	57
Figura 38	Amplitude da velocidade e da pressão, para todos os casos analisados	57
Figura 39	Eficiência hidrodinâmica em função de H_2/d	58
Figura 40	Canal de Ondas do IPH	64

Figura 41	Curva de Calibração da Sonda de Nível	65
-----------	---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resultados das buscas nas bases de dados Web of Science e Scopus .	18
Tabela 2	Síntese da revisão de literatura	21
Tabela 3	Dispositivos CEO instalados	26
Tabela 4	Dispositivos CAO instalados	29
Tabela 5	Equações para ondas Stokes de 1ª e 2ª ordem	32
Tabela 6	Métodos de solução	41
Tabela 7	Índice de Convergência de Malha - GCI, para $\lambda = 5,984$ m e $H = 0,06$ m	46
Tabela 8	Características da onda estudada	48

LISTA DE SIGLAS

CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CAO	Coluna de Água Oscilante
CEO	Conversor de Energia das Ondas [LCOE] custo nivelado de energia
GCI	Índice de Convergência de Malha
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
NWT	Tanque de Ondas Numérico
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
CFD	Computational Fluid Dynamics

LISTA DE SÍMBOLOS

Nomenclatura

A	área da chaminé [m ²]
C	celeridade de onda [m/s]
CFL	número de Courant- [-]
d	diâmetro da chaminé CAO
Fr	número de Froude [-]
\vec{g}	vetor aceleração gravitacional [m/s ²]
h	profundidade [m]
H	altura de onda [m]
H ₁	altura ao longo do eixo y da câmara CAO [m]
H ₂	altura da chaminé CAO ao longo do eixo y [m]
H ₃	nível de imersão CAO
k	número de onda [m ⁻¹]
L	comprimento da câmara CAO ao longo do eixo x [m]
p	pressão [Pa]
P _{hid}	potência hidrodinâmica [W]
P _{onda}	densidade de potência de onda [W/m]
t	tempo [s]
T	período de onda [s]
v	componente x da velocidade [m/s]
v	componente y da velocidade [m/s]
V _E	volume de entrada do dispositivo CAO [m ³]
V _T	volume total do dispositivo CAO [m ³]

Letras Gregas

α	fração volumétrica [-]
β	fator de escala [-]
Δx	tamanho do elemento de malha ao longo do eixo x
Δy	tamanho do elemento de malha ao longo do eixo y
Δz	tamanho do elemento de malha ao longo do eixo z
ε	eficiência hidrodinâmica [-]
$\eta(x, t)$	elevação de superfície livre [m]
λ	Comprimento de onda [m]

ρ massa específica [kg/m³]

μ viscosidade [kg/ms]

ω frequência angular [rad/s]

Sub-índices

()_{max} máximo

()_{min} mínimo

()_{abs} absoluto

()_{rel} relativo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Proposta de Trabalho e Objetivos	21
2	ENERGIA DAS ONDAS	23
2.1	Dispositivos Conversores de Energia das Ondas (CEO)	24
2.2	Dispositivo Coluna de Água Oscilante (CAO)	26
3	TEORIA DAS ONDAS OCEÂNICAS	30
4	LEI CONSTRUTAL E MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL	34
5	METODOLOGIA	36
5.1	Indicadores de Desempenho	36
5.2	Identificação das Constantes e Graus de Liberdade	37
5.3	Modelo Matemático e Numérico	39
6	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	42
6.1	Verificação e Validação do Tanque de Ondas Numérico	42
6.2	Verificação e Validação com dispositivo CAO inserido	44
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
7.1	Análise do nível de imersão H_3/h	48
7.2	Análise do grau de liberdade w/Z	50
7.3	Análise do grau de liberdade H_2/d	53
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
	REFERÊNCIAS	60
	ANEXO A – METODOLOGIA EXPERIMENTAL	64

1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global está relacionado à emissão de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono e metano. Segundo a International Energy Agency (2019), a emissão total de CO₂ associada à queima de combustíveis fósseis foi de 32 Gt em 2016; um aumento de 57% desde 1990. Apesar dos esforços para melhorar a eficiência energética, o consumo global de energia per capita aumentou em 51% de 1990 a 2016 (International Energy Agency, 2019). Essa tendência, aliada à crescente conscientização sobre mudanças climáticas e preservação de recursos naturais, favorece pesquisas por fontes limpas e renováveis de energia.

Dentre as fontes de energia renovável existentes, a energia dos oceanos tem ganhado atenção de pesquisas científicas nos últimos anos; principalmente após 1991, com a inclusão desta no programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) em energias renováveis da Comissão Europeia (FALCÃO; HENRIQUES, 2015). A energia dos oceanos pode ser aproveitada através de diferenças de salinidade, gradientes térmicos, correntes marinhas, marés e ondas oceânicas. (TOLMASQUIM, 2013).

A energia associada às ondas oceânicas utiliza o movimento oscilatório da água - vertical e horizontal - para gerar eletricidade, tendo maior aproveitamento em latitudes intermediárias (entre 30 e 70°), devido a maior ocorrência de ventos nestas regiões. Os dispositivos Conversores de Energia das Ondas (CEO)¹ utilizam a força das ondas para mover algum material ou fluido, convertendo energia cinética e potencial em elétrica. (BHATTACHARYYA; MCCORMICK, 2003).

Os dispositivos CEO não apresentam um modo de operação único e definitivo, mas uma variedade de conceitos - mais de 1000 patentes registradas entre Europa, Ásia e América do Norte (MCCULLEN et al., 2002) - diferindo entre si por localização, tipo e modo de operação (DELMONTE et al., 2016). Em virtude desta falta de convergência, tecnologias de CEO encontram-se em diferentes estágios de desenvolvimento; tornando mais complexo prever a viabilidade econômica deste tipo de energia.

Com o objetivo de preencher esta lacuna, foi apresentado em IEA-OES (2015) o *Levelized Cost of Energy* (LCOE) - Custo Nivelado de Energia, que consiste na razão entre os custos de instalação e manutenção e a energia elétrica gerada, até o ano corrente. O estudo analisou projetos de CEO em fases de desenvolvimento pré-comercial e comercial, obtendo valores nas faixas de 300-1800 \$/MWh e 100-500 \$/MWh, para cada fase, respectivamente.

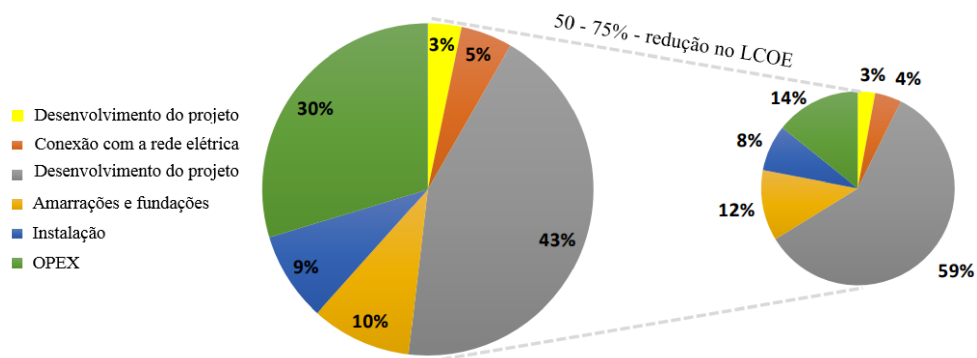
A quantidade de energia gerada depende do potencial energético do clima de ondas local, justificando a diminuição do LCOE em projetos em estágio comercial, pois espera-se que sejam instalados em locais de maior potencial energético, enquanto aqueles em fase inicial estão limitados aos locais de testes (IEA-OES, 2015). A energia produzida por um CEO também está relacionada ao fator de capacidade do dispositivo, isto é, o percentual de energia aproveitada.

¹Na literatura, geralmente é utilizado o termo *Wave Energy Converter* (WEC). No presente trabalho, optou-se por utilizar o termo traduzido e a sigla CEO, para dar fluidez à leitura.

O estudo realizado em IEA-OES (2015) sugere que o fator de capacidade de CEO encontra-se na faixa de 5 a 50%, aumentando com a disponibilidade energética do local de instalação. Em regiões onde a densidade de potência das ondas é de, aproximadamente, 25 kW/m (valor representativo para a costa brasileira), o fator de capacidade converge para 30%.

Quanto aos custos, é previsto que, entre a primeira fase e a escala comercial, o LCOE deva reduzir de 50 a 75%, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Custos percentuais para conversor de energia das ondas



Fonte: Adaptada de IEA-OES (2015).

Nota-se que, em ambas as fases, o custo mais representativo está relacionado à construção do dispositivo, aumentando para a escala comercial. Já os custos de manutenção devem reduzir consideravelmente entre a primeira e a segunda fase. Contudo, é válido destacar que este gráfico foi obtido através de uma média entre todas as tecnologias de CEO, podendo variar substancialmente para cada projeto.

Dentre os conceitos de CEO desenvolvidos até então, o tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) tem sido amplamente pesquisado, pois apresenta modo de operação simples e suas partes móveis não entram em contato com a água marinha, aumentando sua vida útil e diminuindo custos de manutenção (DREW; PLUMMER; SAHINKAYA, 2009). Além disso, eles podem ser tanto flutuadores e longe da costa, como a tecnologia japonesa Mighty Whale, quanto integrados a quebra-mares, como a experiência espanhola na costa de Mutriku (DELMONTE et al., 2016), tornando-os mais adaptáveis a diversos climas de ondas.

O comportamento do dispositivo CAO foi descrito analiticamente em Evans e Porter (1995); McCormick (1976); Evans (1978); contudo, estas análises aproximam o movimento de água no interior da câmara como um pistão. Esta simplificação pode superestimar os valores de eficiência energética, uma vez que desconsidera as variações espaciais da superfície de água. Já em Sarmiento e De Falcao (1985), a variação espacial do nível de água foi considerada através da aplicação de uma pressão variável no tempo e espacialmente uniforme à superfície livre.

Devido à natureza aleatória do oceano, falta de convergência de design de CEO e dificuldade em representar analiticamente o comportamento destes, a *Computational Fluid Dynamics* (CFD), Dinâmica dos Fluidos Computacional, pode ser uma ferramenta poderosa para avançar

no desenvolvimento desta tecnologia. *Numerical Wave Tanks* (NWT), Tanques de Onda Numéricos, têm sido utilizados com sucesso para estudo da interação entre ondas e estruturas de CEO.

Para melhor compreensão do uso desta ferramenta em dispositivos CEO, foi realizada uma revisão sistemática de literatura, que consiste no estudo de pesquisas primárias, com o objetivo de mapear, sintetizar e identificar as lacunas existentes no campo de estudo, conforme o método apresentado em Dresch et al. (2015). Este método consiste, basicamente, na:

- a) definição da questão a ser respondida pela revisão de literatura;
- b) escolha das fontes de buscas;
- c) delimitação dos termos de busca;
- d) delimitação dos critérios de exclusão e inclusão dos resultados;
- e) organização dos resultados;
- f) integração e análise dos resultados.

As fontes de busca utilizadas foram as bases de dados *Web of Science* e *Scopus*. Os termos de busca empregados foram *Oscillating Water Column*, nesta ordem exata de ocorrência, em conjunto com os termos *numerical simulation*, *CFD*, *numerical study*; nos campos título, resumo e palavras-chave. O termo *turbine* foi excluído do campo título, uma vez que este estudo não é escopo do presente trabalho. Além disso, trabalhos relevantes que não apareceram nas buscas foram adicionados manualmente. Os resultados são sumarizados na Tabela 1.

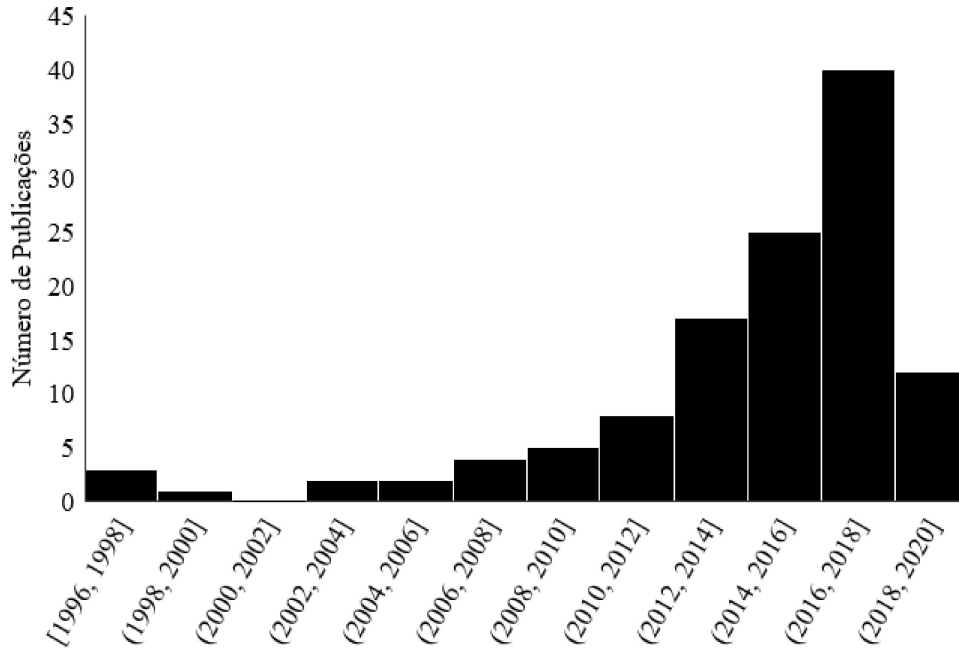
Tabela 1 – Resultados das buscas nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*

	Termos de Busca	Localização	Resultados
Web of Science	"oscillating water column" AND "numerical simulation" AND NOT "turbine"	título, palavras-chave e resumo título	43
	"oscillating water column" AND "CFD" AND NOT "turbine"	título, palavras-chave e resumo título	53
SCOPUS	"oscillating water column" AND "numerical simulation" AND NOT "turbine"	título, palavras-chave e resumo título	63
	"oscillating water column" AND "CFD" AND NOT "turbine"	título, palavras-chave e resumo título	120
	"oscillating water column" AND "numerical study" AND NOT "turbine"	título, palavras-chave e resumo título	32
	"OWC" AND "numerical study" AND NOT "turbine"	título, palavras-chave e resumo título	37
Total Bruto			348
Total Líquido			112

Foi obtido o valor bruto de 348 resultados, entre artigos de revista e congresso. Deste total, 176 documentos foram excluídos da análise por duplicidade. Do restante, foram excluídos 16 documentos pela falta de acesso ao material e 44 por não estarem no escopo da pesquisa. Para

seleção dos trabalhos que estavam no escopo do estudo, os resumos dos artigos foram lidos e, então, excluídos aqueles que não utilizavam CFD ou que centravam-se no estudo de turbinas. Neste capítulo, são discutidos os artigos de maior relevância para o presente trabalho, sem a pretensão de apresentar todos os artigos encontrados. A distribuição das publicações acerca do tema ao longo dos anos é apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Número de publicações por ano sobre Coluna de Água Oscilante e CFD



Entre os anos de 1996 e 2008, destacam-se os trabalhos realizados por Brito-Melo et al. (1999), Clément (1997), Josset e Clément (2007) e Lee, Newman e Nielsen (1996), empregando o modelo *Potential Flow* e o método de discretização *Boundary Element Method* (BEM). Este modelo, apesar de resolver os problemas de dinâmica dos fluidos em um tempo de processamento razoável, não considera turbulência onde os efeitos de viscosidade são pequenos, assumindo escoamento irrotacional e sem atrito (VYZIKAS, 2014).

White et al. (1997) analisaram a geometria da planta CAO instalada na ilha de Pico, em Portugal, através do método dos volumes finitos. Os autores compararam dois softwares de simulação (FLUENT e Phoenics) e diferentes modelos de turbulência. Os resultados indicaram a existência de vórtices no escoamento que poderiam ser evitados com mudanças na geometria do dispositivo.

A mesma planta CAO supracitada foi estudada por El Marjani et al. (2008), empregando o método dos volumes finitos associado ao método *Volume of Fluid* (VOF). Semelhante aos resultados de White et al. (1997), observou-se que o coeficiente de perda, associado à variação de pressão, poderia ser minimizado com mudanças na geometria da câmara hidropneumática.

Gomes et al. (2009) estudaram um dispositivo CAO bidimensional, em escala real, através do método dos volumes finitos e do modelo VOF, considerando as características do clima de ondas da costa de Rio Grande, cidade ao sul do Brasil.

Em Teixeira et al. (2013), um dispositivo CAO em escala real foi resolvido através do Método dos Elementos Finitos (FEM) e do Método dos Volumes Finitos (FVM). Os autores estudaram a geometria da câmara e a relação característica da turbina, em diferentes climas de ondas.

Para a utilização de CFD no projeto de usinas CAO em escala real, é preciso que os modelos numéricos sejam validados com resultados experimentais. Em geral, os primeiros testes são realizados em laboratório e os modelos são gradualmente ampliados até a escala real. No primeiro estágio, muitos efeitos dinâmicos podem ser negligenciados, ao passo que, em escala real, estas simplificações podem sub ou superestimar os resultados encontrados. Portanto, torna-se necessário considerar os efeitos de escala nas variáveis e modelos selecionados.

Sheng, Alcorn e Lewis (2014) apresentaram um estudo teórico sobre a modelagem física e efeitos de escala em dispositivos CEO, levando em consideração a similaridade de Froude. No estudo, os autores sugerem que o número de Reynolds deve ser grande o suficiente (maior que 10^5) para que o efeito das forças viscosas possa ser ignorado, garantindo um fluxo turbulento no modelo de laboratório. Os autores também apresentam o fator de escala para compressibilidade do ar e outras grandezas envolvidas na modelagem física de um CEO.

Elhanafi et al. (2017) estudaram numericamente os efeitos de escala e compressibilidade do ar em um dispositivo CAO, utilizando diferentes escalas para o modelo computacional (1:50 até a escala real), mostrando que os efeitos da compressibilidade do ar podem superestimar a eficiência máxima prevista pelo modelo em escala.

De maneira semelhante, foi realizado por Dai et al. (2019) um estudo numérico e experimental de um dispositivo CAO em diferentes escalas de laboratório. Os resultados sugeriram que os efeitos de escala são previstos corretamente quando o número de Reynolds é maior que 10^5 , conforme proposto em Sheng, Alcorn e Lewis (2014).

Em Shalby et al. (2019), foi realizado um estudo numérico e experimental de um dispositivo CAO de câmaras múltiplas, em escala 1:25. Foram estudados os efeitos de amortecimento, associado às características da turbina, para diferentes geometrias e características de ondas, modelando o ar como incompressível.

Recentemente, estudos têm aplicado o método Design Construtal para entender e prever a configuração geométrica que proporciona melhor desempenho de dispositivos CEO. Este método é baseado na Lei Construtal, que entende o design como um fenômeno físico e determinístico (BEJAN, 1997a).

Gomes (2014) analisou, através de MVF, um dispositivo CAO modelado bidimensionalmente, em escala real e de laboratório, aplicando o método Design Construtal. No estudo, foram investigadas as características geométricas do CAO, submetido a um clima de ondas regular, obtendo-se recomendações teóricas em função das características de onda.

Já Gomes et al. (2019) utilizaram o método Design Construtal para estudo numérico de um dispositivo CAO bidimensional, em escala real, submetido a um espectro de ondas.

Lima et al. (2019) utilizaram o método Design Construtal para o estudo numérico de um

dispositivo CAO, em modelo bidimensional, de câmara dupla e em escala real. Foram estudadas as características geométricas do conjunto, submetido a um clima de ondas regular.

De Lima et al. (2017) analisaram um dispositivo CAO me escala real com câmara trapezoidal, obtendo um ganho de 94% entre as geometrias de pior e melhor desempenho.

A Tabela 2 sumariza os artigos analisados na revisão de literatura. Como é possível perceber, existem diversos trabalhos aplicando CFD a dispositivos CAO em escala de laboratório. Contudo, trabalhos que utilizam o método Design Construtal estão mais centrados no estudo de CAO em escala real. Deste modo, há a necessidade de unir estas duas abordagens, de forma que o método Design Construtal seja aplicado adequadamente em modelos em escala de laboratório.

Tabela 2 – Síntese da revisão de literatura

	Modelo Matemático	Modelo de Turbulência	Discretização Numérica	Escala	Geometria
Josset e Clément (2007)	<i>Potential Flow</i>	–	BEM	real	3D
Clément (1997)	<i>Potential Flow</i>	–	BEM	real	2D
Lee, Newman e Nielsen (1996)	<i>Potential Flow</i>	–	BEM	real	3D
White P. et al. (1997)	RANS	k- ϵ , k-RNG	FVM	real	3D
El Marjani et al. (2008)	RANS e VOF	k- ϵ	FVM	real	3D
Gomes et al. (2009)	RANS e VOF	–	FVM	real	2D
Teixeira et al (2013)	RANS e ALE	k- ϵ	FVM e FEM	real	3D
Gomes (2014)	RANS e VOF	–	FVM	real e laboratório	2D
Lima et al. (2017)	RANS e VOF	–	FVM	real	2D
Elhanafi et al. (2017)	RANS e VOF	k- ω	FVM	1:50	3D
Shalby et al. (2019)	RANS e VOF	k- ω	FVM	1:25	3D
Dai et al. (2019)	RANS e VOF	k- ω	FVM	1:3	3D
Em Lima et al. (2019)	RANS e VOF	–	FVM	real	2D
Gomes et al. (2019)	RANS e VOF	–	FVM	real	2D

1.1 Proposta de Trabalho e Objetivos

O presente trabalho consiste no estudo numérico da geometria de um dispositivo CAO tridimensional, em escala 1:15, através do método Design Construtal. O objetivo do estudo é obter a configuração geométrica que maximize a conversão de energia das ondas do mar em energia hidropneumática de um dispositivo CAO, considerando um clima de ondas regular e representativo da costa do sul do Brasil.

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) elaborar uma revisão de literatura sobre os estudos numéricos de conversores CAO;
- b) avaliar a aplicabilidade do modelo computacional em um dispositivo CAO em escala de laboratório;
- c) desenvolver a formulação matemática e numérica do método Design Construtal para um dispositivo CAO em escala de laboratório;
- d) aplicar o método Design Construtal para obtenção do design ótimo de um conversor CAO tridimensional.

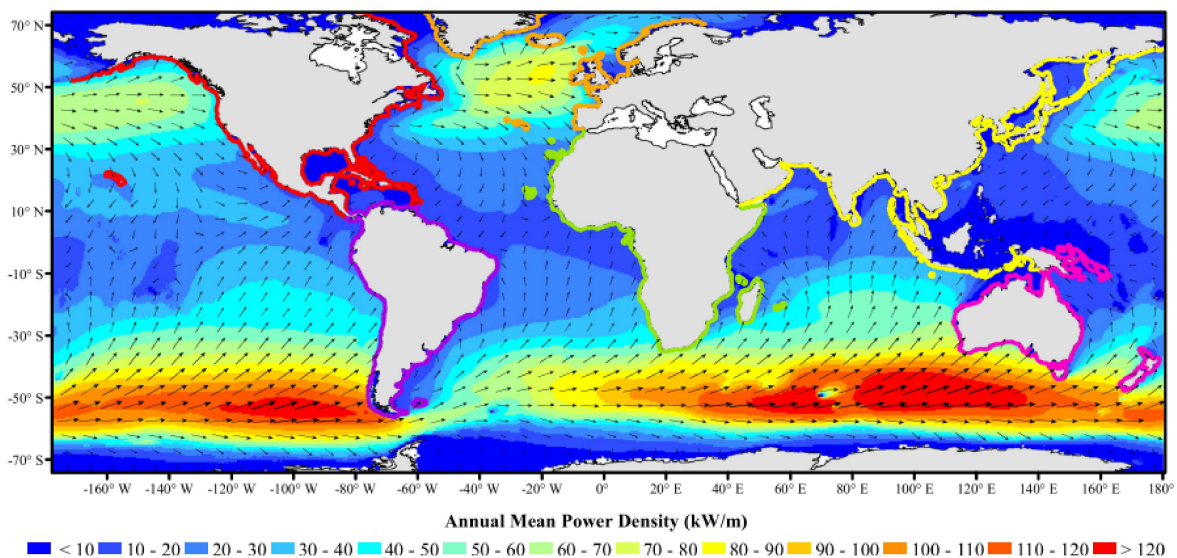
O trabalho está organizado da seguinte maneira: no Capítulo 2, são expostos os principais aspectos sobre energia das ondas e as tecnologias para aproveitamento energético desta; no Capítulo 3, são descritas as principais características das ondas oceânicas e as teorias para sua representação matemática; no Capítulo 4, é apresentado o método Design Construtal e as bases físicas nas quais está fundamentado; no Capítulo 5, são descritos o modelo computacional, a formulação matemática do Design Construtal e os indicadores de desempenho do sistema; no Capítulo 6, são realizadas as etapas de verificação e validação do modelo computacional; no Capítulo 7 são apresentados e discutidos os resultados obtidos; e, por fim, no Capítulo 8, são feitas as considerações finais.

2 ENERGIA DAS ONDAS

As ondas oceânicas podem ser geradas por diferentes mecanismos, como deslizamentos de terra ao longo da costa, tremores terrestres no fundo oceânico e efeitos de marés. Denomina-se **energia das ondas** a energia associada especificamente às ondas geradas pela ação dos ventos ao longo da superfície oceânica. Segundo Cruz e Sarmiento (2004), pode ser considerada uma forma de energia solar, uma vez que os ventos são ocasionados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre.

Estima-se uma potência de ondas mundial de, aproximadamente, 3,7 TW (MORK et al., 2010), e 2 TW em regiões próximas à costa, descartando-se os polos e regiões de degelo (GUNN; STOCK-WILLIAMS, 2012). Na Figura 3, é apresentada a distribuição global de densidade potência de onda (potência por unidade de largura de frente de onda), bem como as melhores direções médias de propagação de onda. Observa-se que as maiores densidades de potência estão localizadas em latitudes entre 30 e 70°, em ambos hemisférios.

Figura 3 – Mapa mundial da densidade de potência de onda



Fonte: Mork et al. (2010)

Na Figura 3, também é possível observar que a densidade de potência ao longo da costa brasileira varia entre 10 e 20 kW/m. No estudo realizado por Lisboa, Teixeira e Fortes (2017) para três cidades do estado do Rio Grande do Sul, a densidade de potência obtida foi de 22,3 kW/m em profundidades de 80 m e de 6,7 kW/m em profundidades de 14 m. Segundo Greaves e Iglesias (2018), o limite de extração de energia para um dispositivo de absorção pontual é dado por:

$$W = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.1)$$

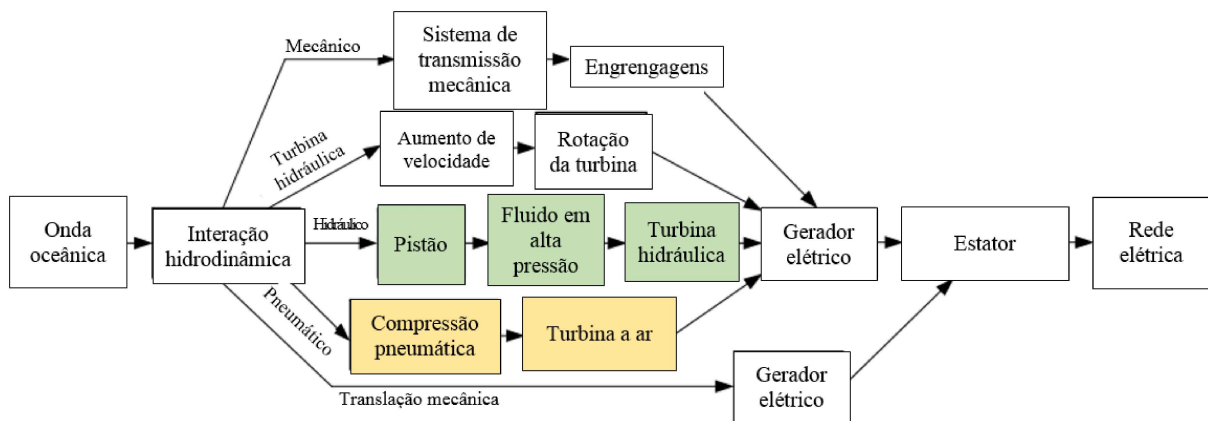
onde λ é o comprimento de onda (ver Capítulo 3).

Considerando as características de onda apresentadas por Lisboa, Teixeira e Fortes (2017) para uma profundidade de 14 m ($\lambda \approx 73$ m), e o fator de capacidade de 30% sugerido em IEA-OES (2015), é possível obter uma potência instalada de 23,4 kW para um dispositivo CEO. Segundo Cruz e Sarmiento (2004), uma usina de ondas com potência instalada de 100 MW deve ter uma largura paralela à costa aproximado de 5 km, enquanto o comprimento depende do tipo de tecnologia utilizada. No caso brasileiro, a grande extensão da costa pode ser uma vantagem na exploração deste recurso energético.

2.1 Dispositivos Conversores de Energia das Ondas (CEO)

Os dispositivos CEO, em geral, aproveitam o movimento oscilatório das ondas, horizontal ou vertical, para mover algum componente do seu sistema. Este componente pode ser uma turbina hidráulica ou a ar, um pistão ou uma placa plana, dependendo da tecnologia utilizada. A Figura 4 sumariza a cadeia de conversão de energia para diferentes tipos de CEO.

Figura 4 – Cadeia de conversão de energia das ondas em energia elétrica



Fonte: Adaptada de Delmonte et al. (2016).

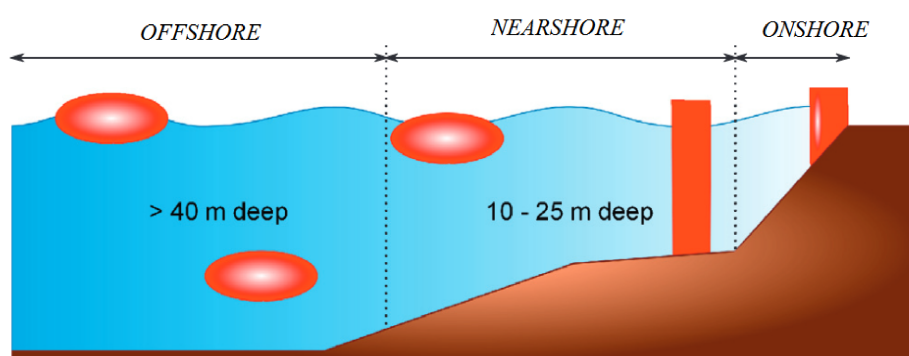
Os primeiros dispositivos CEO colocados em funcionamento foram sinalizadores marítimos alimentados pela energia das ondas, idealizados por Yoshio Masuda na década de 1960 e comercializados em larga escala no Japão (CRUZ; SARMENTO, 2004; FALCÃO; HENRIQUES, 2015). Este conceito de CEO, atualmente denominado Coluna de Água Oscilante, utiliza compressão e compressão pneumática para mover uma turbina a ar, conforme destaque em amarelo na Figura 4.

No Brasil, um projeto liderado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), desenvolveu um modelo de CEO que utiliza o movimento oscilatório das ondas para pressurizar água e, por conseguinte, movimentar uma turbina hidráulica (TOLMASQUIM, 2013), conforme destaque em verde na Figura 4.

Não obstante à variedade existente de modelos de CEO, a maioria deles pode ser classificada quanto à localização, ao tipo e ao modo operação (DELMONTE et al., 2016).

Quanto à localização, os conversores podem ser classificados como costeiros (*onshore*); próximos à costa (*nearshore*) e afastados da costa (*offshore*), estes dois últimos distinguindo-se entre si pela profundidade do local de instalação, conforme ilustra a Figura 5. Uma possibilidade para redução de custos é a integração dos conversores a portos e quebra-mares; porém, nestas regiões, o potencial energético é menor. Já em regiões *offshore*, a disponibilidade energética é maior; contudo, os custos de instalação, manutenção e transmissão da energia também são mais elevados. Portanto, o projeto de uma usina de energia das ondas do mar deve considerar estes aspectos.

Figura 5 – Classificação quanto à localização de instalação de dispositivos CEO



Fonte: Adaptada de López et al. (2013).

Quanto ao tipo, a classificação é realizada em relação ao comprimento e à direção de propagação de onda, conforme Bhattacharyya e McCormick (2003); Drew, Plummer e Sahinkaya (2009):

- a) absorção pontual, em que a dimensão do dispositivo é pequena em relação ao comprimento de onda;
- b) atenuadores, instalados paralelamente à direção predominante de propagação das ondas;
- c) terminadores, instalados perpendicularmente à direção predominante de propagação das ondas.

Quanto ao modo de operação, os dispositivos são classificados de acordo com a tecnologia utilizada para conversão de energia. Dentre os conceitos mais estudados até então, destacam-se (DREW; PLUMMER; SAHINKAYA, 2009; CRUZ; SARMENTO, 2004):

- a) coluna de água oscilante (CAO);
- b) galgamento;
- c) diferencial de pressão submersa;

- d) corpos oscilantes verticais;
- e) corpos oscilantes horizontais.

Na Tabela 3, são apresentados alguns CEO existentes e suas respectivas classificações quanto à localização (*onshore* [1], *nearshore* [2] e *offshore* [3]); tipo (absorção pontual [A], atenuadores [B] e terminadores [C]); e modo de operação.

Tabela 3 – Dispositivos CEO instalados

Dispositivo	País	Potência Instalada (kW)	Localização	Tipo	Modo de Operação	Status
Pico	Portugal	400	1	C	Coluna de Água Oscilante	Encerrado
Usina de Pecém	Brasil	100	1	A	Corpos oscilantes verticais	Encerrado
Aquamarine Power Oyster	Irlanda do Norte	800	2	C	Corpos oscilantes horizontais	Encerrado
Osprey	Escócia	1000	2	C	Coluna de Água Oscilante	Interrompido
Archimedes Wave Swing	Escócia	2000	3	A	Diferencial de pressão submersa	Encerrado
Wave Dragon	Dinamarca	20	3	C	Galgamento	Encerrado
Pelamis Wave Power	Escócia	750	3	B	Corpo Flutuante	Encerrado

Fonte: Cruz e Sarmiento (2004); Delmonte et al. (2016); Drew, Plummer e Sahinkaya (2009); Falcão e Henriques (2015); Wilberforce et al. (2019).

É válido destacar que, em se tratando de uma tecnologia não esgotada, existem ou ainda podem ser desenvolvidos outros modos de operação aqui não mencionados. Além disso, não existe um modelo único e definitivo de CEO, mas sim conceitos que devem funcionar melhor no clima de ondas de cada região.

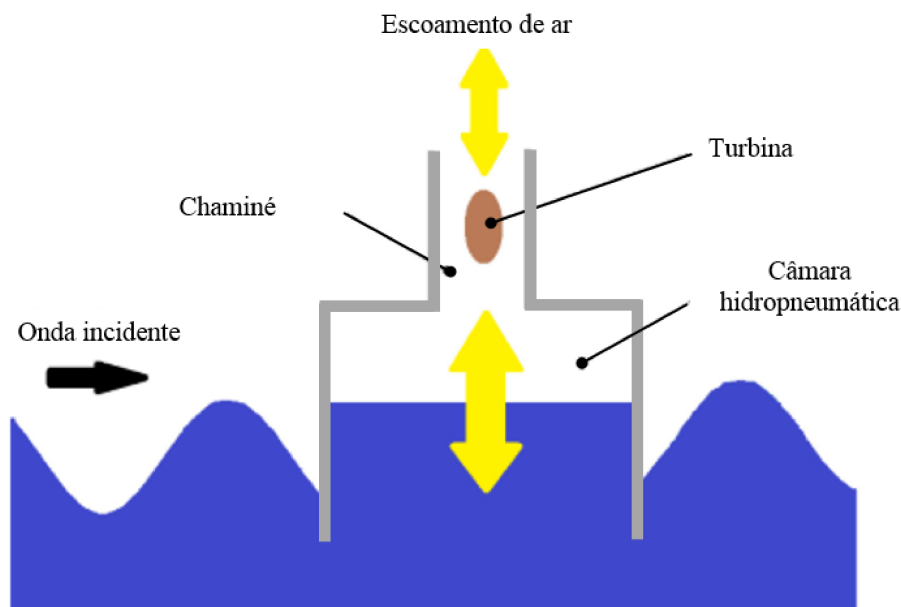
2.2 Dispositivo Coluna de Água Oscilante (CAO)

Dentre os modelos desenvolvidos até então, o tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) tem sido amplamente pesquisado, pois apresenta modo de operação simples e suas partes móveis não entram em contato com a água marinha, aumentando sua vida útil e diminuindo custos de manutenção (DELMONTE et al., 2016; DREW; PLUMMER; SAHINKAYA, 2009).

Conforme mencionado na seção 2.1, o primeiro dispositivo CAO foi proposto por Yoshio Masuda na década de 60, com o objetivo de gerar energia para sinalizadores náuticos (CRUZ; SARMENTO, 2004; FALCÃO; HENRIQUES, 2015). Este dispositivo é composto por uma câmara hidropneumática semi submersa, na qual o movimento vertical das ondas comprime e descomprime o ar, forçando-o passar através de uma chaminé, na qual fica localizada uma

turbina acoplada a um gerador de energia elétrica (CRUZ; SARMENTO, 2004), conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Modo de operação do conversor CAO



Fonte: Adaptada de Gomes et al. (2019)

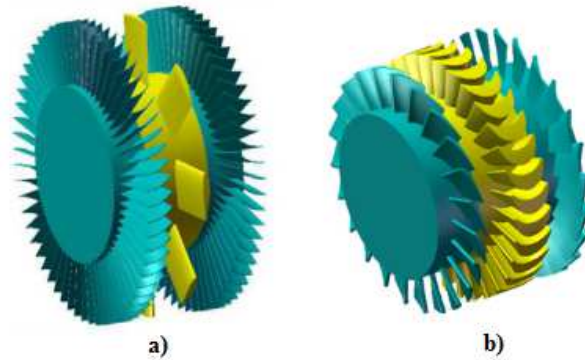
Devido ao movimento oscilatório das ondas, os primeiros conceitos de CAO utilizavam válvulas retificadoras, forçando o ar a escoar em uma única direção (FALCÃO; HENRIQUES, 2015). Mais recentemente, este problema foi resolvido com turbinas auto retificadoras, como as turbinas de Wells e de impulso (CUI et al., 2019). A turbina do tipo Wells (Figura 7a), desenvolvida por A. A. Wells em 1976, é composta por aerofólios simétricos que giram em uma única direção, independente do sentido do escoamento de ar (RAGHUNATHAN, 1995). A turbina de impulso (Figura 7b), inventada em 1975 por I. A. Bebinsten, possui duas linhas de palhetas guias nos dois lados do rotor (FALCÃO; HENRIQUES, 2015). Revisões bibliográficas mais detalhadas sobre turbinas para dispositivos CAO foram realizadas por Falcão e Henriques (2015) e Cui et al. (2019).

Os conversores CAO podem ser instalados em regiões *onshore*, *nearshore* e *offshore*, o que dá a este tipo de tecnologia adaptabilidade em diversos climas de ondas. A maior desvantagem destes são as grandes dimensões da estrutura, aumentando os custos de construção (CRUZ; SARMENTO, 2004).

Diversos protótipos de plantas CAO já foram instalados, com o objetivo de estudar comportamento, desempenho e resiliência quando inseridos em um clima real de ondas. Destaca-se a central *onshore* instalada na ilha de Pico, em Portugal, em 1999 e ativa até o ano de 2018, mostrada na Figura 8, com potência instalada de 400 kW.

Na mesma época da construção da central de Pico, foi desenvolvida, na Escócia, a central LIMPET (Figura 9, primeira usina comercial CAO conectada à rede pública (FALCÃO;

Figura 7 – Turbina do tipo (a) Wells e (b) de impulso



Fonte: Adaptada de Falcão e Henriques (2015).

Figura 8 – Pico Plant - Portugal.



Fonte: Falcão e Henriques (2015).

HENRIQUES, 2015). A planta, com potência nominal de 500 kW, foi projetada com câmara hidropneumática inclinada com objetivo de melhor aproveitar o recurso energético local (DELMONTE et al., 2016).

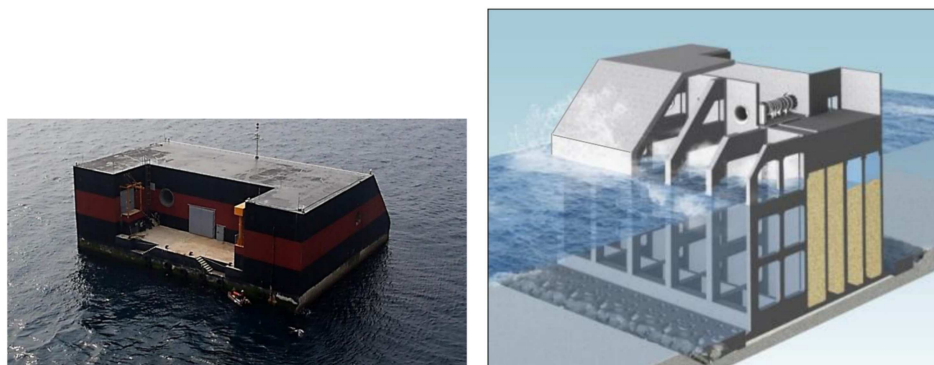
Figura 9 – LIMPET - Islay, Escócia



Fonte: Adaptado de Delmonte et al. (2016).

Outra estratégia para incremento da produção de energia elétrica é a utilização de câmaras múltiplas, como o projeto piloto de 500 kW instalado próximo à costa da ilha de Jeju, na Coreia do Sul, (FALCÃO; HENRIQUES, 2015), mostrado na Figura 10.

Figura 10 – CAO YongSoo - Jeju, Coreia



Fonte: Falcão e Henriques (2015).

A Tabela 4 apresenta alguns conversores CAO colocados em funcionamento, bem como a potência instalada e suas respectivas dimensões.

Tabela 4 – Dispositivos CAO instalados

Ano de Instalação	Dispositivo	País	Potência Instalada (kW)	Localização	Tipo de Turbina	Qtde. de Camaras	Dimensão (m ²)
1978	Kaimei	Japão	125	nearshore	Wells e impulso	8	80 x 12
1990	CAO Sakata	Japão	60	onshore	Wells	5	20 x 29
1998	Mighty Whale	Escócia	110	nearshore	Wells	3	50 x 30
1999	Pico	Portugal	400	onshore	Wells	1	12 x 12
2000	LIMPET	Escócia	500	onshore	Wells	1	169
2008	CAO Mutriku	Espanha	300	onshore	Wells	16	14 x 102
2016	Yongsoo Plant	Coreia	500	nearshore	impulso	5	37 x 31

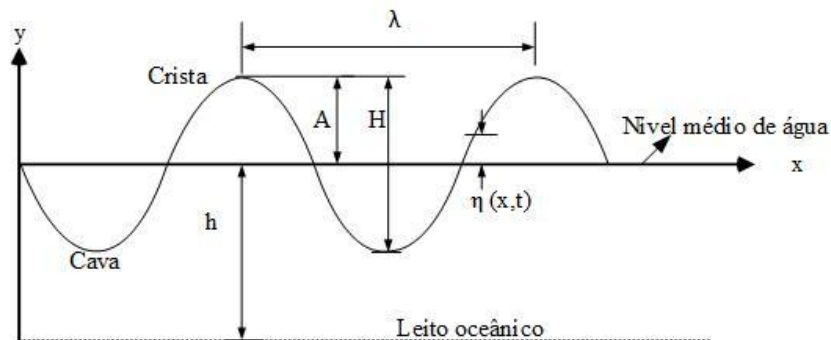
Fonte: Cruz e Sarmiento (2004); Delmonte et al. (2016); Drew, Plummer e Sahinkaya (2009); Falcão e Henriques (2015); Wilberforce et al. (2019).

3 TEORIA DAS ONDAS OCEÂNICAS

Uma onda oceânica é gerada pela ação de força - como um abalo sísmico ou a ação dos ventos - que provoca uma perturbação da superfície de água. Atua, então, uma força restauradora - como a gravidade ou tensão superficial - para manter a superfície de água em equilíbrio, ocasionando a propagação da oscilação (VYZIKAS, 2014).

As ondas são descritas por três elementos: período (T), que é o tempo de uma oscilação completa; altura (H), que é a distância entre os ponto mais baixo (cava) e mais alto (crista); e profundidade (h), que é a distância entre o nível médio de água e o leito oceânico (CHAKRA-BARTI, 2005). A Figura 11 representa uma onda bidimensional, propagando-se na direção positiva do eixo x, em determinado instante de tempo t.

Figura 11 – Características das ondas.



A variável $\eta(x,t)$ é a elevação de superfície livre de água, para determinada posição x e instante t. A amplitude A é a máxima elevação, em relação ao nível médio de água. O comprimento de onda λ é definido como a distância horizontal entre duas cristas ou duas cavas sucessivas, calculado por (MANI, 2018):

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (3.1)$$

onde g é a aceleração gravitacional.

A velocidade de propagação da onda, denominada celeridade C, é dada por (MANI, 2018):

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad (3.2)$$

O número de onda k, em m^{-1} é dado por (MANI, 2018):

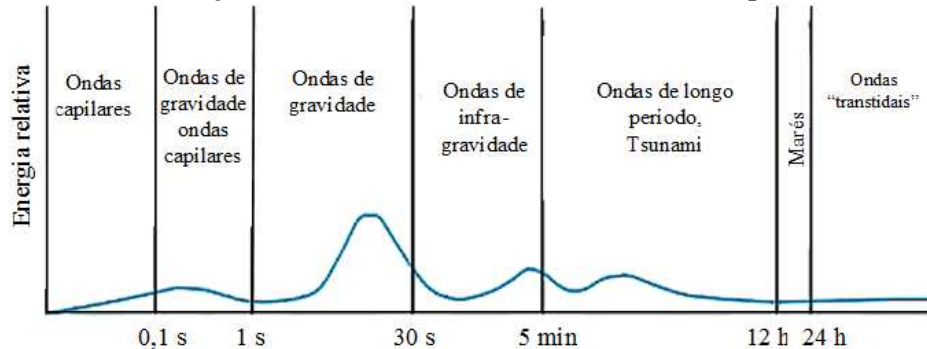
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.3)$$

E a frequência angular ω , em rad/s, é dada por (MANI, 2018):

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3.4)$$

A Figura 12 apresenta a classificação das ondas oceânicas de acordo com período de oscilação que, por sua vez, depende da fonte geradora. As ondas com período na faixa de 1 a 30 s, denominadas ondas de gravidade, são ocasionadas pela ação dos ventos que, ao soprarem sobre o oceano, causam uma perturbação na superfície de água; neste caso, a gravidade é a força restauradora (MANI, 2018).

Figura 12 – Classificação das ondas oceânicas de acordo com o período de oscilação



Fonte: Adaptado de Mani (2018).

De fato, as ondas no mar são formadas pela superposição de ondas de diferentes tipos e velocidades, tornando difícil a sua representação matemática. Contudo, é possível estimar o seu comportamento em específicas faixas de profundidade relativa (h/λ) com teorias determinísticas, como as teorias lineares e não lineares.

A teoria linear de ondas, também conhecida como teoria de Airy ou Stokes de 1ª ordem, aplicável para uma ampla faixa de profundidades relativas, é obtida a partir da solução da equação de Laplace (MANI, 2018):

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.5)$$

onde ϕ é o potencial de velocidade $\phi = \phi(x, y, z, t)$, com componentes x , y e z dadas por :

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}; v = \frac{\partial \phi}{\partial y}; w = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (3.6)$$

Considerando a onda apresentada na Figura 11, com $y=0$ no nível médio de água e $y=-h$ no leito oceânico, as seguintes condições de contorno são adotadas:

- Condição cinemática de parede no fundo oceânico: a componente vertical da velocidade no fundo oceânico deve ser zero, uma vez que as partículas de água não podem penetrar a barreira sólida. Portanto, em $y = -h$:

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (3.7)$$

- Condição cinemática de superfície livre: a componente vertical da velocidade da partícula na superfície deve ser igual à $\eta(x,t)$, uma vez que estas não podem atravessar a superfície livre. Como consequência, tem-se em $y = 0$:

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (3.8)$$

- Condição dinâmica de superfície livre: a pressão na superfície livre é nula ($p=0$). Assim, a equação de Bernoulli, em $y = \eta$, é escrita na forma:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \quad (3.9)$$

Aplicando estas condições de contorno à Equação 3.5, é possível obter a função $\phi = \phi(x,y,z,t)$. Na Tabela 5 são mostradas as soluções para $\eta(x,t)$ e para as componentes u e v da velocidade. Para estas soluções, o fluido é adotado como incompressível e desconsidera-se a tensão superficial. As partículas de fluido realizam órbitas fechadas nos eixos x e y ; ou seja, não há transporte de massa.

Tabela 5 – Equações para ondas Stokes de 1ª e 2ª ordem

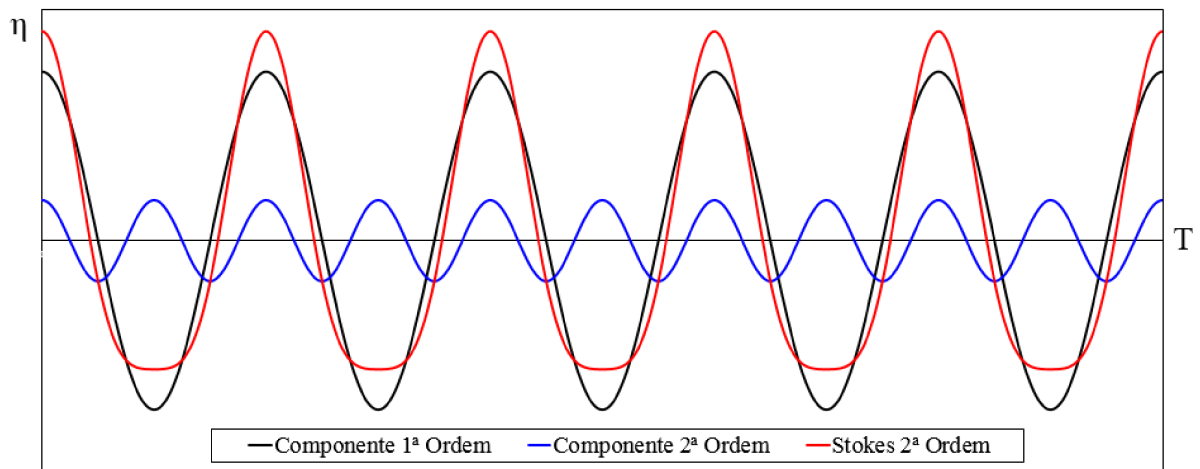
	Componente de 1ª Ordem	Componente de 2ª Ordem
Elevação de Superfície	$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$	$\eta(x,t) = \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos 2(kx - \omega t)$
Velocidade Horizontal	$u = \frac{H \omega \cosh k(h+y)}{2 \sinh(kh)} \cos(kx - \omega t)$	$u = \frac{3H^2 \omega k \cosh 2k(h+y)}{16 \sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t)$
Velocidade Vertical	$v = \frac{H \omega \sinh k(h+y)}{2 \sinh(kh)} \sin(kx - \omega t)$	$v = \frac{3H^2 \omega k \sinh 2k(h+y)}{16 \sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t)$

Fonte: Chakrabarti (2005) e Vyzikas2014

As teorias não lineares, ou Stokes de ordem maior, são obtidas através da superposição de componentes com frequências mais altas que a frequência fundamental da onda. Para uma onda Stokes de 2ª ordem, as componentes de $\eta(x,t)$ e velocidades são apresentadas na Tabela 5. O perfil desta pode ser visto na Figura 13.

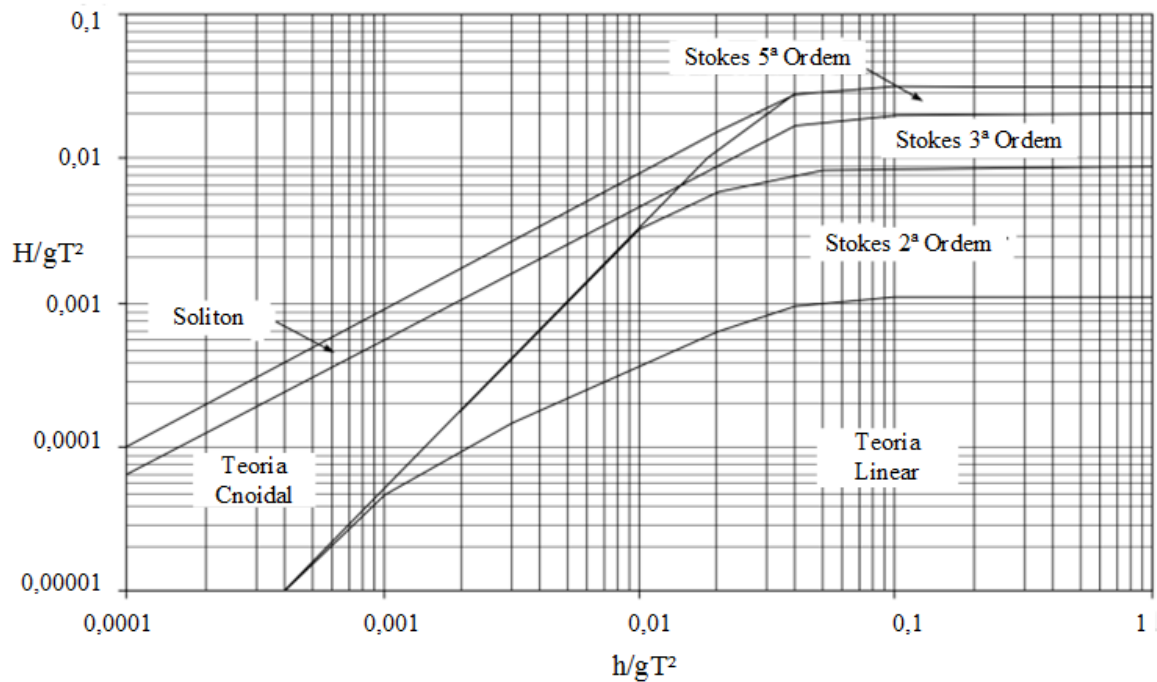
Neste caso, como é possível perceber na Figura 13, o formato das ondas é assimétrico em relação ao nível médio de água, apresentando cristas mais íngremes e cavas mais achatadas. As partículas de fluido não realizam órbitas fechadas, assemelhando-se mais à forma das ondas reais, em que há transferência de massa devido à existência de correntes marítimas (GOMES, 2014).

Figura 13 – Perfil de onda Stokes de 2ª ordem



Quanto à escolha da teoria adequada, a Figura 14 mostra a aplicabilidade de cada teoria, de acordo com período T , profundidade h e altura H .

Figura 14 – Faixa de aplicação das teorias de ondas



Fonte: Adaptado de Mani (2018).

Um maior detalhamento sobre as soluções aqui apresentadas, bem como as demais teorias de ondas oceânicas, pode ser obtido em Bhattacharyya e McCormick (2003), Chakrabarti (2005), Mani (2018) e Vyzikas (2014).

4 LEI CONSTRUTAL E MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL

A Lei Construtal é uma lei física, proposta pela primeira vez em Bejan (1997a), que descreve como devem ocorrer os escoamentos na natureza. Enquanto a 2ª Lei da Termodinâmica fornece o sentido do fluxo, da fonte quente para a fonte fria, por exemplo, a Lei Construtal prevê como o sistema deve fluir. Estas duas leis, utilizadas em conjunto, explicam, por exemplo, a semelhança entre a forma das árvores, das bacias hidrográficas e do sistema circulatório, compondo uma visão mais completa da natureza (BEJAN; ZANE, 2012).

De acordo com Bejan e Zane (2012), tudo que se move pode ser considerado um sistema de escoamento. O conceito de vida é estendido a todo aquele sistema que está em desequilíbrio termodinâmico, ou seja, que está escoando. Deste modo, sistemas que escoam são descritos pela mesma lei física, a Lei Construtal, enunciada na forma: “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).

Neste contexto, a evolução tem um propósito: o de facilitar o escoamento. Deste modo, o conceito de evolução é estendido aos sistemas inanimados, diferente da recorrente associação exclusiva aos sistemas biológicos. Em consequência, o design dos sistemas de escoamento é um fenômeno determinístico e previsível, uma vez que ele deve ocorrer no sentido de facilitar o acesso às correntes que por ele escoam.

O termo Construtal é cunhado para diferenciar do método *fractal*, que consiste na análise do design a partir da quebra do seu todo em partes menores. Apesar de ser uma ferramenta válida para entender matematicamente uma geometria, ela não permite prever o design de um sistema de escoamento, já que não está de acordo com a direção do tempo (BEJAN, 1997a). Em contrapartida, o Design Construtal deve ser analisado na direção do tempo, da menor para a maior escala, e não ao contrário. O termo Design Construtal tem sido empregado para denominar sistemas de escoamentos que foram previstos com base na Lei Construtal.

Segundo a 2ª Lei da Termodinâmica, em uma transformação energética, a entropia em um sistema real sempre aumenta. De acordo Bejan e Zane (2012), um sistema de escoamento/fluxo real sempre apresentará imperfeições (dissipação de energia, por exemplo); contudo, o design deve distribuir estas imperfeições de modo a facilitar o escoamento.

O método Design Construtal consiste em aplicar a Lei Construtal para prever o design que melhor distribui as imperfeições do sistema (ROCHA; LORENTE; BEJAN, 2017). Para tal, é preciso identificar o sistema estudado e o que flui através dele, bem como definir o que significa, para este sistema, facilitar o escoamento/fluxo. A partir disso, são identificadas as restrições do problema e os graus de liberdade e, por fim, obtém-se qual geometria proporciona melhor desempenho. Este método tem sido aplicado em diversas áreas, são alguns exemplos:

- a) O design ótimo de um trocador de calor por condução para componentes eletrônicos foi obtido em Bejan (1997a);

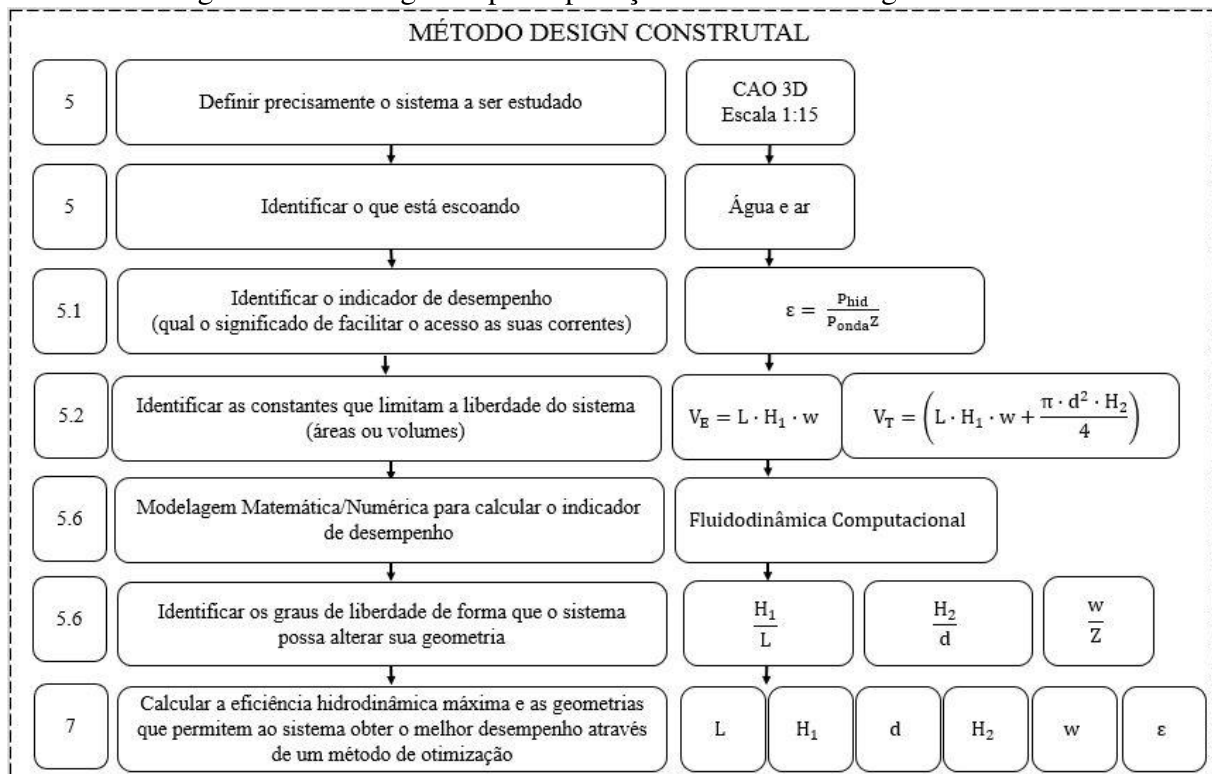
- b) A resistência térmica global entre um sólido e uma cavidade foi minimizada através do Design Construtal em Rocha et al. (2010);
- c) O surgimento, design e evolução das cidades foi previsto em Bejan (1996);
- d) Em Bejan (1997b), através da Lei Construtal, uma teoria comum foi obtida para diferentes processos cíclicos em animais, como a respiração e circulação sanguínea;
- e) O *ranking* das Universidades dos Estados Unidos da América (EUA), que mantém-se praticamente inalterado ao longo dos anos, é explicado através da Lei Construtal em Bejan (2007);
- f) Em Lorente e Bejan (2010), os autores mostraram que a hierarquia surge espontaneamente nos sistemas de escoamento na superfície terrestre (rios, movimento de animais e seres humanos, transporte), compondo sistemas vascularizados;

Portanto, o método *Construtal Design* pode ser aplicado para prever o design dos escoamentos, desde que se conheça o que está escoando, quais as restrições do problema e o que significa facilitar o acesso para dado sistema. Na engenharia, especialmente, este método tem sido aplicado para estudo geométrico de problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor.

5 METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente trabalho consiste na análise geométrica de um dispositivo CAO em escala de laboratório, através do método Design Construtal (descrito no Capítulo 4). O modelo matemático é resolvido e simulado numericamente por meio de CFD. As etapas da metodologia são sumarizadas na Figura 15, com as respectivas seções nas quais são apresentadas.

Figura 15 – Fluxograma para aplicação do método Design Construtal



Fonte: Adaptada de Razera et al. (2018).

O sistema a ser estudado é um conversor CAO tridimensional fixo, em escala 1:15, inserido em um tanque de ondas numérico e submetido a ondas regulares de Stokes de 2^a ordem. O tanque de ondas numérico tem como base o canal de ondas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), descrito no Anexo A. No modelo computacional, foi considerado escoamento de ar e água ao longo do sistema.

5.1 Indicadores de Desempenho

Neste trabalho, foi utilizado como indicador de desempenho para o método Design Construtal a eficiência hidrodinâmica, definida pela razão entre a potência absorvida e a potência incidente associada ao clima de ondas.

Brendmo, Falnes e Lillebekken (1996) mostraram que o movimento da superfície de água no interior do conversor pode ser tratado como um pistão plano movendo-se verticalmente com boa aproximação física, quando a largura da câmara é suficientemente menor que o comprimento de onda. Para uma superfície livre oscilando verticalmente ao longo do eixo y , a potência hidropneumática pode ser escrita por:

$$P_{\text{hid}} = \frac{A}{T} \int_t^{t+T} p(t) v_y(t) dt \quad (5.1)$$

onde A é a área da chaminé, $p(t)$ e $v_y(t)$ são, respectivamente, pressão e componente vertical da velocidade de ar através da chaminé.

A densidade de potência incidente P_{onda} , em W/m , associada ao clima de ondas local, é dada por (GREAVES; IGLESIAS, 2018):

$$P_{\text{onda}} = \frac{\rho g A^2 \omega}{4k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (5.2)$$

onde ρ é a massa específica da água.

Portanto, a eficiência hidrodinâmica ε do dispositivo CAO é dada por (GREAVES; IGLESIAS, 2018):

$$\varepsilon = \frac{P_{\text{hid}}}{P_{\text{onda}} Z} \quad (5.3)$$

onde Z é a largura do tanque de ondas numérico.

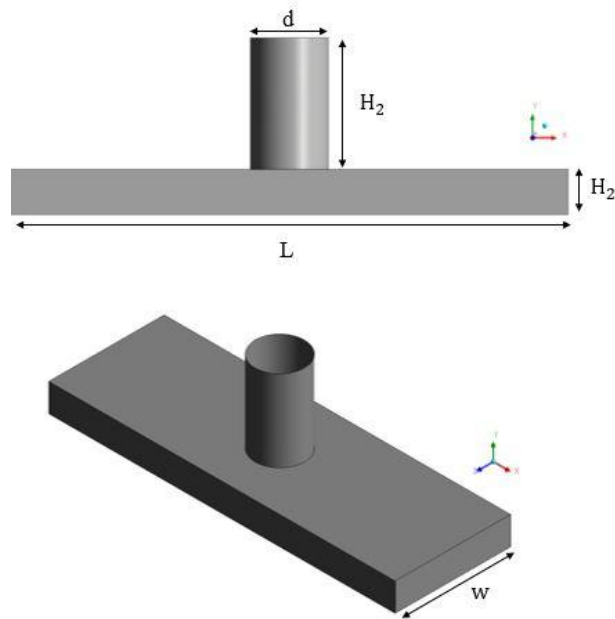
Além da eficiência hidrodinâmica, parâmetros como amplitude de velocidade $|v_{\text{max}} - v_{\text{min}}|$ e amplitude de pressão $|p_{\text{max}} - p_{\text{min}}|$ também podem ser adotados para análise do comportamento hidrodinâmico do dispositivo.

5.2 Identificação das Constantes e Graus de Liberdade

O conversor de energia das ondas do tipo CAO, tridimensional em escala 1:15, mostrado na Figura 16, possui câmara retangular de comprimento L ao longo do eixo x , altura H_1 ao longo do eixo y , largura w ao longo do eixo z ; e chaminé cilíndrica de diâmetro d e altura H_2 .

Foram analisados os graus de liberdade: H_3/h (razão entre a imersão e a profundidade de água), H_1/L (razão entre altura e comprimento da câmara), w/Z (razão entre as larguras da câmara e do tanque de ondas numérico), H_2/d (razão entre altura e largura da chaminé).

Figura 16 – Dispositivo CAO em visão bidimensional



As restrições do problema são os volumes de entrada V_E e total V_T do dispositivo, dados por:

$$V_E = H_1 L w \quad (5.4)$$

$$V_T = H_1 L w + \frac{\pi d^2}{4} H_2 \quad (5.5)$$

Através destas equações, é possível obter as relações para L , H_1 , d e H_2 :

$$L = \left(\frac{V_E}{\left(\frac{H_1}{L} \right) w} \right)^{1/2} \quad (5.6)$$

$$H_1 = L \left(\frac{H_1}{L} \right) \quad (5.7)$$

$$d = \left(\frac{4(V_T - V_E)}{\pi \left(\frac{H_2}{d} \right)} \right)^{1/3} \quad (5.8)$$

$$H_2 = d \left(\frac{H_2}{d} \right) \quad (5.9)$$

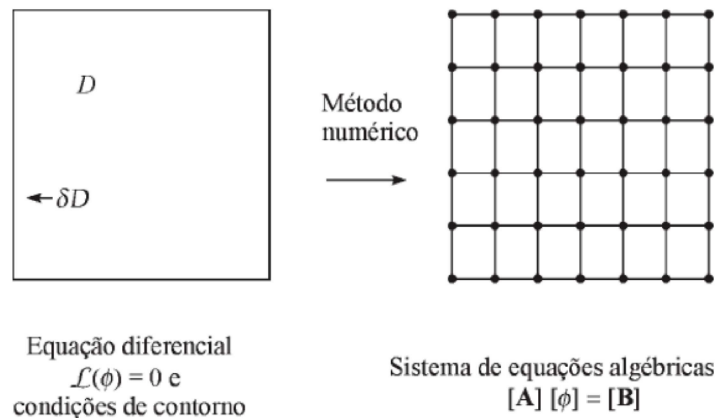
Seguindo as recomendações de Gomes (2014), foram utilizados como parâmetros iniciais $L = \lambda/2$, $H_1 = 2H$, $d \approx 0,14L$ e $H_2 \approx 3 H_1$. Deste modo, o volume de entrada e o volume total adotados foram, respectivamente, $V_E = 0,16 \text{ m}^3$ e $V_T = 0,18 \text{ m}^3$.

5.3 Modelo Matemático e Numérico

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) consiste na análise de um sistema envolvendo mecânica dos fluidos e transferência de calor através de simulação computacional (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Esta ferramenta é utilizada para solução de problemas físicos onde não é possível obter uma solução analítica. Em suma, o método numérico transforma uma equação diferencial parcial em um sistema de equações algébricas, resolvidas para cada elemento discreto do domínio. Os métodos tradicionais são os Métodos de Diferenças Finitas (MDF), de Volumes Finitos (MVF) e de Elementos Finitos (MEF), diferindo entre si pela maneira como as variáveis do escoamento são aproximadas (MALISKA, 2004).

Foi utilizado o pacote comercial Fluent R2 (2019), da empresa ANSYS®, que utiliza o Método dos Volumes Finitos para solução das equações de balanço de massa, conservação da quantidade de movimento e energia. Neste método, o domínio computacional é discretizado em volumes elementares, e equações algébricas aproximadas são obtidas pela conservação das quantidades físicas que atravessam cada volume elementar, como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Método numérico



Fonte: Maliska (2004).

No presente estudo, foram resolvidas as equações da conservação de massa (5.10) e quantidade de movimento (5.11) (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (5.11)$$

onde μ é a viscosidade e $\bar{\tau}$ é o tensor das tensões.

Para a solução das equações 5.10 e 5.11 no escoamento de água e ar ao longo do sistema, é utilizado o método *Volume of Fluid* (VOF), proposto por Hirt e Nichols (1981) para resolver escoamentos multifásicos de fluidos imiscíveis. Neste modelo, cada fase é tratada em termos de fração volumétrica $0 \ll \alpha \ll 1$, satisfazendo $\sum_{i=1}^i \alpha_i = 1$ para cada volume de controle.

Para o problema do dispositivo CAO, onde há escoamento de ar e água ao longo do domínio, a soma da fração volumétrica de ar e água, em cada volume de controle, deve satisfazer:

$$\alpha_{\text{ar}} + \alpha_{\text{água}} = 1 \quad (5.12)$$

Para cada volume elementar, as propriedades físicas ρ e μ dos fluidos podem ser expressas em termos de fração volumétrica:

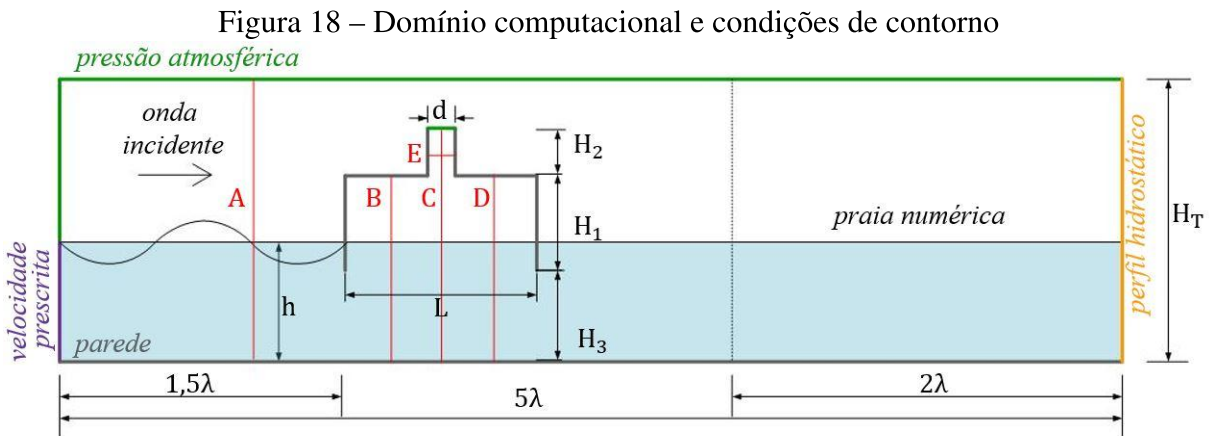
$$\rho = \alpha_{\text{água}}\rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}}\rho_{\text{ar}} \quad (5.13)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}}\mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}}\mu_{\text{ar}} \quad (5.14)$$

Deste modo, a Equação 5.10 pode ser calculada para ambos fluidos, da seguinte forma:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \quad (5.15)$$

O domínio computacional, mostrado na Figura 18, possui comprimento $X = 5\lambda$, altura $Y = H_1 + H_2 + H_3 + H$ e largura $Z = 1$ m.



Na extremidade esquerda, indicada em cor violeta na Figura 18, é utilizada a condição de contorno de velocidade prescrita, dada pelas equações apresentadas na Tabela 5. Na extre-

midade superior esquerda, superfície superior do tanque e na saída da chaminé, indicadas em verde na Figura 18, é aplicada condição de pressão atmosférica. No fundo, nas paredes laterais do tanque de ondas e nas paredes do dispositivo CAO, indicadas em cinza na Figura 18, é aplicada condição cinemática de não deslizamento e impermeabilidade. Na extremidade direita do tanque, indicada em laranja, é aplicada condição de perfil hidrostático. Entre $3\lambda \leq x \leq 5\lambda$, foi inserida uma região de praia numérica para reduzir reflexões no interior do tanque. Esta região é um sumidouro S na equação da conservação da quantidade de movimento, dado por (ANSYS R2 (2019):

$$S = - \left[C_1 \rho V + \frac{1}{2} C_2 \rho |V|V \right] \left(1 - \frac{y - y_{sl}}{y_b - y_{sl}} \right) \left(\frac{x - x_s}{x_e - x_s} \right)^{1/2} \quad (5.16)$$

Segundo estudo realizado por Lisboa, Teixeira e Didier (2017), os coeficientes C_1 e C_2 devem ser igual a, respectivamente, 20 e 0.

Na Tabela 6 são apresentados os métodos de solução utilizados para aproximação das equações algébricas.

Tabela 6 – Métodos de solução

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

As sondas de medição A, B, C e D, indicadas em vermelho na Figura 18, são planos retangulares perpendiculares à direção de propagação de onda que medem a posição vertical da superfície de água. Na sonda E, são medidos os valores de pressão e velocidade vertical do ar através da chaminé.

6 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A verificação do modelo numérico tem como objetivo analisar se o código computacional está calculando corretamente o modelo matemático selecionado, ao passo que a validação avalia se o modelo escolhido é apropriado para descrever o fenômeno físico estudado (ENGINEERS, 2009).

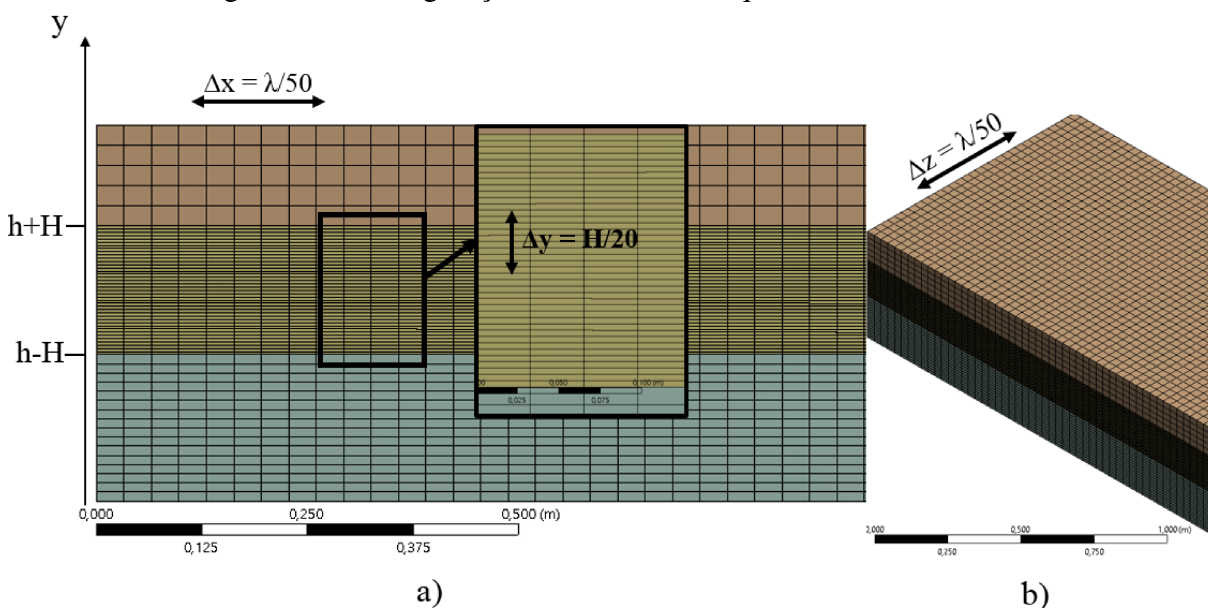
Para o modelo VOF, estes procedimentos são realizados em duas etapas: primeiro, a verificação e a validação da geração da onda no tanque de ondas numérico (sem o dispositivo inserido no domínio) e, após, a verificação e validação do escoamento de ar e água através do dispositivo CAO (GOMES, 2014).

Para o tanque de ondas, os resultados numéricos foram comparados aos resultados analíticos e experimentais, considerando um regime regular de ondas Stokes de 2ª ordem. Já a verificação e validação do modelo considerando o dispositivo CAO foram realizadas através do *Grid Convergence Index* (GCI) - Índice de Convergência de Malha, e dos resultados experimentais apresentados por Ning et al. (2016).

6.1 Verificação e Validação do Tanque de Ondas Numérico

O tanque de ondas numérico, sem o conversor inserido, tem dimensões $X = 5\lambda$, $Y = h + 2H$ e $Z = 1$ m. O refino de malha é realizado na região próxima à superfície livre de água, onde a variação da velocidade é mais significativa, conforme mostra na Figura 19. Esta região é definida entre $y = h + H$ e $y = h - H$. As dimensões dos elementos da malha na região de refino são $\Delta x = \Delta z = \lambda/50$ e $\Delta y = H/20$, de acordo com as recomendações de Liu, Hyun e Hong (2011).

Figura 19 – Configuração da malha no tanque de ondas numérico



Conforme realizado em Lisboa, Teixeira e Didier (2017) e Dai et al. (2019), a discretização temporal (passo de tempo) foi determinada através do critério de Courant-Fridrichs-Lewy (CFL), dado por:

$$\text{CFL} = U \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (6.1)$$

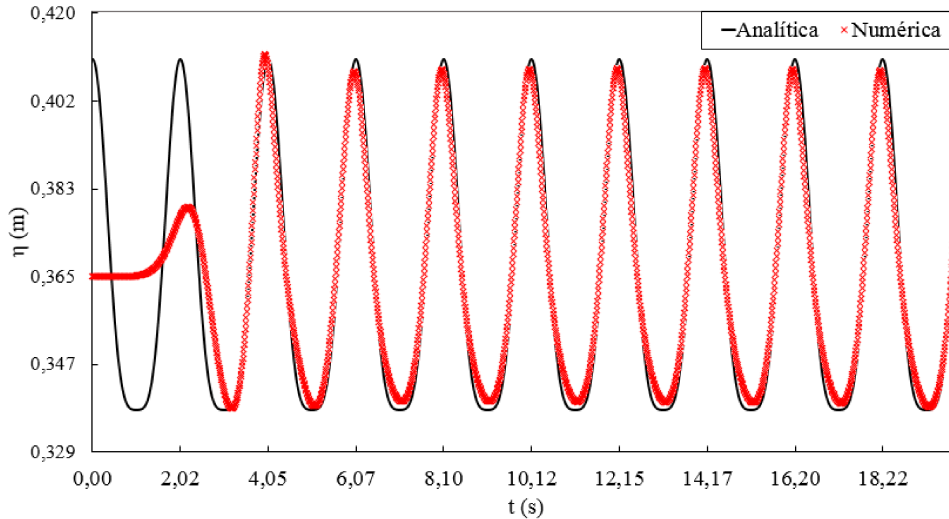
onde U é a velocidade do escoamento e $\text{CFL} < 1$. Para o presente estudo, a velocidade do escoamento pode ser substituída pela celeridade da onda, dada pela Equação 3.2. Sendo $\Delta x = \lambda/50$, a Equação 6.1 é reescrita na forma:

$$\Delta t = \text{CFL} \frac{T}{50} \quad (6.2)$$

Seguindo as recomendações realizadas por Lisboa, Teixeira e Didier (2017) e Dai et al. (2019), foi utilizado $\text{CFL} = 0,25$.

Na Figura 20, são apresentados os resultados numéricos para a elevação de superfície livre $\eta(x,t)$, em comparação à solução analítica para uma onda Stokes de 2ª ordem (ver Tabela 5), com $T = 2,022$ s, $H = 0,073$ m e $h = 0,365$ m. É possível observar que o comportamento dos resultados numéricos assemelha-se à solução analítica, principalmente após a estabilização da onda, em $\Delta t = 2T$.

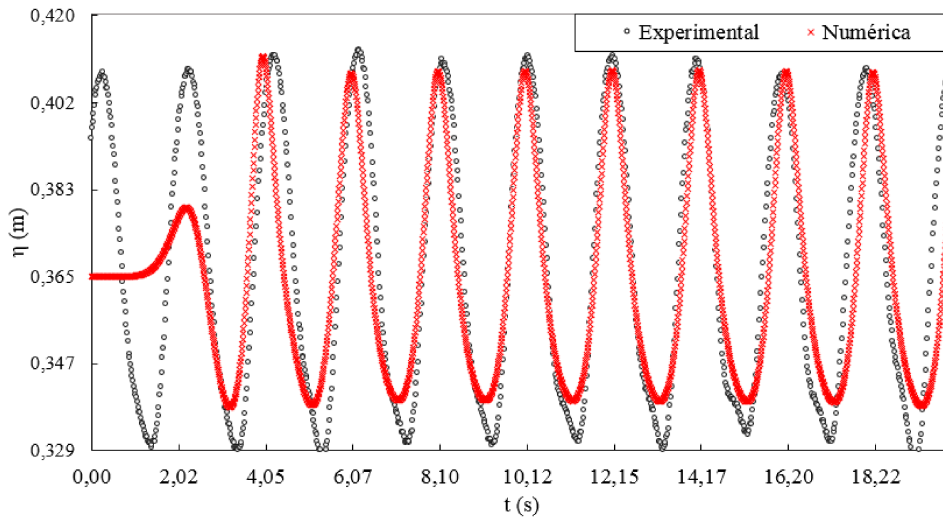
Figura 20 – Elevação de superfície livre $\eta(x,t)$ numérica em comparação à solução analítica, em $x = \lambda$.



A verificação foi realizada no intervalo $2T \leq \Delta t \leq 10T$, a partir das diferenças absoluta ($\Delta\eta_{\text{abs}}$) e relativa ($\Delta\eta_{\text{rel}}$) entre a elevação de superfície analítica e numérica, para cada *time-step*. As diferenças máximas obtidas foram de $\Delta\eta_{\text{abs}} = 1,03 \times 10^{-2}$ m e $\Delta\eta_{\text{rel}} = 2,59\%$. Na média, estas diferenças são $\Delta\eta_{\text{abs}} = 3,66 \times 10^{-3}$ m e $\Delta\eta_{\text{rel}} = 0,99\%$.

Para a validação do tanque de ondas numérico, foram utilizados os resultados experimentais obtidos no canal de ondas do IPH, descritos no Anexo A, mostrados na Figura 21.

Figura 21 – Elevação de superfície livre numérica $\eta(x,t)$ em comparação a resultados experimentais, em $x = \lambda$.



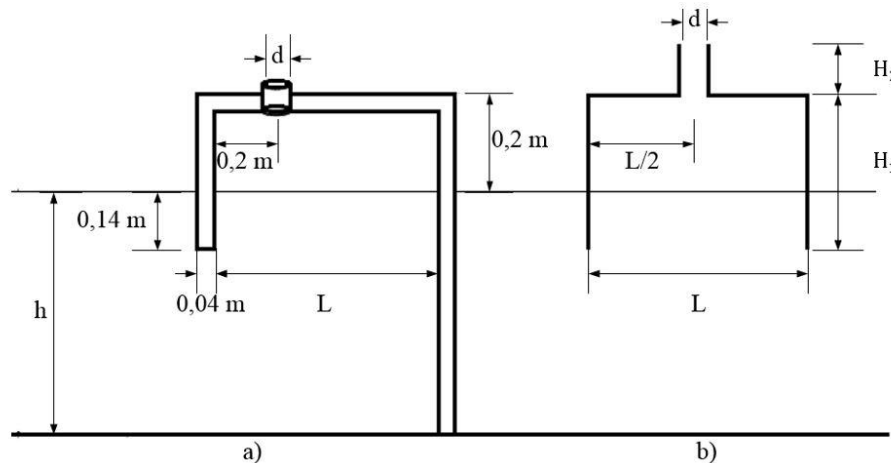
Fonte: Elaborada pela autora.

No intervalo entre $2T \leq \Delta t \leq 10T$, as máximas diferenças absoluta e relativa entre a elevação de superfície experimental e numérica foram de, respectivamente, $\Delta\eta_{\text{abs}} = 3,66 \times 10^{-2}$ m e $\Delta\eta_{\text{rel}} = 8,97\%$. Na média, estes valores são de $\Delta\eta_{\text{abs}} = 1,05 \times 10^{-2}$ m e $\Delta\eta_{\text{rel}} = 2,82\%$.

6.2 Verificação e Validação com dispositivo CAO inserido

A verificação e validação do escoamento de ar e água no interior do dispositivo CAO foram realizadas a partir dos resultados experimentais apresentados por Ning et al. (2016), que também estudaram um dispositivo de câmara retangular e chaminé cilíndrica. Para tal, foram adotadas as características de ondas e configurações geométricas utilizadas pelos autores, porém, com simplificações para o presente estudo.

Figura 22 – Modelo do dispositivo CAO, com base em Ning et al. (2016).



Na Figura 22a, são indicadas as dimensões utilizadas por Ning et al. (2016), e na Figura 22b, as respectivas simplificações geométricas realizadas no presente estudo. As dimensões indicadas valem $L = 0,55$ m, $H_1 = 0,34$ m, $d = 0,04$ m, $H_2 = 0,1$ m, $w = 0,8$ m e $h = 0,8$ m.

Na câmara (Figura 23), os elementos da malha têm tamanhos $\Delta x = \Delta z = \lambda / 100$ e $\Delta y = H/20$, e na chaminé (Figura 24), os elementos têm dimensões $H/20$ em todas as direções. Além disso, a chaminé possui refino na região de parede, como mostra a Figura 24b.

Figura 23 – Configuração da malha na região da câmara do dispositivo CAO.

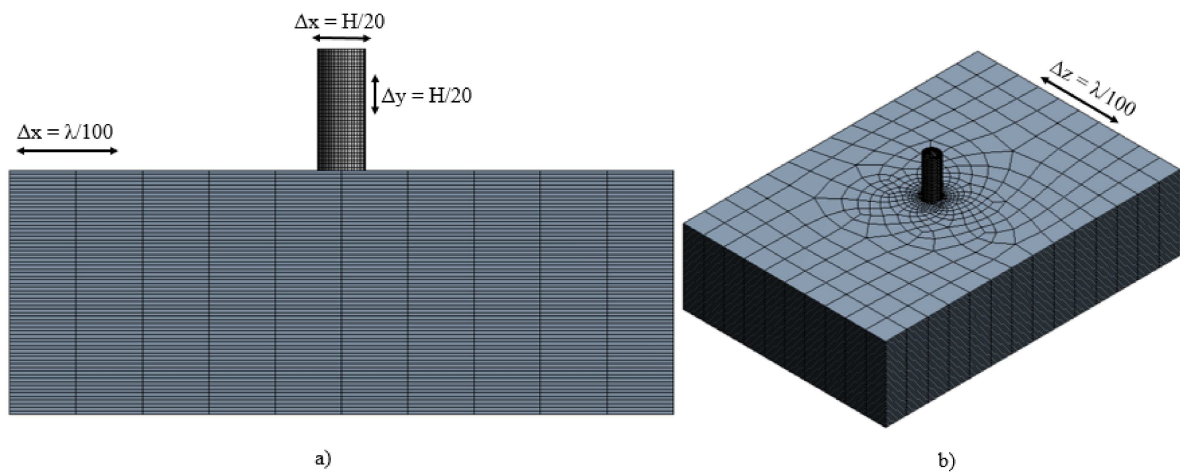
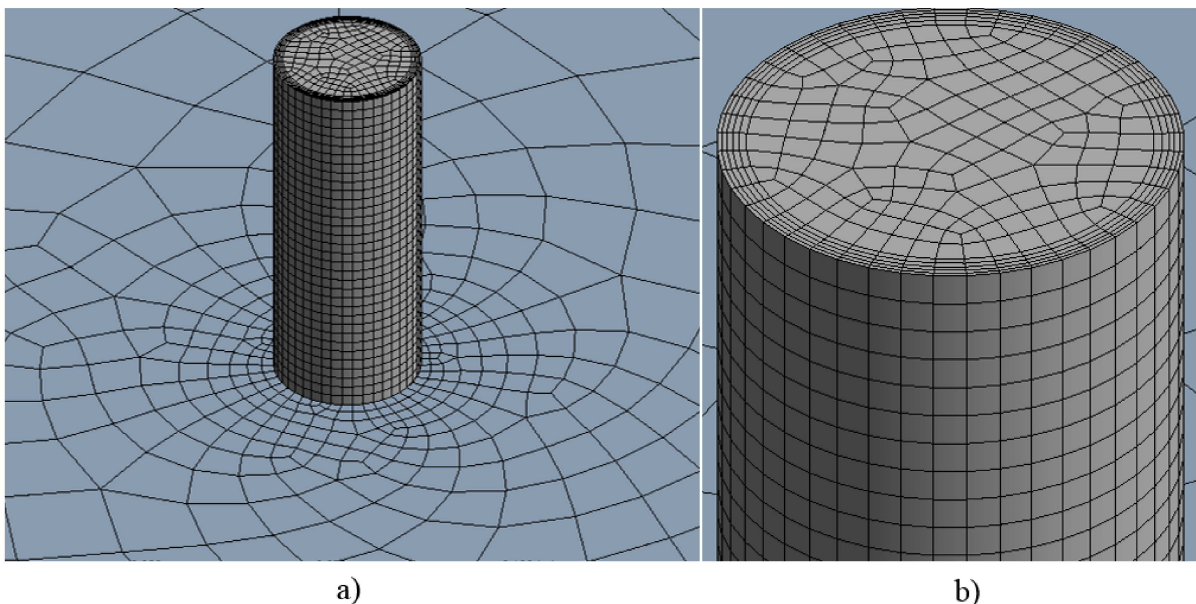


Figura 24 – Configuração da malha na região da chaminé do dispositivo CAO .



Para a verificação da solução numérica, foi utilizado o *Grid Convergence Index* (GCI) - Índice de Convergência de Malha, conforme proposto em Engineers (2009). Para realização deste procedimento, foi determinado o tamanho significativo do elemento de malha que, um domínio tridimensional, é dado por:

$$s = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{1/3} \quad (6.3)$$

onde N é o número de volumes elementares e ΔV é o volume total do domínio.

As grandezas físicas para as quais foi determinado o GCI foram elevação máxima de superfície livre η_{\max} no interior da câmara e pressão máxima p_{\max} através da chaminé (conforme planos indicados na Figura 18). Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Índice de Convergência de Malha - GCI, para $\lambda = 5,984$ m e $H = 0,06$ m

	Nº de elementos	η_{\max} (m)	p_{\max} (Pa)
N_3	32001	0,019	230,449
N_2	145737	0,018	178,652
N_1	359282	0,018	179,846
GCI		2,968%	0,094%

Fonte: Elaborada pela autora.

Para a validação do modelo, foram comparados os resultados para elevação máxima de superfície livre $|\eta|_{\max}$ (Figura 25), pressão máxima $|p|_{\max}$ (Figura 26) e eficiência hidrodinâmica ε (Figura 27), em diferentes períodos e comprimentos de onda, mantendo constante a altura $H = 0,06$ m.

O maior erro relativo entre os resultados numéricos e experimentais para $|\eta|_{\max}$ foi de 8,03%; na média, este valor é de 4,04%. Para $|p|_{\max}$, estes valores são 16,53% e 7,71%. Para ε , 10,32% e 6,94%.

Figura 25 – Elevação máxima de superfície livre $|\eta|_{\max}$, em comparação aos resultados de Ning et al. (2016)

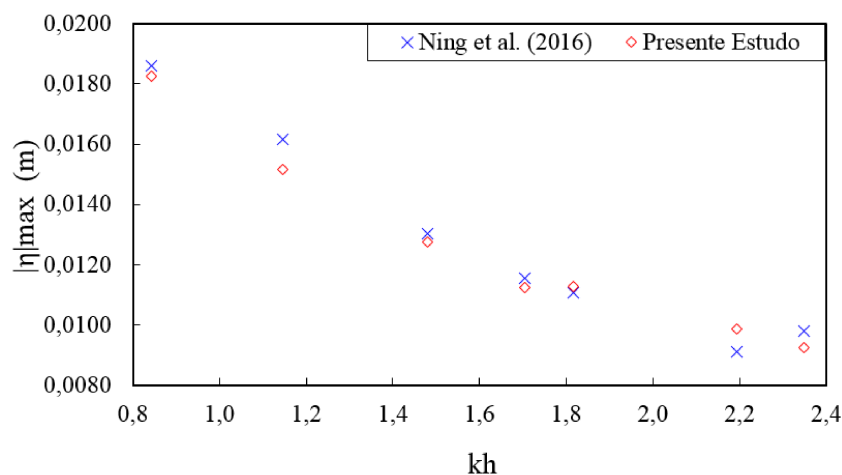


Figura 26 – Pressão máxima $|p|_{\max}$, em comparação aos resultados de Ning et al. (2016)

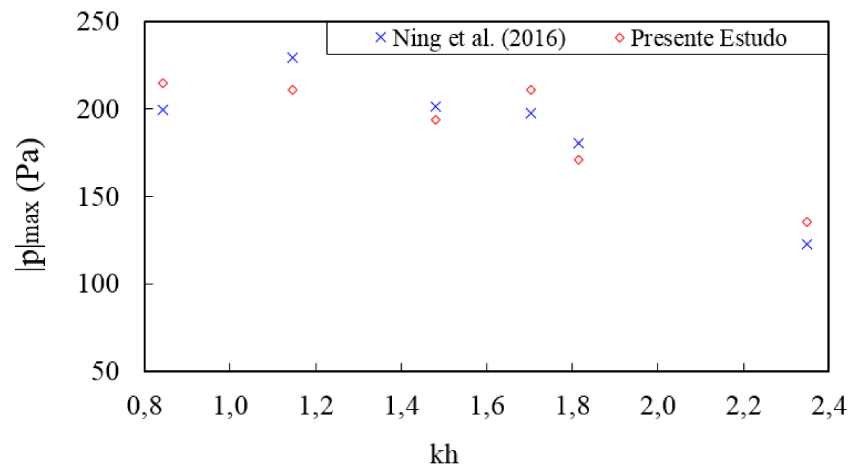
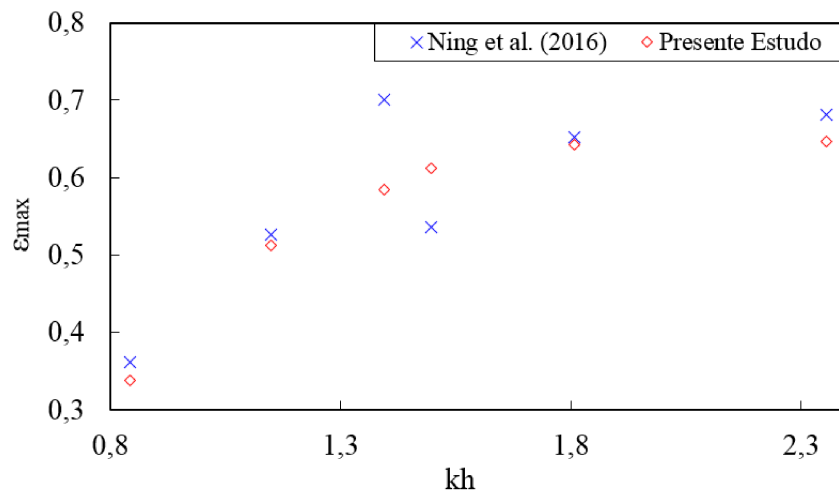


Figura 27 – Eficiência ε , em comparação aos resultados de Ning et al. (2016)



Os erros encontrados podem ser explicados pelas simplificações geométricas realizadas, indicadas na Figura 22. Além disso, os métodos de medição utilizados nos procedimentos experimentais e numéricos diferem substancialmente entre si. Por exemplo, no modelo experimental, a pressão de ar é medida através de dois sensores posicionados simetricamente na câmara, ao passo que no modelo numérico, a pressão é extraída de um plano normal à chaminé (Figura 18).

Feitas estas considerações, as diferenças entre os resultados numéricos e experimentais estão de acordo com o esperado. Portanto, para o presente estudo, considera-se que o modelo numérico representa satisfatoriamente o fenômeno físico estudado.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para estudo do dispositivo CAO, foram adotadas características do clima de ondas apresentado em Lisboa, Teixeira e Fortes (2017) para a cidade de São José do Norte - RS, aplicadas à escala 1:15. Segundo Chakrabarti (2005), para ondas de gravidade, é possível satisfazer a similaridade hidrodinâmica utilizando o número de Froude, que representa a razão entre as forças inerciais e gravitacionais, dado por:

$$Fr = \frac{u^2}{gD} \quad (7.1)$$

onde u é a velocidade do escoamento e D é o comprimento característico.

Com o intuito de, futuramente, dar continuidade ao estudo experimentalmente, os valores determinados pelas similaridade de Froude foram adaptados para as possibilidades de reprodução no canal de ondas do IPH, quem tem configuração descrita no Anexo A. A Tabela 8 apresenta as características da onda estudada em escala real e de laboratório, e as respectivas adaptações na última coluna.

Tabela 8 – Características da onda estudada

	Escala Real	Fator de Escala	Escala de Laboratório	IPH
T (s)	7,500	$\beta^{1/2}$	1,940	2,022
H (m)	1,000	β	0,067	0,073
h (m)	14,00	β	0,933	0,365
λ (m)	73,400	β	4,890	3,601

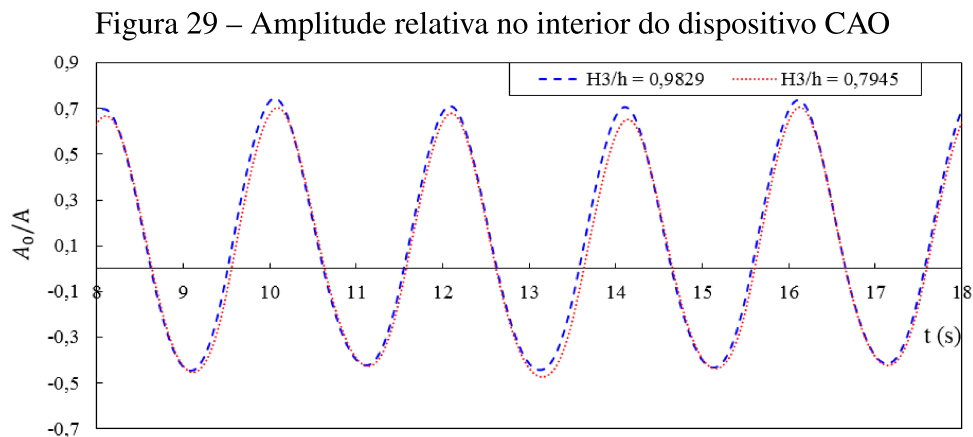
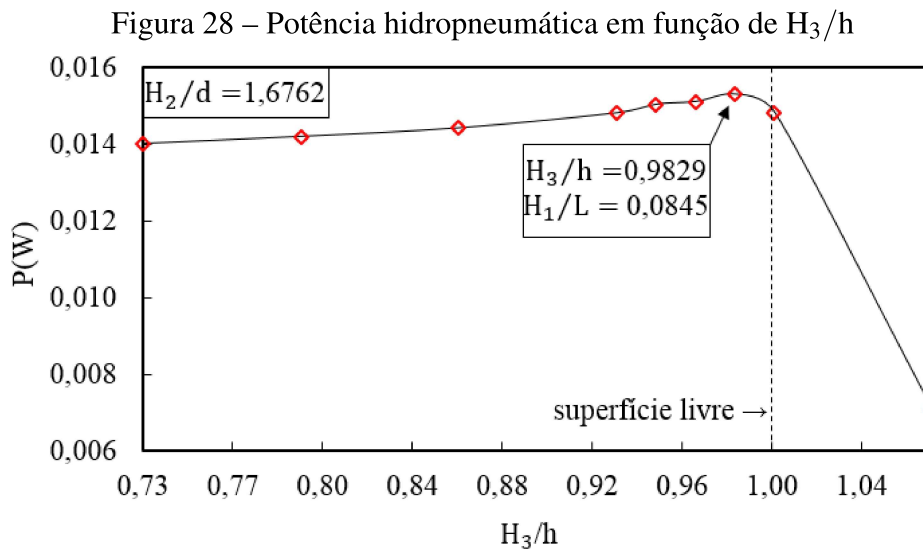
Para estes valores de período, altura e profundidade, a teoria de ondas mais adequada é Stokes de 2ª ordem, conforme sugere a Figura 14. Para estas características, a densidade de potência, determinada pela Equação 5.2, é de 10,29 W/m. De acordo com a Equação 2.1, para $\lambda = 3,601$ m, a potência máxima que pode ser extraída pelo dispositivo de absorção pontual é de, aproximadamente, 5,9 W.

7.1 Análise do nível de imersão H_3/h

Inicialmente foi analisado o nível de imersão H_3/h que fornece melhor desempenho para o dispositivo CAO. Para esta análise, mantiveram-se fixos os valores $L = 1,801$ m, $H_2 = 0,424$ m e $d = 0,253$ m, conforme recomendações de Gomes (2014). Os valores de H_1 variaram em função de H_3 .

A Figura 28 mostra a potência hidrodinâmica absorvida pelo dispositivo, calculada pela Equação 5.1, para diferentes valores de H_3/h . Observa-se que a potência tende a aumentar quando $H_3/h \approx 1$, diminuindo significativamente quando $H_3/h > 1$. Para os casos analisados, a potência máxima foi obtida quando $H_3/h = 0,9829$. Além disso, a amplitude relativa (razão

entre a elevação de superfície livre de água no interior e no exterior da câmara) aumenta quando $H_3/h \approx 1$, conforme mostra a Figura 29.



Resultados semelhantes foram obtidos experimentalmente por Ning et al. (2016) e numericamente por Zhang, Zou e Greaves (2012), sugerindo que a potência absorvida aumenta quando $H_3 \approx h$.

Quando o nível de imersão aumenta ($H_3 \ll h$), uma maior massa de água penetra a câmara, podendo ocorrer a formação de ondas estacionárias a partir de reflexões laterais internas, fenômeno conhecido como *sloshing*. Segundo Evans e Porter (1995), este fenômeno deve ocorrer quando $L = n\lambda/2$. Resultados experimentais apresentados em Ning et al. (2016) apontaram que a eficiência do dispositivo tende a zero quando ondas estacionárias são formadas. Portanto, para evitar estas reflexões internas, o nível de imersão do dispositivo deve ser o menor possível, de modo a ainda captar oscilações da superfície livre de água.

No estudo numérico bidimensional realizado por Gomes (2014), recomenda-se que $h - 3H/4 \leq H_3 \leq h$. Conforme pode ser visto na Figura 28, a faixa de valores de H_3/h na qual

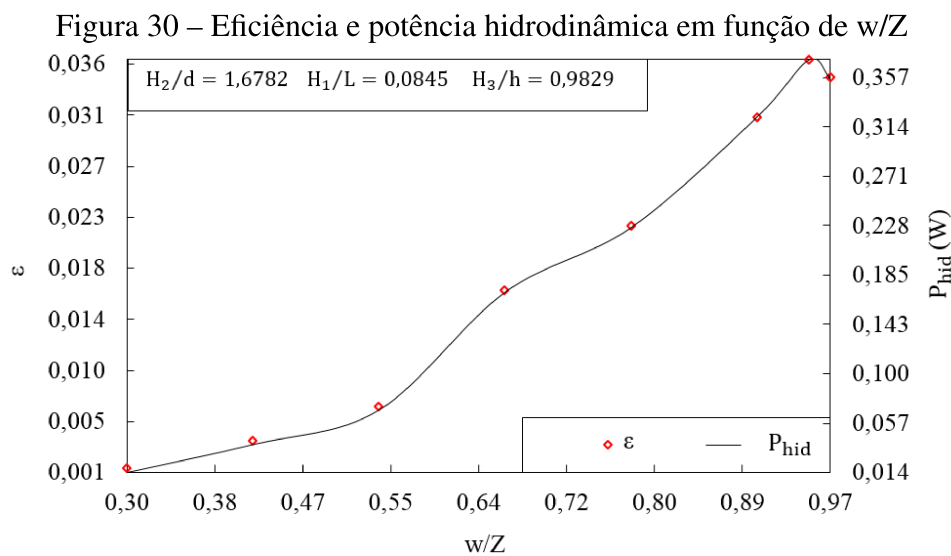
obtiveram-se os maiores valores de potência enquadrando-se na recomendação. Portanto, o valor $H_3/h = 0,9829$ será mantido fixo nos próximos estudos, bem como a razão $H_1/L = 0,0845$ associada a esta configuração geométrica.

7.2 Análise do grau de liberdade w/Z

Nesta etapa, foi estudada a influência da largura w , ao longo do eixo z , na performance do conversor CAO. Como o dispositivo está inserido em um tanque de ondas de dimensões finitas, adotou-se a razão w/Z , onde Z é a largura do tanque de ondas.

Mantiveram-se fixos os valores $H_3/h = 0,9829$, $H_1/L = 0,0845$ e $H_2/d = 1,6782$. Para cada valor de w/Z , o comprimento L e altura H_1 da câmara foram determinados pelas Equações 5.6 e 5.7, mantendo constante o volume de entrada e o volume total.

Os resultados apresentados na Figura 30 sugerem que a eficiência hidrodinâmica (calculada pela Equação 5.3) tende a aumentar conforme w/Z aumenta, diminuindo levemente quando $w/Z \approx 1$.



As Figuras 31, 32, 33 mostram o comportamento dos campos de velocidade e de pressão no interior do dispositivo para os casos $w/Z = 0,3000$ e $w/Z = 0,9000$, em instantes de compressão ($t = 5,0s$) e de decompressão ($t = 6,0s$) de ar.

Na Figuras 31a e 31b, observa-se que a velocidade através da chaminé é maior quando $w/Z = 0,9000$; conseqüentemente, também há regiões de maior recirculação de ar. Comparando os campos de pressão no interior da chaminé para os dois casos de w/Z na compressão (Figuras 32a e 32b), as variações são mais significativas quando $w/Z = 0,9000$, associadas às recirculações de ar observadas.

Contudo, os campos de pressão no interior da câmara hidropneumática (Figura 33) são praticamente simétricos em relação ao eixo x em ambos os casos, sugerindo que as diferenças observadas no campo de velocidade estão associadas mais fortemente ao comprimento L da

câmara e às dimensões da chaminé.

Figura 31 – Linhas de corrente para diferentes valores de w/Z

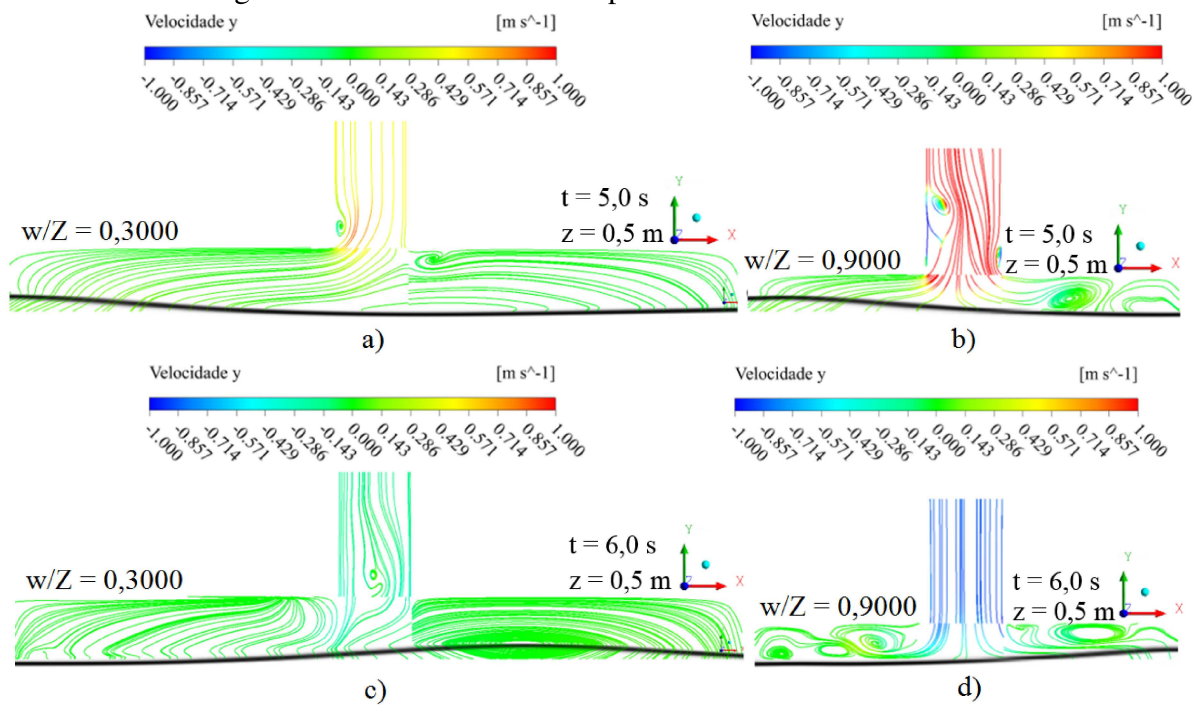


Figura 32 – Campo de pressão no interior chaminé, para diferentes valores de w/Z .

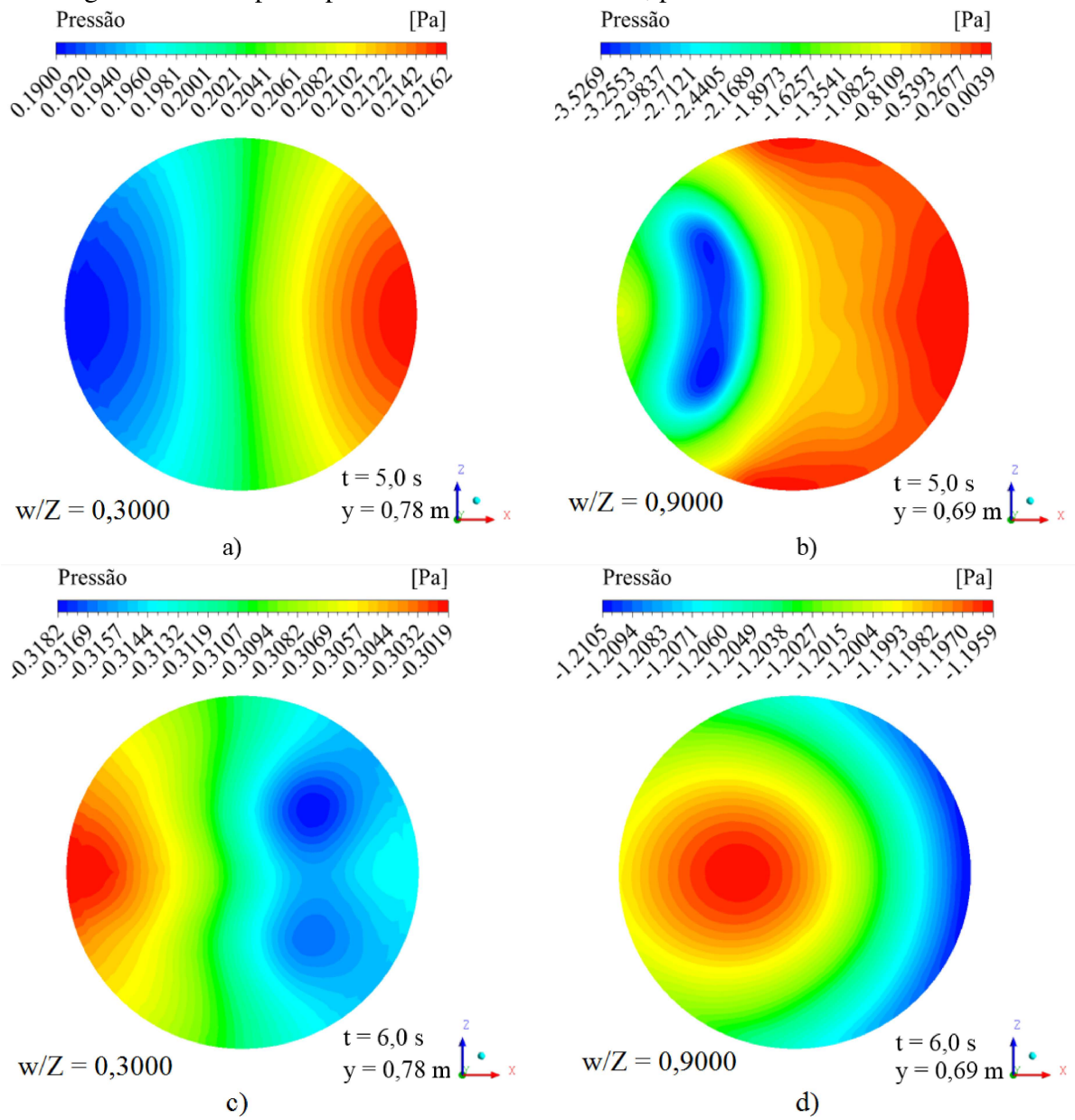
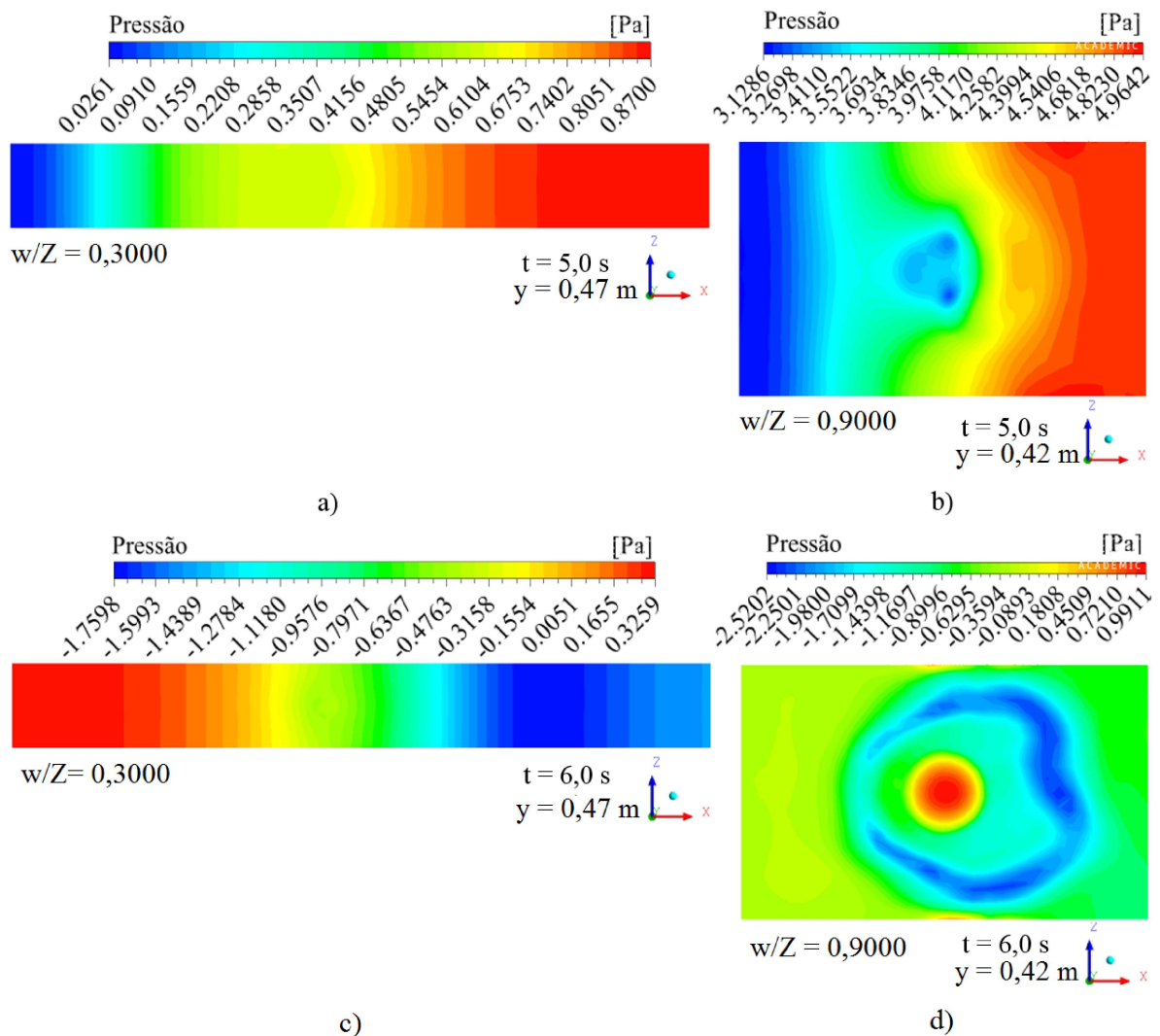


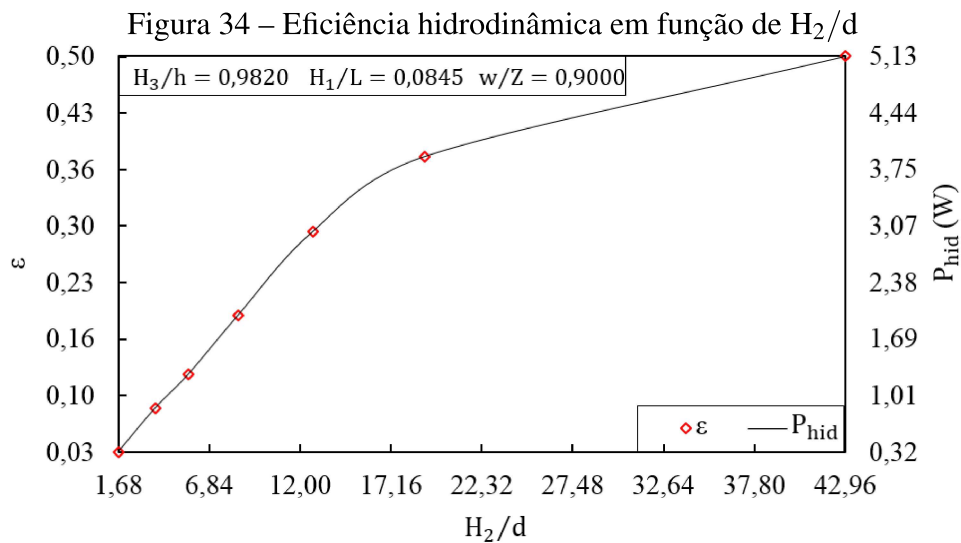
Figura 33 – Campo de pressão no interior da câmara hidropneumática, para diferentes valores de w/Z



7.3 Análise do grau de liberdade H_2/d

No estudo da influência da chaminé sobre eficiência hidrodinâmica, foram mantidos constantes os parâmetros $H_3/h = 0,9829$, $H_1/L = 0,0845$ e $w/Z = 0,9000$, e o grau de liberdade H_2/d foi variado. Para cada valor de H_2/d adotado, as dimensões H_2 e d foram determinadas pelas Equações 5.9 e 5.8, respectivamente.

Na Figura 34, é possível ver que a eficiência hidrodinâmica aumenta quando H_2/d aumenta, ou seja, quando $H_2 \gg d$.



Nas Figuras 35, 36, 37 são apresentados os campos de velocidade e de pressão no interior do conversor para os casos $H_2/d = 3,7715$ e $H_2/d = 42,9596$, em instantes de compressão ($t = 5,0s$) e de descompressão ($t = 6,0s$) de ar.

Observa-se que quando $H_2 \gg d$ (Figura 35b), a velocidade de ar através da chaminé aumenta. A comparação entre as Figuras 31b e 35b, mostra que a redução no diâmetro da chaminé aumenta o valores de velocidade sem que ocorram recirculações significativas de ar. Da mesma forma, o campo de pressão no interior da chaminé, mostrado na Figura 36, torna-se mais uniforme quando $H_2 \gg d$, tanto na compressão quanto na descompressão.

A Figura 38 mostra a amplitude de velocidade $|v_{max} - v_{min}|$ e de pressão $|p_{max} - p_{min}|$ para todos os casos analisados. Os valores aumentam mais significativamente a partir do caso 7, que corresponde ao início das variações em H_2/d , sugerindo forte influência da geometria da chaminé do desempenho do conversor.

A maior potência hidropneumática obtida foi de 5,13 W, quando $H_2/d = 42,9596$. Este valor aproxima-se da potência máxima teórica para o clima de onda estudado, determinada pela Equação 2.1, de 5,90 W. Para verificação deste valor, foram analisados mais duas configurações de H_2/d , apresentadas na Figura 39. Como pode ser visto, a potência hidropneumática atinge o valor máximo quando $H_2/d = 42,9596$ e diminui quando $H_2/d > 42,9596$, sugerindo que, para este clima de ondas, o dispositivo tem eficiência máxima, de aproximadamente 50%. Este valor está de acordo com o estudo teórico realizado por Evans (1978), para um dispositivo CAO de câmara retangular e chaminé cilíndrica, no qual foi obtido uma eficiência máxima de 50%.

Figura 35 – Linhas de corrente para diferentes valores de H_2/d

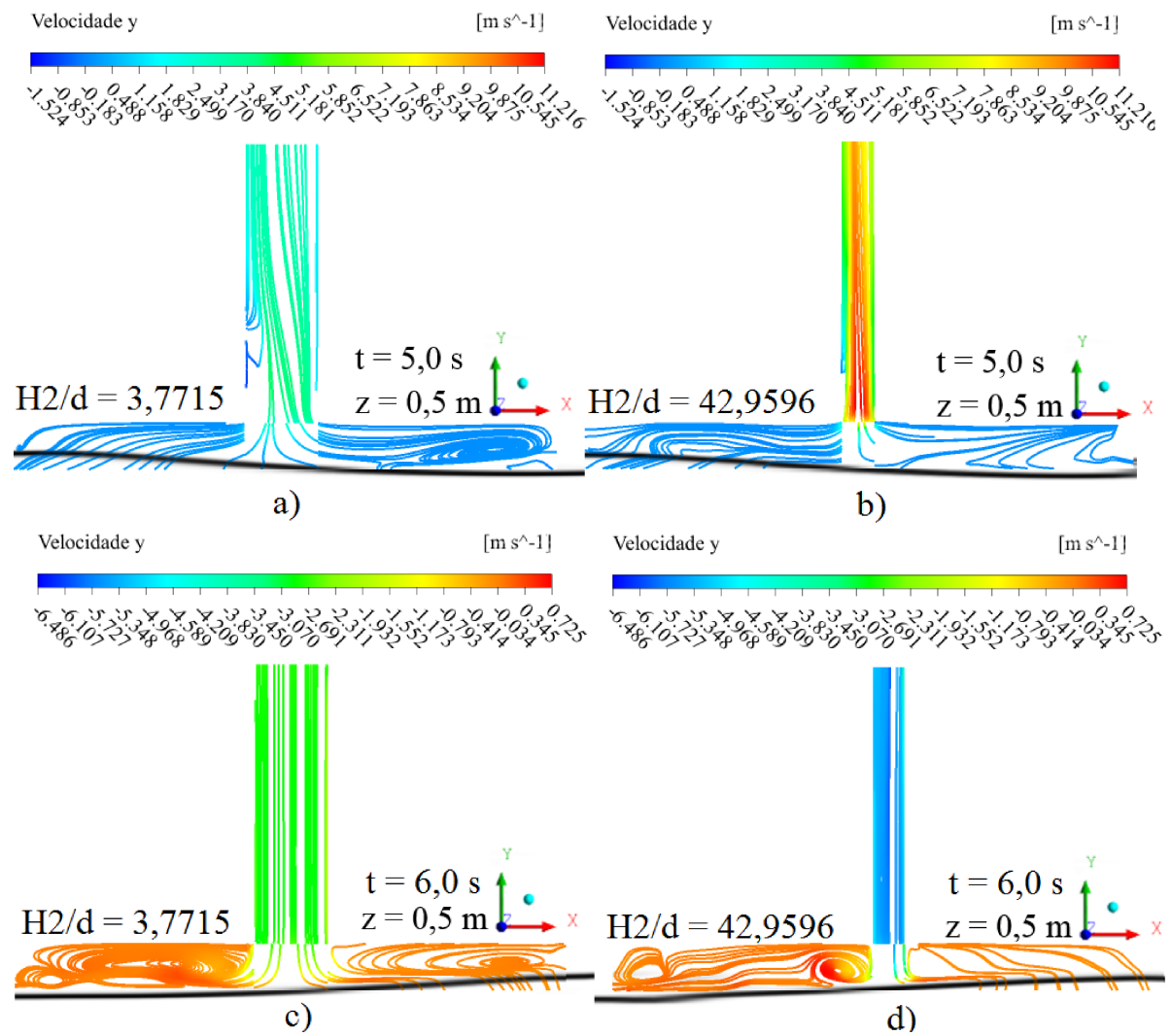


Figura 36 – Campo de pressão no interior chaminé, para diferentes valores de H_2/d

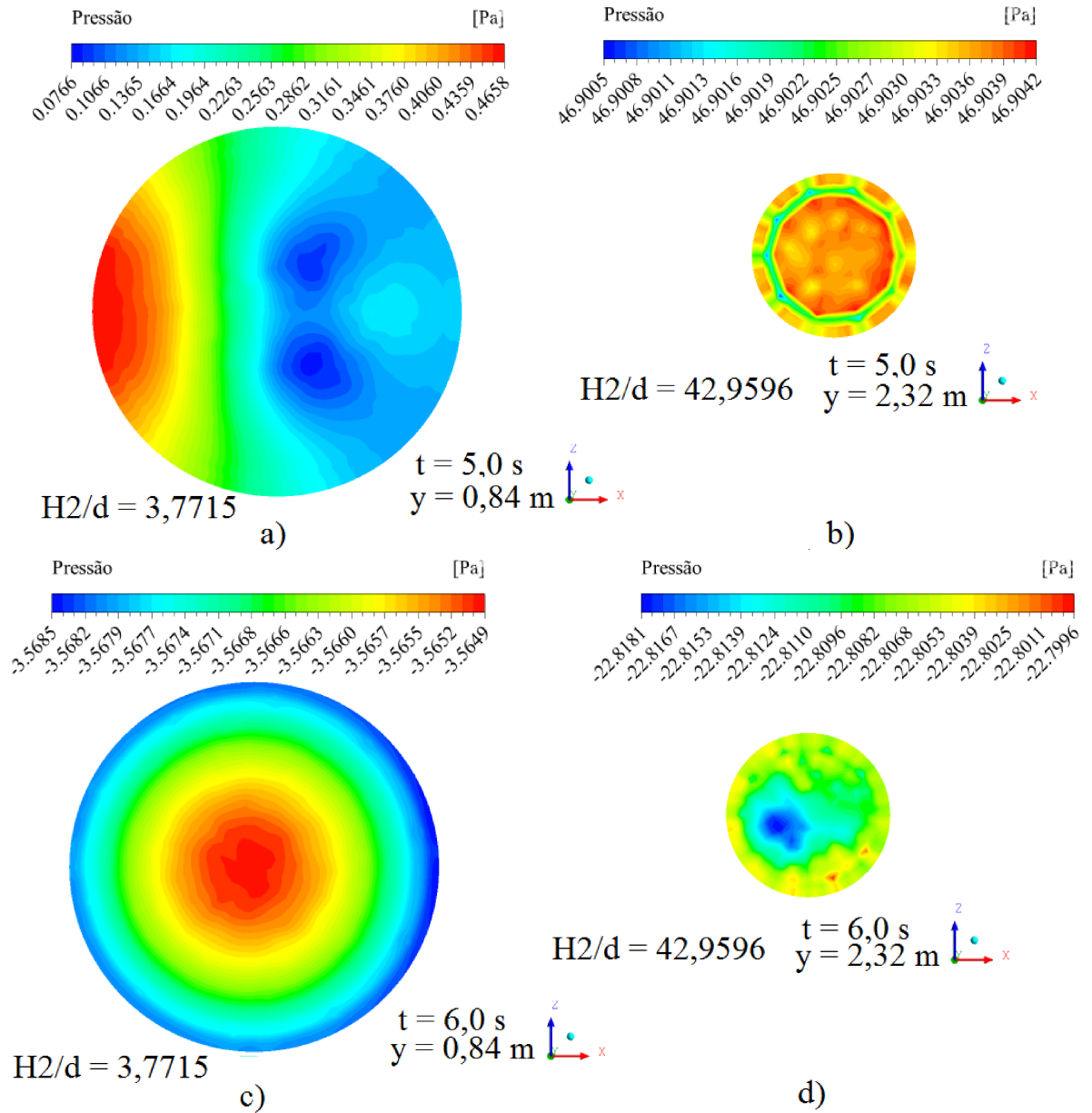


Figura 37 – Campo de pressão no interior da câmara hidropneumática, para diferentes valores de H_2/d

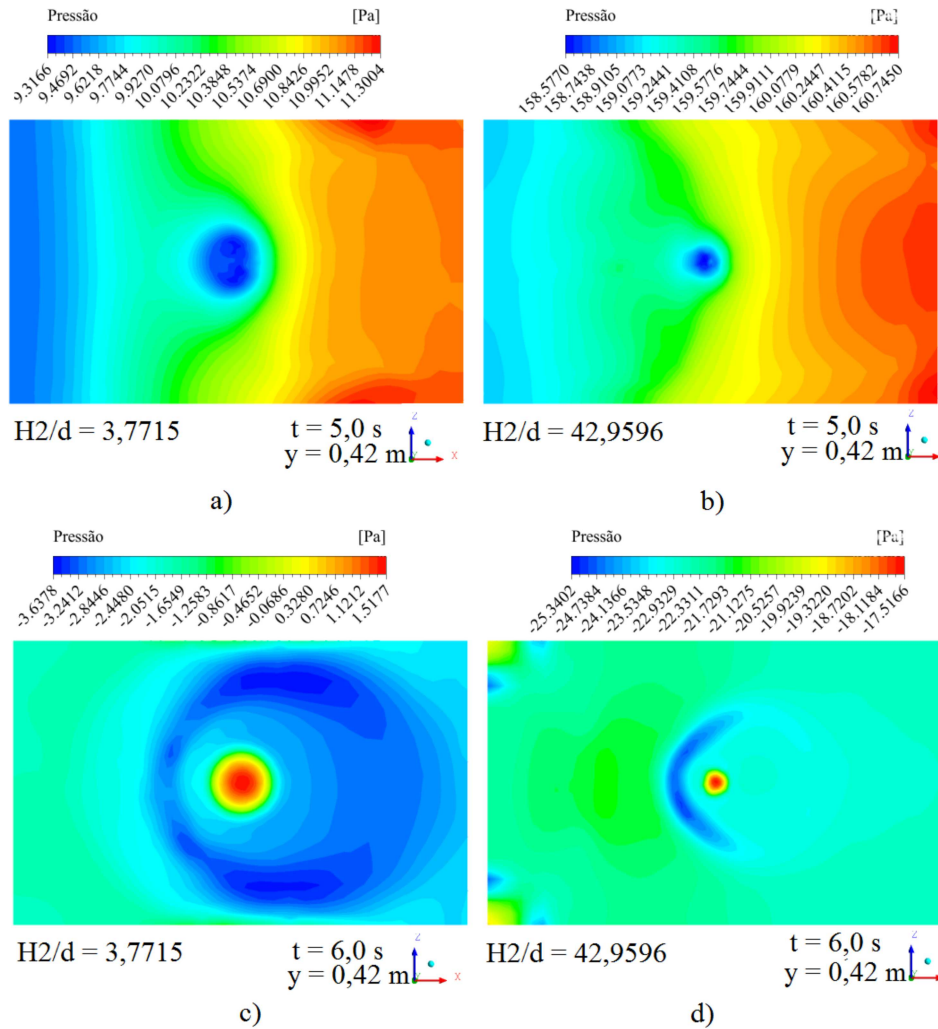


Figura 38 – Amplitude da velocidade e da pressão, para todos os casos analisados

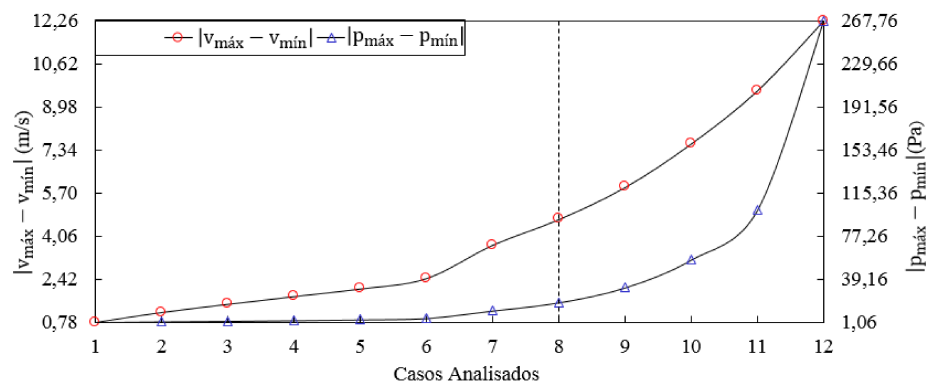
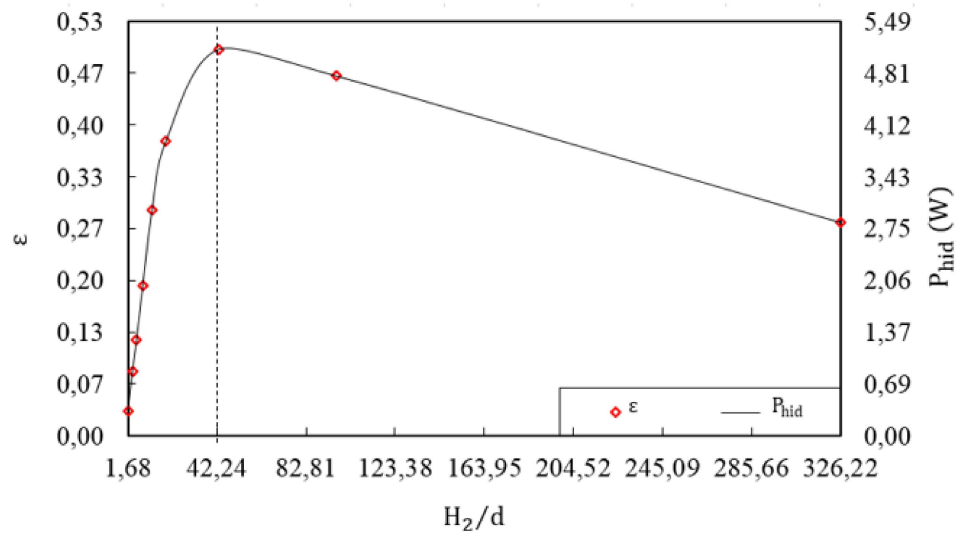


Figura 39 – Eficiência hidrodinâmica em função de H_2/d 

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O dispositivo CAO tridimensional, em escala 1:15, foi estudado através de simulação computacional. O modelo numérico foi verificado e validado através de resultados analíticos e experimentais, mostrando-se satisfatório para representar o escoamento de ar e água através do conversor CAO.

O método Design Construtal foi aplicado para análise geométrica do dispositivo, adotando-se o volume total e o volume de entrada como restrições do problema, e os parâmetros analisados foram H_3/h , w/Z e H_2/d .

Para os casos investigados, os maiores valores de eficiência hidrodinâmica foram obtidos quando $H_3 \approx h$, $w \approx Z$ e $H_2 \gg d$. A eficiência máxima foi obtida para os valores

O melhor desempenho quando $H_3 \approx h$, em concordância com a literatura existente, é explicado pela menor massa de água no interior do dispositivo CAO, evitando, portanto, reflexões internas e formação de ondas estacionárias.

Embora os resultados indiquem que a eficiência aumenta quando $w \approx Z$, os campos de pressão apresentaram simetria em relação ao eixo x, sugerindo que o desempenho hidrodinâmico está mais associado às outras características geométricas do conversor. Contudo, estes resultados não são conclusivos, uma vez que para todos os valores de w/Z analisados, $w \ll \lambda$. Portanto, ainda se faz necessário verificar se este comportamento é observado quando $w \approx \lambda$.

Os ganhos em eficiência mais significativos ocorreram para variações H_2/d , indicando forte influência da chaminé no desempenho do dispositivo. Aumento na velocidade de escoamento de ar, diminuição de recirculações internas e campos de pressão mais uniformes foram observados quando $H_2 \gg d$.

A menor eficiência encontrada foi 0,14%, para as configurações $w/z = 0,3000$ e $H_2/d = 1,6782$, e a maior eficiência foi de 49,85%, para $w/Z = 0,9000$ e $H_2/d = 42,9596$. Estes valores apontam a importância da geometria no desempenho do conversor CAO.

Com base nos resultados supracitados, considera-se que o objetivo principal do presente trabalho, de maximizar a eficiência hidrodinâmica de um dispositivo CAO, foi satisfatoriamente atendido. Além disso, as simulações tridimensionais permitiram avaliar o comportamento dos campos de pressão e de velocidade no interior do conversor.

Como proposta de continuidade do estudo, sugere-se:

- a) analisar outros valores de w/L , para avaliar se a simetria ao longo do eixo z se mantém quando $w \approx \lambda$;
- b) investigar o comportamento do dispositivo CAO para outros valores de H , λ e T , para obter a eficiência hidrodinâmica em um espectro de ondas;
- c) realizar estudos numéricos em outras escalas, para avaliar se efeitos de escala interferem na potência extraída.

REFERÊNCIAS

- BEJAN, A. Street network theory of organization in nature. **Journal of Advanced Transportation**, [S.l.], v. 30, n. 2, p. 85–107, 1996.
- 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. Theory of organization in nature: pulsating physiological processes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [S.l.], v. 40, n. 9, p. 2097–2104, 1997.
- BEJAN, A. WHY UNIVERSITY RANKINGS DO NOT CHANGE. **International Journal of Design and Nature**, [S.l.], v. 2, n. 4, p. 319–327, 2007.
- BEJAN, A.; ZANE, J. P. **Design in Nature**. 1st. ed. New York, NY: Random House, Inc., 2012.
- BHATTACHARYYA, R.; MCCORMICK, M. **Wave Energy Conversion**. [S.l.]: Elsevier Science Ltd, 2003. 187 p.
- BRENDMO, A.; FALNES, J.; LILLEBEKKEN, P. M. Linear modelling of oscillating water columns including viscous loss. **Applied Ocean Research**, [S.l.], v. 18, n. 2-3, p. 65–75, 1996.
- BRITO-MELO, A. et al. A 3D boundary element code for the analysis of OWC wave-power plants. In: NINTH INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE (VOLUME 1), 1999., 1999, Brest. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1999. v. I, p. 188–195.
- CHAKRABARTI, S. **Handbook of Offshore Engineering**. 1a. ed. Plainfield: Elsevier Ltd, 2005.
- CLÉMENT, A. H. Dynamic nonlinear response of OWC wave energy devices. **International Journal of Offshore and Polar Engineering**, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 154–159, 1997.
- CLEMENTE, D. S. **Energia das Ondas: metodologia de ensaios em modelos reduzidos**. 2013. 123 p. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Itajubá, 2013.
- Instituto do Ambiente (Ed.). **Energia das Ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais**. Alfragide: [s.n.], 2004. 61 p.
- CUI, Y. et al. Review of CFD studies on axial-flow self-rectifying turbines for OWC wave energy conversion. **Ocean Engineering**, [S.l.], v. 175, n. December 2018, p. 80–102, 2019.
- DAI, S. et al. Investigation on the hydrodynamic scaling effect of an OWC type wave energy device using experiment and CFD simulation. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 142, p. 184–194, 2019.

De Lima, Y. T. B. et al. APLICAÇÃO DO MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL NA AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA POTÊNCIA HIDROPNEUMÁTICA DE UM DISPOSITIVO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE COM REGIÃO DE TRANSIÇÃO TRAPEZOIDAL. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [S.l.], v. 6, n. 3, p. 376–396, jun 2017.

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

DRESCH, A. et al. **Design science research : método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

DREW, B.; PLUMMER, A. R.; SAHINKAYA, M. N. A review of wave energy converter technology. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy**, [S.l.], v. 223, n. 8, p. 887–902, 2009.

El Marjani, A. et al. Numerical modelling in wave energy conversion systems. **Energy**, [S.l.], v. 33, n. 8, p. 1246–1253, 2008.

ELHANAFI, A. et al. Scaling and air compressibility effects on a three-dimensional offshore stationary OWC wave energy converter. **Applied Energy**, [S.l.], v. 189, p. 1–20, 2017.

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

EVANS, D.; PORTER, R. Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device. **Applied Ocean Research**, [S.l.], v. 17, n. 3, p. 155–164, 1995.

EVANS, D. V. The oscillating water column wave-energy device. **IMA Journal of Applied Mathematics (Institute of Mathematics and Its Applications)**, [S.l.], v. 22, n. 4, p. 423–433, 1978.

FALCÃO, A. F.; HENRIQUES, J. C. **Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: a review**. 2015. 1391–1424 p. v. 85.

GOMES, M. d. N. **Constructal design de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante**. 2014. 149 p. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 2014.

GOMES, M. d. N. et al. Analysis of the geometric constraints employed in constructal design for oscillating water column devices submitted to the wave spectrum through a numerical approach. **Defect and Diffusion Forum**, [S.l.], v. 390, p. 193–210, 2019.

GOMES, M. N. et al. Computational modeling of an oscillating water column device for the Rio Grande Coast. **Proceedings - 2009 3rd Southern Conference on Computational Modeling, MCSUL 2009**, [S.l.], p. 107–112, 2009.

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

GUNN, K.; STOCK-WILLIAMS, C. Quantifying the global wave power resource. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 44, p. 296–304, 2012.

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.

IEA-OES. International Levelised Cost of Energy for Ocean Energy Technologies. , [S.l.], n. May, p. 5–10, 2015.

INSTRUMENTS, N. **USB-6008**.

International Energy Agency, I. Electricity Information 2018 overview. **International Energy Agency**, [S.l.], 2019.

JOSSET, C.; CLÉMENT, A. H. A time-domain numerical simulator for oscillating water column wave power plants. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 32, n. 8, p. 1379–1402, 2007.

LEE, C. H.; NEWMAN, J. N.; NIELSEN, F. G. Wave interactions with an oscillating water column. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 1996. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1996. v. 1, p. 82–90.

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.-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.

LÓPEZ, I. et al. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 27, p. 413–434, 2013.

LORENTE, S.; BEJAN, A. Few large and many small: hierarchy in movement on earth. **International Journal of Design and Nature and Ecodynamics**, [S.l.], v. 5, n. 3, p. 254–267, 2010.

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

MANI, J. **Coastal Engineering**. 2a. ed. Delhi: PHI Learning Private Limited, 2018. 568 p.

MCCORMICK, M. E. A modified linear analysis of a wave-energy conversion buoy. **Ocean Engineering**, [S.l.], v. 3, n. 3, p. 133–144, 1976.

MCCULLEN, P. et al. Wave energy in Europe : current status and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 6, p. 405–431, 2002.

MORK, G. et al. Assessing the Global Wave Energy Potential. **29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Volume 3**, [S.l.], n. 2008, p. 447–454, 2010.

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.

R2, F. **User Manual**. 2019.

RAGHUNATHAN, S. **The wells air turbine for wave energy conversion**. [S.l.]: Pergamon, 1995. 335–386 p. v. 31, n. 4.

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

ROCHA, L. A. O. et al. **Constructal design of a cavity cooled by convection**. 2010. 212–220 p. v. 5, n. 3.

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

SARMENTO, A. J.; De Falcao, A. F. Wave generation by an oscillating surface-pressure and its application in wave-energy extraction. **Journal of Fluid Mechanics**, [S.l.], v. 150, n. May 2016, p. 467–485, 1985.

SHALBY, M. et al. CFD modelling of a small-scale fixed multi-chamber OWC device. **Applied Ocean Research**, [S.l.], v. 88, n. March, p. 37–47, 2019.

SHENG, W.; ALCORN, R.; LEWIS, T. Physical modelling of wave energy converters. **Ocean Engineering**, [S.l.], v. 84, p. 29–36, 2014.

TEIXEIRA, P. R. et al. Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier-Stokes equations. **Energy**, [S.l.], v. 61, p. 513–530, 2013.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável - Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. [S.l.: s.n.], 2013. 1689–1699 p. v. 53, n. 9.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. 2a. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007. 503 p. v. M.

VYZIKAS, T. Application of numerical models and codes. **Best practice report**, [S.l.], p. 155, 2014.

WHITE, P. et al. Utilisation of CFD to Study an Oscillating Water Column. , [S.l.], v. I, p. 70–76, 1997.

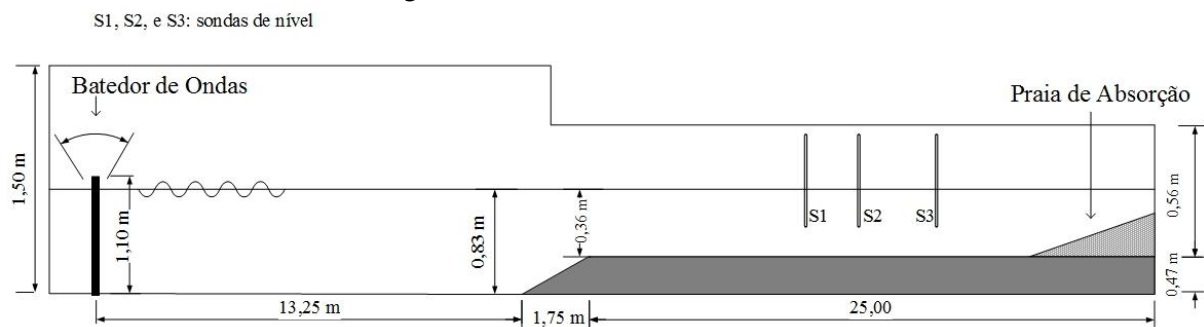
WILBERFORCE, T. et al. Overview of ocean power technology. **Energy**, [S.l.], v. 175, p. 165–181, 2019.

ZHANG, Y.; ZOU, Q. P.; GREAVES, D. Air-water two-phase flow modelling of hydrodynamic performance of an oscillating water column device. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 41, p. 159–170, 2012.

ANEXO A – METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O canal de ondas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) possui 40 m de comprimento e 1 m de largura, conforme é esquematizado na Figura 40. As ondas são geradas por um batedor, representado na extremidade esquerda do tanque. Alterando amplitude do braço de alavanca e a frequência de giro do motor, é possível selecionar o período e a altura de onda, para uma dada profundidade de água no canal, conforme estudo realizado em Clemente (2013). Na extremidade direita do tanque, há uma praia de absorção para reduzir a reflexão das ondas incidentes.

Figura 40 – Canal de Ondas do IPH



Conforme pode ser visto na Figura 40, a base do canal possui uma inclinação em 13,25 m. A zona de teste fica localizada a 15 m do batedor de ondas, onde são posicionadas as sondas de nível S_1 , S_2 e S_3 . As sondas são do tipo condutivas, formadas por dois eletrodos de aço alimentados por uma diferença de potencial de 5 V. Ao serem mergulhados em água, a tensão de saída é diretamente proporcional à altura de coluna de água entre estes.

Os dados são lidos por uma placa de aquisição automática de dados (DAQ - Data Automatic Acquisition), modelo USB-6008, do fabricante National Instruments (NI). Esta placa possui taxa de amostragem de 10 kS/s e resolução do conversor Analógico/Digital (A/D) de 12 bits. A comunicação DAQ-Computador é realizada via Porta Serial Universal (USB - Universal Serial Bus). (INSTRUMENTS, ???).

Como a condutividade elétrica da água é função dos íons disponíveis na água, as sondas de nível devem ser calibradas sempre previamente à realização dos ensaios. Este procedimento é realizado através da comparação entre a tensão de saída e a imersão das sondas, marcada através de uma régua de precisão. Com três pontos de medição, é possível obter uma curva de calibração do tipo:

$$\eta = \alpha V + b \quad (\text{A.1})$$

onde η representa a altura de coluna de água entre os eletrodos, V a tensão de saída, em V, e α a sensibilidade da sonda de nível, em cm/V. A menor resolução de tensão lida pela placa de aquisição é de 1,22 mV (i.e. $5 \text{ V}/2^{12}$ bits). Portanto, a incerteza u_η para os valores de η são

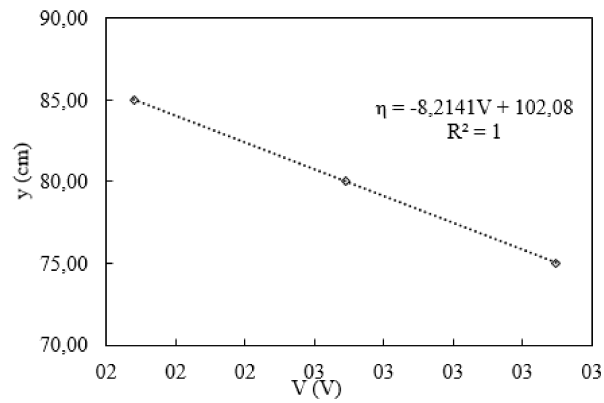
dados pela Equação A.2:

$$u_{\eta} = 1,22 \times 10^{-3} \alpha \kappa \quad (\text{A.2})$$

onde κ é o fator de abrangência que, para um intervalo de confiança de 95%, vale 2.

Para o ensaio realizado no presente trabalho, foi obtida a curva de calibração mostrada na Figura 41.

Figura 41 – Curva de Calibração da Sonda de Nível



Fonte: Elaborada pela autora.

Portanto, a incerteza associada à variável η , para este ensaio, é dada por $u_{\eta} = \pm 0,020$ cm.