

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE GEOMÉTRICA ATRAVÉS DO DESIGN CONSTRUTAL DE CONVERSORES  
DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE COM  
CÂMARAS HIDROPNEUMÁTICAS ACOPLADAS

por

Yuri Theodoro Barbosa de Lima

Tese para obtenção do Título de  
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, Outubro de 2021.

ANÁLISE GEOMÉTRICA ATRAVÉS DO DESIGN CONTRUTAL DE CONVERSORES  
DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE COM  
CÂMARAS HIDROPNEUMÁTICAS ACOPLADAS

por

Yuri Theodoro Barbosa de Lima  
Mestre em Engenharia Mecânica

Tese submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,  
PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como  
parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de:

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Aprovada por:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Adriane Prisco Petry, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Eduardo Puhl, IPH/UFRGS

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos, Escola de Engenharia/FURG

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 26 de Outubro de 2021.

## AGRADECIMENTOS

Este não foi um trabalho fácil, metade realizado antes da pandemia e a outra metade depois. Todas as restrições de acesso aos espaços da universidade me fizeram repensar minha forma de fazer pesquisa, desta forma minha tese se reinventou e aqui está.

Primeiramente agradeço aos meus pais, Jorge e Terezinha, pois sem eles nada dessa pesquisa seria possível, pois com todo apoio sempre me deram a oportunidade de estudar e deixar o estudo sempre à frente de tudo, também por serem meus exemplos de caráter e do que eu quero para o meu futuro.

A minha namorada, companheira e amiga que me acompanha desde o mestrado até aqui no doutorado, muito obrigado. Te agradeço muito Luísa, por dividir comigo essa conquista e por entender todas minhas ausências e alta carga de trabalho para que essa tese ficasse a mais perfeita possível.

Aos meus amigos de longa data Antônio, Affonso, Lucas, João, Douglas que desde o início do meu mestrado até hoje ainda aguentam todas as falas gigantescas sobre energia das ondas. Muito obrigado pessoal.

Aos meus amigos que fiz durante essa etapa de estudos Tiago, Andrés, Luciano, Aline, Gustavo, Roberta, Emanuel, Flávio, André, Camila, Felipe, Giovanni, Vinicius e todos do nosso grupo de pesquisa de Design Construtal, muito obrigado.

Ao meu orientador e amigo, professor Luiz Alberto Oliveira Rocha, que desde o mestrado confia no trabalho que desenvolvemos e por ser parte importante de um passo que dei na minha carreira docente, que foi confiar que conseguiria fazer meu doutorado e dar aula ao mesmo tempo. Muito obrigado professor, siga fazendo esses ótimos churrascos com boa música.

Ao professor e amigo Mateus das Neves Gomes, pois sem ele nada desse trabalho teria sido feito. Muito obrigado Mateus, teus ensinamentos inspiram e são muito importantes.

Aos amigos que fiz na FURG, Elizaldo e Liércio, vocês além de ótimos parceiros de pesquisa também são exemplos de profissionais. Muito obrigado pelos anos de parceria e espero que muito outros se façam.

Agradeço ao IFSUL Campus Sapucaia do Sul, por ter me proporcionado meus melhores dois anos como professor substituto e aos meus incríveis alunos. Neste lugar eu aprendi muito e cresci como pessoa e profissional, não tenho palavras para mensurar o quanto importante esta instituição é e sempre será para mim.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) e a CAPES pelo suporte financeiro.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre dispositivos conversores de energia das ondas do mar do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) com câmaras hidropneumáticas acopladas. Assim, na presente investigação o objetivo, através da modelagem computacional e do emprego do Design Construtal, busca-se maximizar a potência hidropneumática ( $P_{hyd}$ ) disponível. São analisadas cinco configurações geométricas, sendo que em cada configuração definida ocorre a variação de onze geometrias, onde ocorre o incremento do número de câmaras acopladas a cada caso estudado. No caso com duas câmaras acopladas complementa-se o estudo verificando os graus de liberdade referente à altura e espessura da coluna que divide as câmaras. Considerando um domínio bidimensional, as restrições para este estudo são: os volumes de entrada dos dispositivos ( $V_{En}$ ) e os volumes totais ( $V_{Tn}$ ). Os graus de liberdade analisados foram:  $H_2$  (altura da parede que divide os dois dispositivos),  $e_2$  (espessura da parede que divide os dispositivos) e  $H_n/L_n$  (razão entre altura e largura das câmaras hidropneumáticas). Os graus de liberdade  $H_n/L_j$  (razão entre altura e largura do duto da turbina) e  $H_{depth}$  (profundidade de submersão) foram mantidos constantes. Para a solução numérica é empregado um código de dinâmica dos fluidos computacional, FLUENT®, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é aplicado no tratamento da interação água-ar. O domínio computacional é representado por um tanque de ondas com um dispositivo CAO acoplado. Os resultados obtidos indicam que para o grau de liberdade  $H_n/L_n = 0,2613$  ( $H_n = 4.1335$  m e  $L_n = 15.8219$  m) é determinado o mais alto valor para os indicadores de desempenho ( $[P_{hyd}]_{máx} = 30.8$  kW,  $\dot{m} = 82,1$  kg/s e  $P = 8820,8$  Pa). Já o caso de mais baixo desempenho apresenta o grau de liberdade  $H_n/L_n = 0,0153$  ( $H_n = 1$  m e  $L_n = 65,4$  m) com resultados  $[P_{hyd}]_{máx} = 257,9$  W,  $\dot{m} = 6,22$  kg/s e  $P = 454,6$  Pa. Assim, verifica-se que a variação geométrica e o incremento de câmaras hidropneumáticas, tem um fator importante e decisivo na conversão energética de dispositivos do tipo CAO, destacando-se que a distribuição de energia total não é linear para os casos de mais de duas câmaras acopladas.

Palavras-chave: Design Construtal; Coluna de Água Oscilante (CAO); Dispositivos Acoplados; Otimização Geométrica.

## ABSTRACT

The present work presents studies sea wave energy converter devices of the Oscillating Water Column (OWC) type with coupled hydropneumatic chambers. Thus, in this investigation, the objective, through computational modeling and the use of Constructal Design, seeks to maximize the available hydropneumatic power ( $P_{hyd}$ ). Five geometric configurations are analyzed, and in each defined configuration there is a variation of eleven geometries, where there is an increase in the number of chambers coupled to each case studied. In the case of two coupled chambers, the study is complemented by checking the degrees of freedom regarding the height and thickness of the column that divides the chambers. Considering a two-dimensional domain, the restrictions for this study are the input volumes of the devices ( $V_{En}$ ) and total volumes ( $V_{Tn}$ ). The degrees of freedom analyzed were:  $H_2$  (height of the wall that divides the two devices),  $e_2$  (wall thickness that divides the devices) and  $H_n/L_n$  (ratio between height and length of the hydropneumatic chambers), some degrees of freedom were kept constant  $H_n/l_j$  (ratio between height and length of the turbine duct). A computational fluid dynamics code is used for the numerical solution, FLUENT<sup>®</sup>, based on the Finite Volume Method (FVM). The multiphase model *Volume of Fluid* (VOF) is applied in the treatment of water-air interaction. A wave tank represents the computational domain with a CAO device attached. The results obtained indicate that the degree of freedom  $H_n/L_n = 0,2613$  ( $H_n = 4.1335$  m and  $L_n = 15.8219$  m) determines the highest value for the performance indicators. ( $[P_{hyd}]_{máx} = 30.8$  kW,  $\dot{m} = 82,1$  kg/s e  $P = 8820,8$  Pa), the lowest performing case shows the degree of freedom  $H_n/L_n = 0,0153$  ( $H_n = 1$  m and  $L_n = 65,4$  m) with results  $[P_{hyd}]_{máx} = 257,9$  W,  $\dot{m} = 6,22$  kg/s e  $P = 454,6$  Pa. Thus, it appears that the geometric variation and the increment of hydropneumatic chambers have an important and decisive factor in the energy conversion of CAO devices, noting that the total energy distribution is not linear for cases of more than two coupled chambers.

Keywords: Constructal Design; Oscillating Water Column (OWC); Couples Devices; Input Volumes; Geometric Optimization.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação .....	1
1.2	Revisão Bibliográfica .....	5
1.3	Proposta e Objetivos do Trabalho.....	17
1.3.1.	Objetivo Geral do Trabalho .....	17
1.3.2.	Objetivos Específicos .....	18
1.4	Organização do Trabalho.....	18
<b>2</b>	<b>ENERGIA NOS OCEANOS.....</b>	<b>20</b>
2.1	A Energia das Ondas do Mar.....	20
2.2	Dispositivos de Conversão de Energia das Ondas.....	22
2.3	Conversor do Tipo Coluna de Água Oscilante .....	29
2.4	Turbinas para Dispositivos CAO.....	34
2.5	Recurso Oceânico Nacional: Energia das Ondas.....	36
<b>3</b>	<b>TEORIA DE ONDAS .....</b>	<b>40</b>
3.1	Teoria não Linear de Ondas ou Ondas de 2ª Ordem de Stokes .....	45
<b>4</b>	<b>DESIGN CONSTRUTAL E APLICAÇÕES A DISPOSITIVOS CAO .....</b>	<b>47</b>
4.1	Formulação Geométrica com Design Construtal.....	49
<b>5</b>	<b>MODELO COMPUTACIONAL .....</b>	<b>52</b>
5.1	Método dos Volumes Finitos.....	54
5.2	Método <i>Volume of Fluid</i> (VOF) .....	56
5.3	Domínio Computacional.....	59
5.4	Condições de Contorno.....	61
5.5	Malha Computacional.....	62
5.6	Parâmetros de Solução.....	65
5.6.1.	Solução do Sistema de Equações .....	65
5.6.2.	Função de Interpolação .....	66
5.6.3.	Esquema de Discretização .....	67
5.6.4.	Avaliação do Gradiente.....	67

5.6.5.	Acoplamento Pressão-Velocidade .....	68
5.6.6.	Discretização Temporal .....	68
5.7	Sondas de Monitoramento .....	69
5.8	Verificação e Validação do Modelo Numérico .....	72
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>76</b>
6.1	Estudo de um Dispositivo com uma Única Câmara .....	76
6.2	Estudo de um Dispositivo com Duas Câmaras Acopladas .....	79
6.2.1	Dispositivos com Duas Câmaras Acopladas Estudo dos Graus de Liberdade $H_2e_2$ .....	83
6.3	Estudo de um Dispositivo com Três Câmaras Acopladas .....	90
6.4	Estudo de um Dispositivo com Quatro Câmaras Acopladas .....	92
6.5	Estudo de um Dispositivo com Cinco Câmaras Acopladas.....	95
6.6	Análise da Variação de Câmaras Acopladas em Dispositivos CAO .....	99
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>107</b>
7.1	Proposta de Continuidade .....	108
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>110</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>122</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>124</b>
	<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>126</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Matriz energética (A) mundial e (B) Brasileira...	2
Figura 1.2 Experimento em que é mostrado em:(A) Canal de ondas e (B) Dispositivo CAO	10
Figura 1.3 Parte numérica do trabalho inicialmente experimental.	10
Figura 1.4 Domínio bidimensional do dispositivo CAO com região de transição trapezoidal sem restrição na chaminé do dispositivo...	14
Figura 1.5 Domínio bidimensional do dispositivo CAO com região de transição semicircular sem restrição na chaminé do dispositivo...	15
Figura 2.1 Representação das duas formas de energia das ondas.	21
Figura 2.2 Potência anual em kW/m de frente de onda.	22
Figura 2.3 Localização dos dispositivos em relação à costa	23
Figura 2.4 Percentual de pesquisa e desenvolvimento de dispositivos conversores de energia das ondas do mar.	24
Figura 2.5 Classificação dos dispositivos conversores de energia das ondas do mar em relação ao tamanho.	26
Figura 2.6 Princípio de funcionamento e local de instalação dos dispositivos conversores de energia das ondas.	27
Figura 2.7 Desenvolvimento percentual dos conversores de energia das ondas do mar.	28
Figura 2.8 Estágios de conversão da energia.	29
Figura 2.9 Representação tridimensional do dispositivo CAO.	30
Figura 2.10 Representação bidimensional do princípio de funcionamento do dispositivo Coluna de Água Oscilante acoplados.	31
Figura 2.11 Projeto de dispositivo 400 kW CAO da Ilha de Pico	32
Figura 2.12 (A) Primeiro dispositivo em larga escala instalado (B) Central <i>Onshore</i> na ilha de Islay, Escócia.	32
Figura 2.13 (A) Dispositivo localizado na cidade de Sakata, Japão (B) Dispositivo Oceanlinx no porto de MacDonnell	33
Figura 2.14 Projeto de dispositivo CAO do LIMPET.	33
Figura 2.15 Projeto de dispositivo: CAO Migthy Whale, Japão (A); CAO Energetech, Austrália(B).	34

Figura 2.16 Turbinas a ar para dispositivos CAO: (A) Wells, (B) Denniss-Auld e (C) Impulso.....	35
Figura 2.17 (A) Sistema de funcionamento da Turbina <i>Wells</i> e (B) Turbina Wells da central de Pico .....	35
Figura 2.18 Potencial teórico brasileiro estimado de ondas e marés.....	36
Figura 2.19 Dispositivo conversor da energia das ondas do mar em energia elétrica.....	37
Figura 2.20 Esquema de funcionamento da Usina de Pecém-CE .....	38
Figura 2.21 Dispositivo que será instalado no Rio de Janeiro, Brasil.....	39
Figura 2.22 Funcionamento do dispositivo. ....	39
Figura 3.1 Ilustração da formação de ondas numa certa região como resultado dos processos de interações e superposições .....	41
Figura 3.2 Características da onda.....	42
Figura 3.3 Comparação entre uma onda de primeira e segunda ordem. ....	43
Figura 3.4 Aplicabilidade das teorias de ondas. ....	44
Figura 4.1 Fluxograma da aplicação do método Design Construtal.....	49
Figura 4.2 Árvore de simulações realizadas.....	51
Figura 5.1 Função do Método Numérico.. ....	54
Figura 5.2 Exemplo de identificação da superfície livre a partir da variação da fração de volume.. ....	58
Figura 5.3 Domínio computacional e condições de contorno .....	60
Figura 5.4 Malha bidimensional com detalhes das regiões refinadas .....	64
Figura 5.5 Superfícies de monitoramento no domínio computacional bidimensional.. ....	70
Figura 5.6 Elevação da superfície livre da água para o caso bidimensional: (A) Todo o tempo computacional; (B) detalhe de $100\text{ s} < t < 150\text{ s}$ (C) Aplicação da praia numérica na posição $x = 320\text{ m}$ .....	73
Figura 5.7 Comparação entre os resultados obtidos no presente estudo e os apresentados por Liu et al., (2011) para diferentes períodos de onda... ..	75
Figura 6.1 Resultados da potência hidropneumática (A), vazão mássica (B) e pressão (C) para o caso de uma única câmara no dispositivo CAO variando um grau de liberdade. ....	79
Figura 6.2 Resultados da potência hidropneumática (A), vazão mássica (B) e pressão (C) para o caso de dois dispositivos CAO acoplados e variando dois graus de liberdade. ....	82

Figura 6.3 Topologias da velocidade na direção $y$ (m/s) e fases água, para a variação de dois graus de liberdade: $H_1/L_1$ e $H_3/L_2$ .....	83
Figura 6.4 Resultados de Potência Hidropneumática (A), Vazão mássica (B) e Pressão(C) para o caso do grau de liberdade $H_2$ .....	85
Figura 6.5 Topologias da velocidade na direção $y$ (m/s) e fases água, para a variação do grau de liberdade: $H_2$ .....	86
Figura 6.6 Resultados da Potência Hidropneumática (a), Vazão mássica (b) e Pressão(c) para o caso do grau de liberdade $e_2$ .....	88
Figura 6.7 Valores ótimos dos graus de liberdade encontrados para: pressão (A) e Vazão Mássica (B).....	89
Figura 6.8 Variação da potência hidropneumática para os valores ótimos de cada grau de liberdade analisado. ....	89
Figura 6.9 Resultados da potência hidropneumática (A), vazão mássica (B) e pressão (C) para o caso de três dispositivos CAO acoplados. ....	91
Figura 6.10 Resultados da potência hidropneumática (A), vazão mássica (B) e pressão (C) para o caso de quatro dispositivos CAO acoplados.....	93
Figura 6.11 Pressão total em um dispositivo com cinco câmaras acopladas. ....	96
Figura 6.12 Vazão mássica na turbina de um dispositivo com cinco câmaras acopladas. ....	97
Figura 6.13 Potência hidropneumática para um dispositivo com cinco câmaras acopladas. ...	98
Figura 6.14 Pressão acumulada em cada dispositivo acoplado. ....	100
Figura 6.15 Modelo de dispositivo com água (vermelho) e ar (azul) e recirculação de ar no duto da turbina. ....	100
Figura 6.16 Pressão dos casos de mais alto desempenho. ....	101
Figura 6.17 Vazão mássica acumulada em cada dispositivo acoplado. ....	102
Figura 6.18 Vazão mássica dos casos de melhor desempenho.....	103
Figura 6.19 Potência hidropneumática acumulada em cada dispositivo acoplado.....	104
Figura 6.20 Potência hidropneumática disponível nos casos de melhor desempenho. ....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1	Dimensões do problema e clima de ondas.....	61
Tabela 5.2	Parâmetros de simulação adotados. ....	69
Tabela B.1	Variação geométrica de dispositivos com diversas câmaras acopladas.....	124
Tabela B.2	Variação geométrica para o grau de liberdade $H_2$ .....	124
Tabela B.3	Variação geométrica para o grau de liberdade $e_2$ .....	125
Tabela C.1	Resultados para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para o caso do dispositivo com uma câmara hidropneumática. ....	126
Tabela C.2	Resultados para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para o caso do dispositivo com duas câmaras acopladas.. ....	126
Tabela C.3	Resultado para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para o grau de liberdade $H_2$ .....	127
Tabela C.4	Resultado para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para o grau de liberdade $e_2$ .....	127
Tabela C.5	Resultados para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para o caso do dispositivo com três câmaras acopladas.. ....	128
Tabela C.6	Resultados para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para o caso do dispositivo com quatro câmaras acopladas.....	128
Tabela C.7	Resultados para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para o caso do dispositivo com cinco câmaras acopladas .....	129

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AMG	<i>Algebraic Multigrid</i>
CAO	Coluna de Água Oscilante
CA	Câmaras Acopladas
COPPE	Instituto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em engenharia
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
EDP	Equação Diferencial Parcial
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
NITA	<i>Non-Iterative Time Advancement</i>
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
PRESTO	<i>Pressure Staggering Option</i>
PROMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SIMPLE	<i>Semi Implicit Linked Equations</i>
SIMPLEC	<i>Semi Implicit Linked Equations Consistent</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VOF	<i>Volume of Fluid</i>
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Romanas

$A$	Amplitude, m
$A_E$	Área de entrada da câmara hidropneumática, m <sup>2</sup>
$A_R$	Área da restrição elíptica, m <sup>2</sup>
$A_T$	Área total, m <sup>2</sup>
$A_{Tran}$	Área da região de transição, m <sup>2</sup>
$C$	Celeridade, m/s
$d_1$	Eixo horizontal, m
$d_2$	Eixo vertical, m
$E_{CAO}$	Energia absorvida pelo dispositivo CAO, J
$g$	Aceleração da gravidade, m/s <sup>2</sup>
$h$	Profundidade da água, m
$H$	Altura, m
$H_T$	Altura total, m
$k$	Número de onda, m <sup>-1</sup>
$l$	Comprimento da chaminé, m
$L$	Comprimento da câmara hidropneumática, m
$L_T$	Largura Total, m
$m$	Massa, kg
$\dot{m}$	Vazão mássica, kg/s
$\dot{m}_e$	Vazão mássica na fronteira leste, kg/s
$\dot{m}_n$	Vazão mássica na fronteira norte, kg/s
$\dot{m}_s$	Vazão mássica na fronteira sul, kg/s
$\dot{m}_w$	Vazão mássica na fronteira oeste, kg/s
$n$	Número de volumes
$P$	Pressão, Pa
$P_d$	Pressão dinâmica, Pa

$P_e$	Pressão estática, Pa
$P_{hid}$	Potência hidropneumática, W
$P_{inc}$	Potência da onda incidente, W
$r$	Raio, m
$t$	Tempo, s
$T$	Período da onda, s
$T_w$	Período considerado na análise da eficiência, s
$u$	Componente da velocidade na direção horizontal, m/s
$U_R$	Número de Ursell, adimensional
$v$	Velocidade, m/s
$\vec{v}$	Vetor velocidade do escoamento, m/s
$V_{ar}$	Velocidade do ar na chaminé, m/s
$v_y$	Velocidade na direção y, m/s
$w$	Componente da velocidade na direção vertical, m/s

### Símbolos Gregos

$\alpha$	Ângulo de inclinação da parede na transição trapezoidal, °
$\alpha_{ar}$	Valor nominal da fração volumétrica na fase ar
$\alpha_{\acute{a}gua}$	Valor nominal da fração volumétrica na fase água
$\beta$	Variável de ajuste da função de interpolação temporal
$\lambda$	Distância entre duas cristas ou cavas consecutivas, m
$\eta$	Elevação da superfície livre, m
$\rho$	Massa específica, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{ar}$	Massa específica do ar, kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	Viscosidade, kg/ms
$\phi$	Função potencial de velocidade
$\phi_n$	Razão entre os volumes de entrada dos dispositivos
$\left(\overline{\tau}\right)$	Tensor das tensões

$\omega$       Frequência, 1/m

### **Subscritos**

e      Leste

i      Número de volumes de controle

n      Norte

P      Ponto de interesse

s      Sul

w      Oeste



# 1 INTRODUÇÃO

A demanda energética mundial, aliada ao aumento demográfico e o avanço tecnológico, implicam diretamente na busca por alternativas energéticas sustentáveis. As formas tradicionais de obtenção energética como petróleo e carvão envolvem processos danosos ao meio ambiente.

As fontes renováveis de energia são uma das alternativas ao uso de fontes energéticas poluentes. O baixo impacto ambiental em comparação com a energia não renovável é uma das principais características que demonstra o crescente interesse em pesquisa e desenvolvimento científico nesta área.

A energia convertida das ondas do mar vem ganhando destaque entre as fontes renováveis de energia. Dentre os diferentes modelos de conversores energéticos das ondas do mar, destacam-se os dispositivos do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO).

Nesta pesquisa são investigados dispositivos do tipo CAO de forma computacional, isto é, empregam-se métodos numéricos para a simulação dos efeitos das ondas sob os conversores de energia das ondas do mar. Emprega-se o método Design Construtal para estudar o efeito da variação da quantidade de câmaras hidropneumáticas acopladas em um único dispositivo e da variação geométrica no desempenho da conversão da energia disponível do mesmo.

## 1.1 Motivação

Um dos parâmetros que determinam a qualidade de vida e a economia é a energia. Isso levou a mesma ser considerada o principal assunto a ser discutido entre governos e no meio científico. De acordo com as estatísticas, quase dois bilhões de pessoas em todo o mundo não têm fornecimento constante ou mesmo nenhum acesso à energia [Shayesteh et al., 2018].

Para geração de energia, o uso de combustíveis fósseis tradicionais (por exemplo: carvão, gás natural e petróleo) é a alternativa primária considerada. Contudo, o uso excessivo de recursos não renováveis emite uma grande quantidade de CO<sub>2</sub> (Dióxido de carbono) no meio ambiente, levando ao agravamento do efeito estufa [Shahbaz et al., 2020].

Para desacelerar os impactos danosos do uso de energias não renováveis e os efeitos das mudanças climáticas resultante da queima de combustíveis fósseis a adoção de fontes

renováveis de energia para atender à demanda energética se mostra necessária [Santika et al., 2019].

A matriz energética mundial é composta, principalmente, por fontes não renováveis. As fontes renováveis como solar, eólica e dos oceanos, por exemplo, juntas correspondem a apenas 1,6 % da matriz energética, assinaladas como “Outras” na Figura 1.1 (A). Somando à participação da energia hidráulica e da biomassa, as renováveis totalizam 14% [IEA, 2018].

Já a matriz energética brasileira é muito diferente da mundial. Apesar do consumo de energia de fontes não renováveis serem maiores do que a de renováveis usa-se mais fontes renováveis que o resto do mundo, como pode ser observado na Figura 1.1 (B). Somando-se lenha e carvão vegetal, hidráulicas, derivados de cana e outras renováveis, tem-se o total de 42,9 % de energia renovável, quase metade da matriz energética brasileira [IEA, 2018].

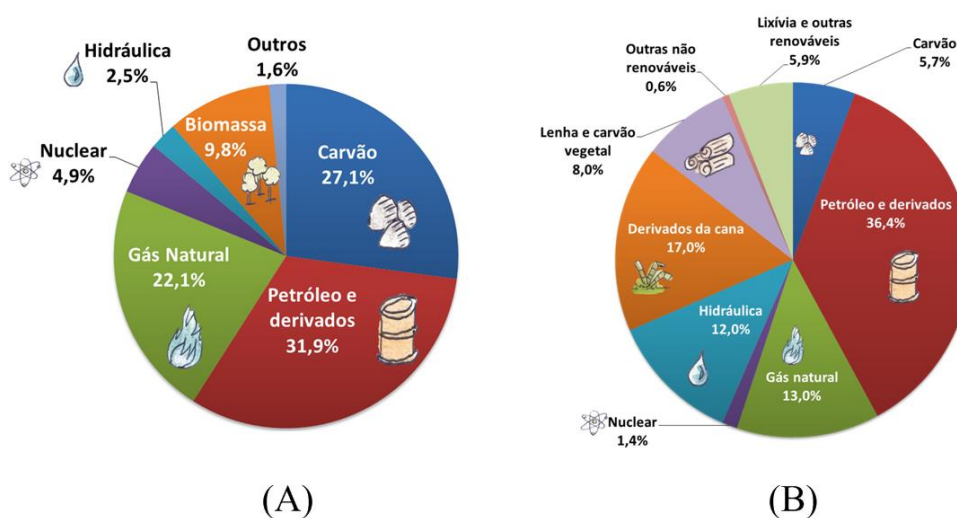


Figura 1.1 – Matriz energética (A) mundial e (B) Brasileira [IEA, 2018].

O quadro que compõe algum dos potenciais energéticos renováveis em maior destaque é formado pelo aproveitamento energético proveniente de matéria orgânica de origem animal e vegetal (a biomassa), a partir de forças dos ventos (energia eólica), através da captação da luz do sol (energia solar), a partir de pequenas centrais hidroelétricas, as quais atendem a demandas em áreas periféricas ao sistema de transmissão, pelo movimento de ondas e mares, entre outras [Pacheco, 2006]. O oceano é uma fonte de energia renovável inesgotável para a geração de eletricidade. Em geral, a avaliação teórica da energia potencial do oceano pode

chegar a 100.000 TWh / ano (enquanto o consumo mundial de eletricidade é de 16.000 TWh / ano) [Le et al., 2017].

A energia proveniente dos oceanos compreende várias tecnologias diferentes, como energia das marés, das ondas, conversão da energia térmica oceânica e gradiente de salinidade. Até o momento, as tecnologias de energia das marés e das ondas representam a mais avançada técnica de conversão energética e espera-se que se tornem comercialmente viáveis no curto e médio prazo [Mofor et al., 2014].

A energia térmica oceânica captura a diferença de temperatura entre águas oceânicas profundas frias e quentes mais próximo da superfície para produzir eletricidade [Fujita et al., 2002]. A potência do gradiente de salinidade ou potência osmótica usa a diferença na concentração de sal entre a água do mar e a água doce para conversão em energia elétrica [Lewis et al., 2011].

Por outro lado, a energia das marés oceânicas ocorre devido aos movimentos oscilatórios do nível do mar, observados tanto na linha da costa quanto na região oceânica, resultantes da maré astronômica a qual é fruto da interação gravitacional entre Sol-Terra-Lua. Já a energia das ondas é consequência da transferência de energia dos ventos ao longo de uma faixa sobre a superfície oceânica. A energia contida nas ondas do mar é, assim, uma forma de energia solar, porém mais concentrada [Tomalsquim, 2016].

As iniciativas de conversão da energia oriunda das ondas são bastante antigas e os primeiros registros datam do século XVII. Contudo, o investimento nesse tipo de energia foi mais expressivo a partir da década de 70, em função da crise do petróleo, na busca de energias alternativas para suprimento da demanda energética [Tomalsquim, 2016].

Pesquisas conduzidas pelo Painel Internacional de Mudanças Climáticas (PIMC) sugeriu que todo o potencial teórico da energia das ondas era de 32 PWh / ano [Mork et al., 2010; Lagoun et al., 2010]. Esta estimativa mostrou que o potencial anual da energia das ondas era o dobro da eletricidade global fornecida em 2008, que era de 17 PWh / ano [Lagoun et al., 2010; Matthew et al., 2018]

Do total de energia oceânica disponível, o potencial energético foi estimado em 500 GW, se forem considerados apenas dispositivos instalados próximos a áreas costeiras com clima de ondas maior que 30 kW/m e assumindo 40% de eficiência operacional [Kempener et al., 2014].

Essa alta fonte de energia e o aumento na demanda de energia renovável atraíram o interesse de pesquisadores e engenheiros em desenvolver tecnologias capazes de extrair energia de ondas. No entanto, desvantagens, como a variabilidade (em termos de altura de ondas, períodos de ondas e ocorrências), efeitos de corrosão e impactos de alta carga, dificultam a descoberta de um dispositivo economicamente viável [Lisboa et al., 2018].

Observando o regime de ondas no Brasil, constata-se que o mesmo possui mais de um sistema característico de agitação. As regiões Sul e Sudeste estão sujeitas a ondulações mais energéticas, associadas às frentes frias em algumas épocas do ano, totalizando aproximadamente 22 GW de potência de ondas, enquanto o litoral nordeste é caracterizado por ondulações menores, porém constantes no ano todo, causadas pelos ventos alísios [Tomalsquim, 2016].

A energia das ondas oceânicas pode contribuir positivamente para a matriz energética brasileira, pois se estima que seja possível gerar cerca de 40GW para a matriz energética nacional, considerando o uso dos conversores nas regiões sul e sudeste [Estefen et al., 2006; Assis et al., 2013].

A região sul do Estado do Rio Grande do Sul destaca-se como sendo a de maior potencial energético de toda a costa brasileira em termos de energia das ondas, tendo a potência de onda média anual de 6,7 kW/m para dispositivos próximos da costa e 22,3 kW/m para dispositivos afastados da costa, mas a potência disponível pode chegar a 40 kW/m de frente de onda [Gomes, 2014; Lisboa et al., 2016].

A potência de uma onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude e ao seu período. Ondas de elevada amplitude (cerca de 2m) e de período elevado (7 a 10s) excedem normalmente os 50 kW por metro de frente de onda [Cruz e Sarmiento, 2004].

Atualmente, existem diferentes soluções capazes de converter a energia das ondas. Em geral, dois critérios podem ser usados para classificar sistemas de extração de energia das ondas: localização de instalação e método de conversão de energia [Barreiro, 2009; Falcão, 2010]. O primeiro critério leva em consideração a localização do dispositivo em relação à costa, agrupando-se desta forma em dispositivos costeiros (*onshore*), próximos da costa (*nearshore*) e afastados da costa (*offshore*) [Cruz e Sarmiento, 2004].

O segundo critério classifica os dispositivos em relação ao seu princípio de conversão da energia e dentre eles destacam-se: Coluna de Água Oscilante (CAO), corpos oscilantes (Absorção pontual) e dispositivos de Galgamento [Teixeira et al., 2013]. Esta classificação

não encerra a possibilidade de existirem outros tipos de dispositivos que não se encaixam nesta classificação. Um exemplo é o dispositivo que utiliza placas horizontais em conjunto com uma turbina, ambos submersos.

Em relação aos sistemas de aproveitamento da energia das ondas, os equipamentos utilizados podem ser turbinas a ar, turbinas de água ou sistemas hidráulicos acoplados a geradores elétricos. Em quaisquer casos, estes equipamentos somente são eficientes numa banda de potência que normalmente é limitada superiormente pela potência nominal do equipamento e inferiormente por uma fração do valor de banda que dependerá do tipo de equipamento utilizado e da potência da onda incidente [Gomes, 2014].

Os dispositivos CAO, normalmente, utilizam turbinas do tipo *Wells*, pois apresentam um único sentido de rotação de suas pás, independente da direção do escoamento de ar que as transpõe.

Tendo em vista a necessidade, atual e futura, da utilização de fontes de energia alternativas e considerando o potencial energético da costa brasileira, o conhecimento de como ocorre a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica é fundamental para que a mesma possa ser utilizada de forma plena e sustentável. Uma das formas de desenvolver conhecimento é através da simulação numérica e análise do design dos conversores, pois através destas ferramentas é possível racionalizar os recursos renováveis de energia [Gomes, 2014].

## **1.2 Revisão Bibliográfica**

Para melhor organização e entendimento do leitor, a revisão bibliográfica foi subdividida em diferentes estudos que juntos compõem uma visão total do estudo de energia dos oceanos e energia das ondas. Primeiramente, apresentam-se estudos referentes à energia dos oceanos; no seguimento, estudos numéricos e experimentais de energia das ondas e, para finalizar, estudos numéricos com a aplicação do Design Construtal para estudos de energia das ondas e estudos de outras formas de obtenção energética proveniente do oceano.

Segundo Falcão, 2010, em seu estudo de revisão bibliográfica a respeito da energia presente no oceano e os dispositivos capazes de converter a mesma, o autor apontou para três princípios de funcionamento distintos, destacando-se: Coluna de Água Oscilante (CAO), Corpos Oscilantes e Galgamento. Neste mesmo trabalho foram apresentados os diferentes

tipos de turbinas que podem ser acopladas aos conversores. Como contribuição, pode-se destacar o quanto a geometria dos dispositivos vem apresentando melhoras em relação ao seu design e assim convertendo mais energia.

Seguindo as revisões feitas ao se estudar dispositivos conversores de energia do oceano, Simas et al., 2015, apresentaram um estudo referente aos processos de concessão de exploração da energia dos oceanos de países membros da união europeia. Em função de ser uma tecnologia recente, os processos licitatórios acabam sendo mais burocráticos do que para outras formas de energia renováveis (eólica e solar). Assim, são apresentados os empecilhos e soluções, para os mesmos, de forma a agilizar a implementação dos conversores de energia dos oceanos.

Complementando as revisões bibliográficas que contemplam assuntos além de potência disponível, Astariz et al., 2015 apresentaram uma análise econômica de implementação da energia dos oceanos. Os autores verificaram a viabilidade econômica de instalação de um dispositivo conversor de energia das ondas, comparando os resultados previstos com outras energias renováveis. A viabilização econômica se faz importante para demonstrar a rentabilidade e competitividade da energia dos oceanos em relação às outras.

Por outro lado, Oliveira et al., 2021 apresentaram, também, um estudo econômico para a viabilidade da implementação de dispositivos de geração de energia das ondas, mas verificando a realidade brasileira. O estudo foi dividido em duas etapas. Inicialmente, foi realizada uma análise energética e econômica para a implantação de conversores de energia das ondas em três regiões do Brasil com dois dispositivos conversores diferentes. A seguir, foram calculados os custos nivelados de geração de eletricidade, dadas as múltiplas variações dos parâmetros envolvidos, de forma a observar as possíveis oscilações desses custos e os parâmetros responsáveis pelo maior impacto. Os resultados mostraram que um alto fator de capacidade tem a melhor influência, tornando a taxa de venda de energia das ondas do mar comparável à energia solar fotovoltaica no Brasil.

Observando as diversas formas de extração da energia presente no oceano, o trabalho de Borthwick, 2016, exibiu uma análise das diferentes formas de produção energética oceânica a partir do vento, correntes marítimas, ondas, energia térmica dos oceanos, gradiente de salinidade e fontes de biomassa. O trabalho concluiu com uma perspectiva de sustentabilidade sobre a atual situação das energias provenientes do oceano.

Pesquisadores brasileiros em energia dos oceanos vêm ganhando destaque. Tolmasquim, 2016, apresentou em seu trabalho aspectos mundiais e nacionais do quanto às tecnologias para criação, exploração e manutenção das energias renováveis estão evoluindo. Em especial, o autor apresentou os diferentes tipos de energia que são provenientes dos oceanos, como tais pesquisas se encontram em relação ao estado da arte e o desenvolvimento científico brasileiro com o estudo dessas novas tecnologias.

Verificando as diferentes formas de extração energética dos oceanos, a energia proveniente das ondas apresenta um significativo crescimento. Dentre as diferentes formas de conversão, usam-se diversos dispositivos que se diferem pelo seu princípio de funcionamento e localização de instalação.

Em Horko, 2007, a autora apresentou o estudo numérico de um dispositivo CAO, em específico da parede frontal do dispositivo chamada “*lip*”. Utilizando o modelo *volume of fluid* (VOF) para produzir a interação da onda com o dispositivo, são testadas diversas formas geométricas e dimensões de *lip*.

Seguindo os estudos numéricos e empregando o mesmo modelo da autora anterior, Liu et al., 2008a, estudou casos de dispositivos CAO com diferentes geometrias e, também, com diferentes características de ondas. Foram pesquisados casos tanto 2D como 3D, em que é observada a elevação de água no interior da câmara hidropneumática.

Como os trabalhos anteriores apresentados, Gomes et al., 2009, utilizaram a mesma metodologia para a interação água e ar, mas foi proposto o estudo de um equipamento do tipo CAO, através de uma modelagem computacional tridimensional da câmara hidropneumática. Este estudo foi realizado, a fim de se obter a vazão mássica em diferentes regiões no interior do dispositivo.

Em Teixeira et al., 2013, um dispositivo do tipo CAO, em escala real, é investigado numericamente. Foi realizada uma comparação entre um código de elementos finitos (FLUINCO) e um código de volumes finitos (FLUENT). Por fim, foi efetuada uma investigação a respeito da geometria da câmara CAO e da relação característica da turbina que possibilitaria o melhor desempenho do dispositivo.

O estudo do local de instalação dos dispositivos também se faz importante por ser um dos critérios de classificação. López et al., 2013, apresentaram um panorama geral dos dispositivos conversores da energia das ondas e os locais de possível instalação através de critérios que vão desde a profundidade até o perfil de ondas de certa localidade. Também é

descrito, em detalhes, cada um dos estágios que fazem parte da conversão de energia, isto é, da captura da energia das ondas até a extração de um sinal elétrico.

Em Bouali e Larbi, 2013, foram discutidos os efeitos da geometria e das dimensões de um dispositivo CAO na eficiência do mesmo. A principal proposta deste estudo é aperfeiçoar a geometria e as dimensões do conversor, para obter a máxima potência disponível. Os resultados mostraram que o tamanho da câmara, a profundidade de submersão e a orientação da parede frontal do dispositivo têm um impacto significativo no desempenho do mesmo.

Análises numéricas bidimensionais se apresentam em maior quantidade nas pesquisas científicas desenvolvidas. Em Luo et al., 2014, os autores investigaram o desenvolvimento de um modelo de dinâmica computacional de fluidos (CFD) bidimensional, totalmente não linear. O modelo foi validado em relação aos resultados experimentais, analíticos e numéricos. A análise dos resultados mostrou que a eficiência de captura de primeira ordem diminui com o aumento da altura das ondas, o que implica que o sistema hidrodinâmico CAO é totalmente não linear. Esses resultados têm implicações significativas para o projeto e operação de sistemas CAO.

Pesquisas experimentais também são desenvolvidas e, assim, verifica-se a aplicabilidade de dispositivos conversores de energia das ondas. Em Ning et al., 2016, foi testado experimentalmente um dispositivo do tipo CAO em um canal de ondas. Foi medida a elevação da superfície livre de água, a pressão do ar na câmara do dispositivo CAO e a eficiência hidrodinâmica, sendo estes resultados comparados com resultados numéricos já obtidos. As conclusões do trabalho indicam que o movimento da água é altamente dependente do comprimento de onda relativo.

Em Costa et al., 2016, os autores apresentaram uma nova metodologia para a geração de ondas nas simulações numéricas envolvendo conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica. Foi apresentado um domínio computacional bidimensional representado por um tanque de ondas, em que o espectro de ondas de Pierson-Moskowitz foi utilizado na geração das mesmas. Os resultados apresentados indicaram uma adequada reprodução computacional deste espectro de ondas, sendo este um avanço em representar os fenômenos oceânicos de forma mais realista.

Lisboa et al., 2016, apresentaram um estudo da análise da propagação de ondas regulares e irregulares em um canal bidimensional com praia numérica. A praia numérica é baseada na adição de um termo de sumidouro na equação da quantidade de movimento que



contém os coeficientes de amortecimento linear e quadrático. Após aferição da praia numérica, foi realizada a simulação com incidência de onda irregular definida pelo espectro do tipo JONSWAP. Os resultados mostraram que a metodologia utilizada permite realizar a simulação da propagação de ondas regulares e, principalmente, irregulares em um canal bidimensional com praia numérica de forma adequada.

O trabalho realizado por Khan et al., 2017, apresentou uma revisão bibliográfica de três diferentes formas de extração energética dos oceanos. Os autores explicaram o princípio de funcionamento de dispositivos que convertem energia das ondas, das marés e a energia térmica dos oceanos. Como resultado, a investigação dos autores apresentou uma revisão atualizada da situação dos dispositivos conversores de energia das ondas.

Alguns trabalhos tridimensionais também são desenvolvidos para se assemelhar ainda mais aos dispositivos experimentais. Em Elhanafi et al., 2017, os pesquisadores realizaram um estudo experimental (Fig. 1.2) e numérico tridimensional (Fig. 1.3) de um dispositivo CAO, em que o mesmo foi submetido a diferentes alturas de ondas e períodos sob um amortecimento de tomada de força constante, simulado por uma placa de orifício de diâmetro fixo. Como resultado, descobriu-se que a modelagem 2D do dispositivo CAO *offshore* superestima significativamente a eficiência global de extração de energia, especialmente para frequências de onda mais altas.

Rodrigues et al., 2019, apresentaram um modelo computacional para a simulação bidimensional de um dispositivo CAO, sujeito a um espectro de ondas do tipo Pierson-Moskowitz. O objetivo do trabalho foi definir uma malha independente que produz resultados precisos com menos esforço computacional através de uma análise da discretização espacial. Os resultados indicaram que as recomendações estão fundamentadas no período mínimo do espectro, pois as médias e desvios são razoáveis e as diferenças de picos são menores em relação aos demais períodos estudados.

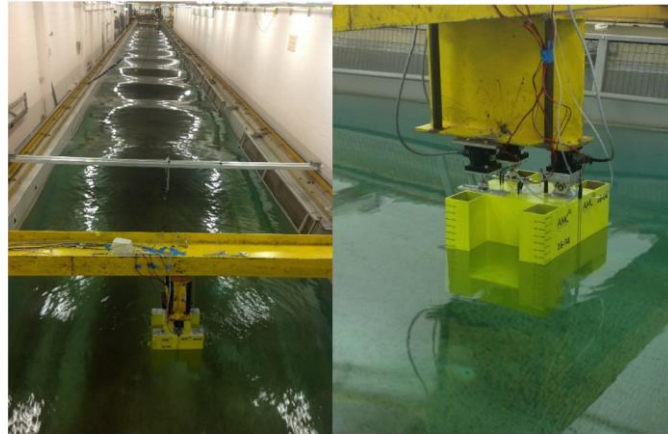


Figura 1.2 – Experimento em que é mostrado em: (A) Canal de ondas e (B) Dispositivo CAO [Elhanafi et al., 2017].

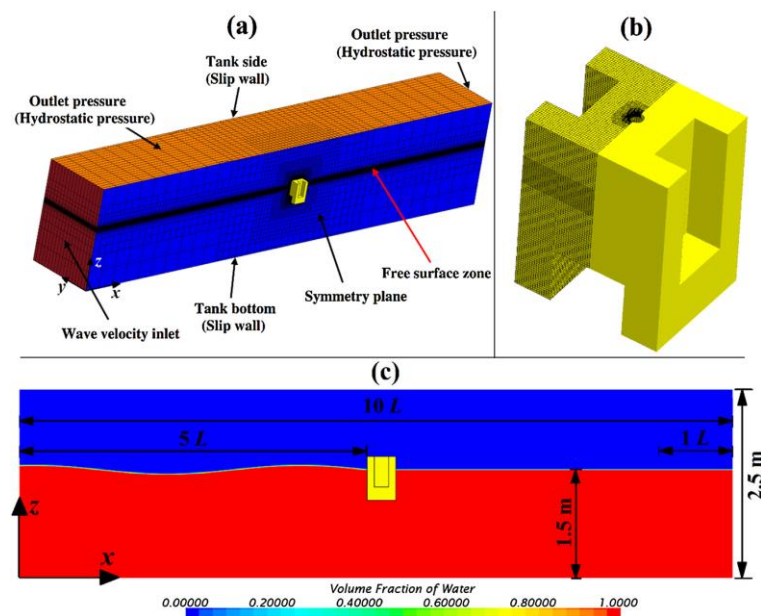


Figura 1.3 – Parte numérica do trabalho inicialmente experimental [Elhanafi et al., 2017].

Lisboa et al., 2018, apresentaram uma investigação de um dispositivo CAO instalado na costa sul do Brasil. Os autores utilizaram o *software* FLUENT, baseado no método dos volumes finitos (VOF) e no modelo de equações de Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) para modelagem de turbulência. O dispositivo é equipado com uma turbina do tipo

*Wells*, com controle de pressão e regulação da velocidade de rotação, tendo a solução do campo hidrodinâmico separado da modelagem da turbina.

Cappietti et al., 2019, apresentaram um estudo experimental de um conversor do tipo CAO e um de Galgamento acoplados. Os testes para os modelos foram realizados em um canal de ondas e como resultados preliminares obteve-se que o dispositivo CAO-Galgamento acoplados se apresenta como uma alternativa aos métodos de conversão de energia das ondas. Um estudo da profundidade de submersão deverá ser realizado em trabalhos futuros para, assim, determinar uma maior eficiência para o dispositivo.

Barbosa et al., 2019, apresentaram um estudo referente a dispositivos de Galgamento. A investigação tem como objetivo analisar numericamente algumas rampas de dispositivos de galgamento bidimensionais por meio do código OpenFOAM. Os resultados mostraram que o OpenFOAM está em conformidade com as características esperadas para geração de ondas numéricas quando comparado com outros códigos CFD, para as magnitudes de vazão mássica instantânea e quantidade de água galgada no dispositivo quando comparados com os resultados encontrados com o *software* FLUENT.

Guimarães et al., 2019 apresentaram um estudo numérico bidimensional em que foi avaliada a viabilidade energética do potencial das ondas na costa brasileira. Simulações numéricas foram realizadas para determinar a altura significativa das ondas e a taxa de potência das mesmas utilizando um modelo espectral bidimensional TOMAWAC. Os resultados mostraram que em áreas próximas à costa a média de taxa de potência atingiu valores de 15 kW/m, enquanto os valores *offshore* alcançam de 18 a 20 kW/m, sendo mais frequentes na plataforma Sul-Sudeste brasileira.

Um dos objetivos desta tese é o de investigar, através de simulação numérica, o princípio de funcionamento de dispositivos do tipo CAO com múltiplas câmaras hidropneumáticas acopladas e a otimização da sua geometria bidimensional, para o melhor aproveitamento da energia presente na conversão, tendo sua solução do campo hidrodinâmico separado da modelagem da turbina, sendo a mesma não modelada neste problema. Uma estratégia que tem sido empregada para obtenção de melhores configurações é o Design Construtal que é baseado na Teoria Construtal desenvolvida por Adrian Bejan [Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008], associado a algum método de otimização como a busca exaustiva e algoritmo genético.

A *Teoria Construtal* explica como a geração de estruturas submetidas a alguma espécie de fluxo/escoamento que são vistas em qualquer lugar na natureza (secção transversal de rios, vasos capilares de pulmões, movimentação de massas atmosféricas, entre outros) pode ser predita através de um princípio do acesso aos escoamentos no tempo. Este princípio é a *Lei Construtal*, que afirma que “para um sistema finito onde há escoamento persistir ao longo do tempo (sobreviver) sua configuração geométrica deve evoluir livremente de forma a facilitar o acesso das correntes que fluem através deste sistema” [Bejan e Lorente, 2008].

Muitas áreas do conhecimento estão aplicando o Design Construtal na construção de suas pesquisas. Em Razera et al., 2019, os autores mostraram diferentes aplicações da associação do método a diferentes áreas de estudo, mostrando a versatilidade e as mais diversas aplicações e interpretações que podem ser dadas.

Por exemplo, em Biserni et al., 2007, os autores utilizaram a Teoria Construtal para otimizar a geometria de uma cavidade em forma de H que é introduzida em uma parede condutora sólida. O objetivo foi minimizar a resistência térmica global entre o meio sólido e a cavidade. Já Lorenzini et al., 2013, utilizam-se da teoria Construtal para otimizar a geometria de uma cavidade em formato de T que é inserida em uma parede condutora sólida.

Isoldi et al., 2013, apresentaram um estudo para obter a geometria ótima que minimiza a concentração de tensões ao longo de uma placa plana ou suportar a mais alta carga de deformação na mesma.

Em redes de distribuição de água potável, Bieupoude et al., 2013, utilizaram a Teoria Construtal e empregaram a mesma na otimização do uso da energia minimizando a potência de bombeamento (através da otimização da geometria da rede), a qual é uma questão crítica em países em desenvolvimento.

Em Chiavazzo et al., 2015, foi utilizada a minimização da geração de entropia para interpretar o comportamento dos animais, em particular, onde as fêmeas das aranhas *meta menardi* escolhem para colocar seus ovos, ou casulos, a fim de minimizar a irreversibilidade termodinâmica.

Heyer, 2019, apresentou um trabalho em que aplica a lei Construtal na neurociência e nas artes. O autor faz uma correlação entre o Design Construtal e o formato dos olhos humanos de forma a verificar como se dá a percepção dos mesmos em relação a algumas obras artísticas que remetem a falsas percepções visuais e como o cérebro processa tais informações.

Um trabalho que remete a área da medicina foi desenvolvido por Dutra et al., 2019. Neste trabalho, foi apresentado um estudo do *design* de pequenas tubulações que possibilitam o desvio da corrente sanguínea em artérias entupidas em decorrência do acúmulo de gordura. O estudo define o ângulo que apresenta uma diminuição da pressão sanguínea em decorrência da normalização do escoamento de fluxo da mesma.

Uma gama de trabalhos em energia das ondas do mar vem sendo desenvolvido associando métodos de otimização, como busca exaustiva e algoritmo genético, e o *Design Construtal*. As pesquisas abordam uma grande gama de princípios de funcionamento, dentre eles destacam-se: Coluna de água Oscilante, Galgamento e Placas Submersas.

Machado et al., 2011, realizaram um estudo tridimensional de um dispositivo de galgamento, em que o principal objetivo foi a determinação da influência do ângulo de abertura da rampa sobre a vazão mássica de água que entra no reservatório. O *Design Construtal* foi utilizado na verificação das três diferentes configurações de rampas e como resultado obteve-se um desempenho superior quando comparada as rampas determinadas pelo indicador de performance.

Outros trabalhos, envolvendo diferentes tipos de conversores de energia das ondas e o uso do *Design Construtal*, podem ser encontrados nos trabalhos de: Dos Santos et al., 2014, Goulart, 2014, Machado 2016, Seibt et al., 2017, Martins et al., 2017 e Barbosa et al., 2019. Todos os trabalhos citados são de pesquisadores brasileiros.

A associação do *Design Construtal* e dispositivos CAO apresenta uma quantidade de trabalhos que mostram estudos de otimização geométrica e parametrização de dispositivos através de tipos de onda (comprimento e altura da onda).

Em Gomes et al., 2012b, foi realizado um estudo numérico bidimensional sobre otimização geométrica, utilizando *Design Construtal*, de um dispositivo do tipo CAO *offshore*, em que foram variados dois graus de liberdade:  $H_1/L$  (razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO) e  $H_2/l$  (razão entre a altura e o comprimento da chaminé). Como resultado, foi mostrado que o método encontrou uma geometria que foi cerca de dez vezes melhor que o caso *standard* definido pela literatura.

Dando continuidade ao trabalho desenvolvido, Gomes et al., 2013a, empregam uma onda na escala real com período de 5s. Os graus de liberdade  $H_1/L$  e  $H_3$  (profundidade de submersão) foram variados e otimizados. Os resultados apontaram uma recomendação teórica sobre a geometria da câmara CAO que maximiza a eficiência do dispositivo conversor. Já

Gomes et al., 2013b, realizaram uma comparação entre a localização *offshore* e *onshore* para o dispositivo CAO, submetido a uma onda na escala real. O grau de liberdade  $H_1/L$  (razão entre a altura e o comprimento da câmara do dispositivo de coluna de água oscilante) foi variado.

Em Gomes, 2014, foi realizado um estudo numérico bidimensional sobre a otimização da geometria de um dispositivo do tipo CAO, levando em consideração o clima de ondas de uma dada região e, a partir disso, dimensionar o dispositivo de modo que ele tenha um desempenho otimizado. No mesmo trabalho também foi feita uma investigação sobre a influência da perda de carga da turbina através de uma restrição física.

Em Espinel et al., 2014a, foi variado o grau de liberdade  $H_2/l$  (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) e, em Espinel et al., 2014b, foram variados  $H_1/L$  e  $H_2/l$  para determinar as dimensões ótimas da câmara e a chaminé do dispositivo CAO, respectivamente, para maximizar a potência hidropneumática, usando um comprimento de onda e um período que descrevem uma onda regular em escala real.

Em Espinel, 2015, foi tratada a maximização da potência hidropneumática convertida em um dispositivo do tipo coluna de água oscilante (CAO). O método Design Construtal, associado à Busca Exaustiva, é aplicado para aprimorar a geometria e a profundidade de submersão do dispositivo.

Em Lima et al., 2015a, foi utilizado o Design Construtal, associado ao método de busca exaustiva, para obter a geometria que apresenta o mais alto desempenho em relação a potência hidropneumática considerando diferentes formas da região de transição entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO. As formas geométricas analisadas são no formato trapezoidal e semicircular como pode ser observado nas Figuras 1.4 e 1.5.

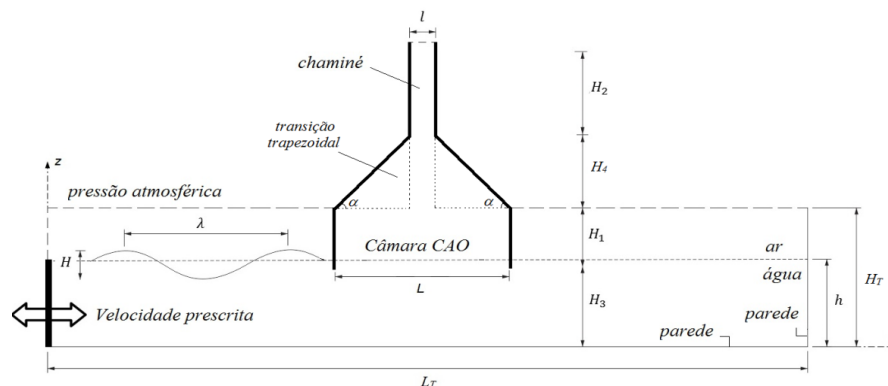


Figura 1.4 – Domínio bidimensional do dispositivo CAO com região de transição trapezoidal sem restrição na chaminé do dispositivo.

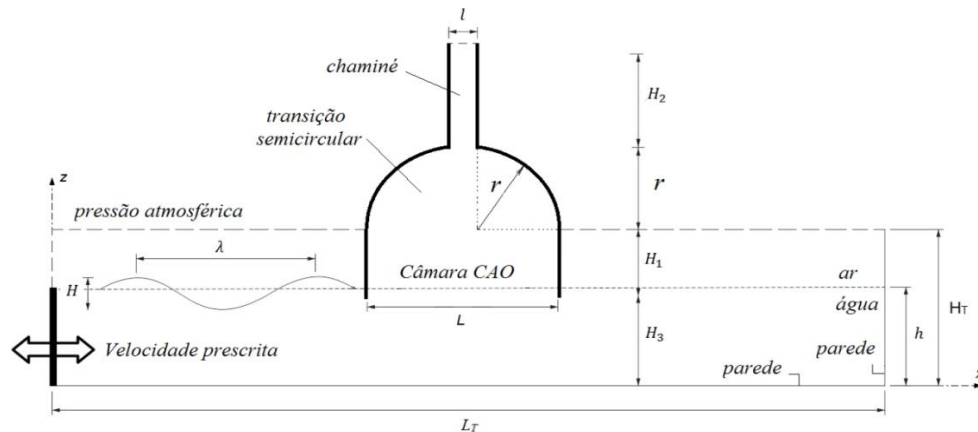


Figura 1.5 – Domínio bidimensional do dispositivo CAO com região de transição semicircular sem restrição na chaminé do dispositivo.

Em Lima et al., 2016a, os autores seguem os estudos realizados nos trabalhos feitos no ano anterior, mas agora variando mais graus de liberdade, como o ângulo de inclinação da parede entre a câmara hidropneumática e a chaminé do dispositivo CAO ( $\alpha$ ) e a razão entre altura e comprimento da chaminé do dispositivo ( $H_2/l$ ). Os graus de liberdade  $H_1/L$  (razão entre altura e comprimento da câmara hidropneumática) e  $H_3$  (profundidade de submersão do dispositivo) são mantidos constantes. Os resultados obtidos concordam com os encontrados no trabalho anterior e ainda pode-se obter uma recomendação teórica acerca de mais graus de liberdade.

Em Lima et al., 2017, os autores realizaram o estudo da altura e largura da câmara hidropneumática para dois dispositivos acoplados. Como resultado foi obtido uma recomendação teórica numérica, inicialmente para a elevação da altura dos dispositivos CAO acoplados.

Gomes et al., 2018, desenvolveram pesquisa numérica considerando um dispositivo CAO com uma câmara hidropneumática retangular sujeita a diferentes períodos de onda em escala real e variando dois graus de liberdade:  $H_1/L$  (razão da altura para o comprimento da câmara hidropneumática) e  $H_3$  (submersão do dispositivo). Os resultados mostram que a relação  $H_1/L$  quatro vezes maior que a relação altura/comprimento da onda incidente ( $H/\lambda$ ) maximiza a potência hidropneumática.

Em Lima et al., 2018a, os autores apresentaram um trabalho em que foram avaliados três graus de liberdade em um dispositivo CAO acoplado. Foram avaliadas as relações de

altura e largura das câmaras hidropneumáticas, altura da coluna que divide os dispositivos e espessura da coluna que divide os mesmos. Como resultado, verificou-se um aumento da potência hidropneumática à medida que se utilizam como valores de referência os graus de liberdade analisados.

Deus et al., 2018, realizaram um estudo de um dispositivo CAO com uma câmara no formato de duplo trapézio submetido a um espectro de ondas do tipo Person-Moskowitz. Foi avaliado um grau de liberdade: a razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática. Como resultado, a análise de configuração geométrica conduziu ao máximo aproveitamento da potência hidropneumática disponível, notando-se diferenças médias de cerca de 40 W.

Gomes et al., 2019, investigaram um dispositivo em formato retangular submetido a um espectro de ondas do tipo JONSWAP utilizando o *Design Construtal* para a avaliação geométrica do mesmo. Os resultados apresentaram uma recomendação teórica em relação à geometria que maximiza a energia convertida sujeita a um modelo de ondas irregulares.

Posteriormente, Lima et al., 2019a, realizaram o estudo de um dispositivo OWC com quatro câmaras acopladas tendo como graus de liberdade o  $H_n/L_n$  (relação altura / comprimento das câmaras acopladas hidropneumáticas). Os resultados mostraram que um pico de potência hidropneumática é encontrado para os valores médios dos graus de liberdade estudados.

Em Letzow et al., 2020, um dispositivo OWC onshore em escala real foi considerado utilizando como graus de liberdade a relação entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática, a relação entre a altura e o comprimento da rampa do dispositivo e a profundidade de submersão do dispositivo. Os resultados mostraram que o uso da rampa no fundo do mar levou a potência a uma conversão máxima de 37,3% maior em relação ao melhor caso sem a rampa.

Ao contrário dos resultados anteriores, em Gomes et al., 2021, um espectro de onda JONSWAP foi usado para estudar a influência de diferentes geometrias para a câmara hidropneumática com um grau de liberdade,  $H_1/L$ , (a relação entre a altura e o comprimento da entrada da câmara OWC). Quatro geometrias distintas de câmaras foram analisadas: retangular, trapezoidal, trapézio invertido e trapézio duplo. Os resultados mostraram que a geometria retangular apresentou uma melhora superior às demais estudadas.



No campo da engenharia, o método *Design Construtal*, tem sido predominantemente empregado para o estudo da geometria de problemas na área de mecânica de fluidos e transferência de calor. Em função da quantidade de trabalhos já publicados é evidente a aplicabilidade do *Design Construtal* associado aos métodos de otimização, o que torna esta pesquisa uma contribuição importante para o estado da arte, visto que, o estudo da variação geométrica de dispositivos CAO com câmaras acopladas mostra-se uma investigação inédita na literatura.

### **1.3 Proposta e Objetivos do Trabalho**

No presente trabalho é abordado numericamente o princípio de funcionamento de um dispositivo do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) usando a metodologia *Volume of Fluid* (VOF). São propostos seis estudos que variam em função do número de câmaras acopladas ao dispositivo, variando de uma até cinco câmaras. No final, é realizada uma análise do desenvolvimento da potência disponível conforme se aumentam o número de câmaras. O trabalho é realizado considerando ondas regulares.

#### **1.3.1 Objetivo Geral do Trabalho**

O objetivo geral maximizar a potência hidropneumática convertida disponível nos dispositivos CAO com até cinco câmaras hidropneumática acopladas submetido a ondas incidentes regulares em um problema bidimensionais. Além disso, compreender como o *design* afeta o desempenho de um sistema complexo que apresenta um crescimento linear do número de câmaras acopladas.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar as configurações geométricas através do Design Construtal e a inserção de dispositivos que vão de uma a cinco câmaras acopladas e definir qual apresenta maior potência hidropneumática disponível para cada caso analisado;

- Verificar a eficiência do uso de câmaras acopladas em comparação a dispositivos com câmaras isoladas.
- Analisar o efeito da variação da espessura e a altura das paredes que dividem as câmaras acopladas sobre a potência hidropneumática;
- Verificar o efeito da inserção de diversas câmaras acopladas sobre o design e o desempenho de um dispositivo CAO;
- Comparar os resultados obtidos para cada um dos casos de câmaras acopladas estudados;
- Investigar o efeito do número de câmaras acopladas sobre a potência hidropneumática uma vez maximizada e determinações de razões ótimas da geometria da câmara.

## 1.4 Organização do Trabalho

O trabalho proposto foi organizado em oito capítulos e três apêndices.

No Capítulo 1 é apresentada a motivação para o estudo de conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, a revisão bibliográfica, proposta de estudo e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada uma visão geral dos conversores de energia das ondas do mar dos mais diversos princípios de funcionamento, uma explicação referente às turbinas utilizadas para a conversão energética e os recursos nacionais em relação à energia das ondas.

No Capítulo 3 realiza-se uma revisão sobre a teoria de ondas oceânicas, abordando-se a teoria não linear de ondas.

No Capítulo 4 apresenta-se a definição de Design Construtal, Lei Construtal e Teoria Construtal. Também é apresentada toda a formulação matemática com aplicação do método Design Construtal.

No Capítulo 5 é apresentada a modelagem computacional do problema estudado. Discutem-se as etapas da simulação numérica, a geração de malhas, o modelo *Volume of Fluid* (VOF), o método dos Volumes Finitos (MVF) e os métodos numéricos de solução das equações de conservação. Aborda-se, também, a verificação e validação da onda gerada e apresenta-se um esquema da variação dos graus de liberdade estudados neste trabalho.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos. O mesmo está dividido em cinco subcapítulos, apresentando em cada um o incremento de uma câmara acoplada ao dispositivo. Ao final é apresentado um estudo que considera todas as variações geométricas e determina qual quantidade de dispositivos acoplados tem maior conversão energética.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões da tese e as propostas de continuidade do trabalho. O Apêndice A apresenta os trabalhos publicados como resultado das pesquisas desenvolvidas durante o doutorado, o apêndice B apresenta as tabelas das configurações geométricas dos casos simulados e o apêndice C apresenta os resultados das simulações efetuadas.

## **2 ENERGIA NOS OCEANOS**

O nível de consumo de energia é uma das formas mais diretas de medir o progresso e o bem-estar da sociedade. A eletricidade é o fator importante para a industrialização, urbanização e crescimento financeiro de qualquer país [Khare et al., 2016].

Hoje, a população mundial está em mais de 7,8 bilhões de pessoas. O uso de energia per capita nos países desenvolvidos é muito alto [IEA, 2018]. Dado que as fontes tradicionais de energia são finitas e a demanda energética necessária não será totalmente atendida em um futuro próximo, as energias renováveis desempenham um papel fundamental na busca por alternativas aos combustíveis fósseis [López et al., 2013].

O potencial associado à tecnologia de energia oceânica, em termos de segurança de abastecimento, crescimento econômico e redução de emissões de CO<sub>2</sub>, tem estimulado um interesse crescente em apoiar o desenvolvimento de tecnologias provenientes do mar e o estabelecimento de mercados globais da mesma. As formas de extração energética do oceano passam por diversos tipos que envolvem: energia térmica, potência de gradiente de salinidade, energia das marés e a energia das ondas.

A energia das ondas é a forma mais visível de energia oceânica. As ondas são produzidas pela ação do vento e são, portanto, uma forma indireta de energia solar [Falcão, 2010]. A energia proveniente das ondas é certamente um componente significativo da energia renovável devido à sua alta densidade de energia e menor impacto ambiental [Veiga et al., 2014].

### **2.1 Energia das Ondas do Mar**

Os recursos energéticos provenientes de energias renováveis são considerados como uma alternativa a demanda excessiva de energia mundial [Nazarpour, 2013]. A energia renovável marinha (ERM) é uma possibilidade viável, uma vez que os oceanos cobrem cerca de 70% da superfície da terra e contém 97,2% da água total do planeta [Clément et al., 2002].

As ondas do mar são consequência da transferência de energia dos ventos ao longo de uma faixa sobre a superfície oceânica. A energia contida nas ondas é, assim, uma forma concentrada de energia solar [Tolmasquim, 2016]. A energia das ondas pode ser decomposta

em energia cinética das partículas de água, as quais geralmente seguem trajetórias circulares, e a energia potencial das partículas de água, como mostra a Figura 2.1.

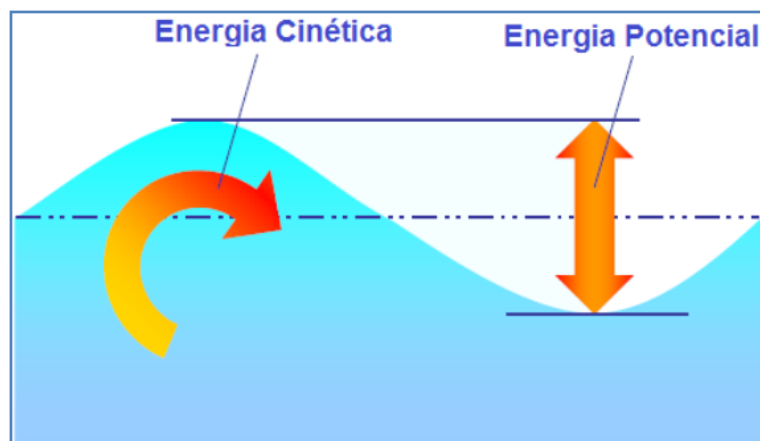


Figura 2.1 – Representação das duas formas de energia das ondas [Tomalsquim, 2016].

Um aspecto presente nas ondas do mar é que as mesmas podem viajar por milhares de quilômetros sem perdas significativas de energia. No entanto, ao atingirem águas de pouca profundidade, a velocidade se reduz, o comprimento de onda diminui e a altura aumenta o que se traduz na rebentação da onda, na proximidade da linha de costa. As maiores perdas de energia se devem aos efeitos de fundo e, desta forma, apenas uma fração da energia chega à costa [Dean e Dalrymple, 1991].

Estima-se que o valor global da energia contida nas ondas do mar é de cerca de 10 TW, equivalente a todo o consumo de eletricidade do planeta. Obviamente, há restrições quanto ao uso de grandes áreas dos oceanos, devido às rotas de navegação, regiões turísticas e de lazer. [COPPE, 2014].

No Brasil, com aproximadamente oito mil quilômetros de litoral, calcula-se que a capacidade de instalação de dispositivos conversores de energias das ondas seja de 87 GW, sendo que o total da soma de todas as formas de energia do oceano no território nacional seja de 114 GW (27 GW de energia das marés), equivalente a oito usinas de Itaipu ou a mais de 100% da potência instalada no país no ano de 2020, que segundo a ANEEL é de, aproximadamente, 174,6 GW [Estefen, 2012, ANEEL, 2021].

A distribuição de energia das ondas mundial apresenta-se de modo irregular pelo globo terrestre, como pode ser verificado na Figura 2.2, sendo sua avaliação estimada como potência por comprimento de frente de onda (kW/m).

A potência média das ondas é maior em regiões de grandes latitudes e está entre 40 e 100 kW/m de frente de onda. Valores considerados significativos para exploração variam de 20 a 70 kW/m e ocorrem principalmente em latitudes moderadas e altas. No sul do Brasil, tem-se disponível em torno de 35 kW/m, sendo, portanto, uma alternativa de fonte de energia importante para a região [Davyt, 2012; Gomes, 2014; Tomalsquim, 2016].

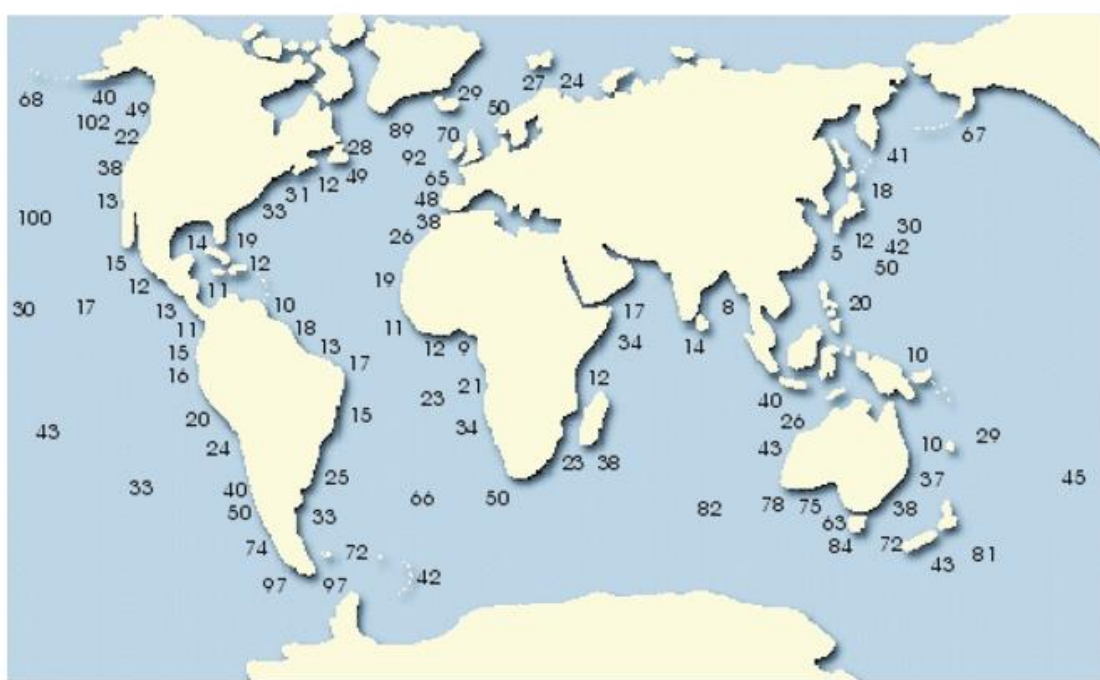


Figura 2.2 – Potência anual em kW/m de frente de onda  
[Thorpe, 2004].

## 2.2 Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar

A energia das ondas é considerada como uma das fontes de energia renovável com maior potencial de desenvolvimento ao longo dos próximos anos [Cruz & Sarmiento, 2004]. Uma ampla variedade de WECs (*wave energy converters*) foi desenvolvida. Hoje em dia são mais de mil protótipos, que, em termos gerais, podem ser classificados de acordo com três características principais: localização, tamanho e princípio de funcionamento.

Portanto, cada WEC pode ser classificado em vários grupos, dependendo de suas características [Pelc et al., 2002]. No entanto, esses critérios não cobrem todas as possibilidades existentes de converter a energia das ondas em eletricidade, como as estruturas multifuncionais, que não estão sendo descritas completa e corretamente por esses critérios.

O aproveitamento da energia das ondas envolve processos hidrodinâmicos consideravelmente complexos do ponto de vista da sua formulação teórica, tanto pelos fenômenos decorrentes da interação entre a água e o equipamento, como difração e radiação de ondas, como pela própria natureza aleatória do fenômeno de geração das ondas. Por esta razão, a concepção e o desenvolvimento de equipamentos capazes de converter essa energia é uma tarefa bastante complexa [Falcão, 2010].

O critério de classificação envolvendo a localização do dispositivo em relação à costa define-se através da profundidade em que se encontram os mesmos. Agrupam-se, desta forma, em dispositivos costeiros (*onshore*), dispositivos próximos da costa (*nearshore*) e dispositivos afastados da costa (*offshore*) [Cruz e Sarmento, 2004].

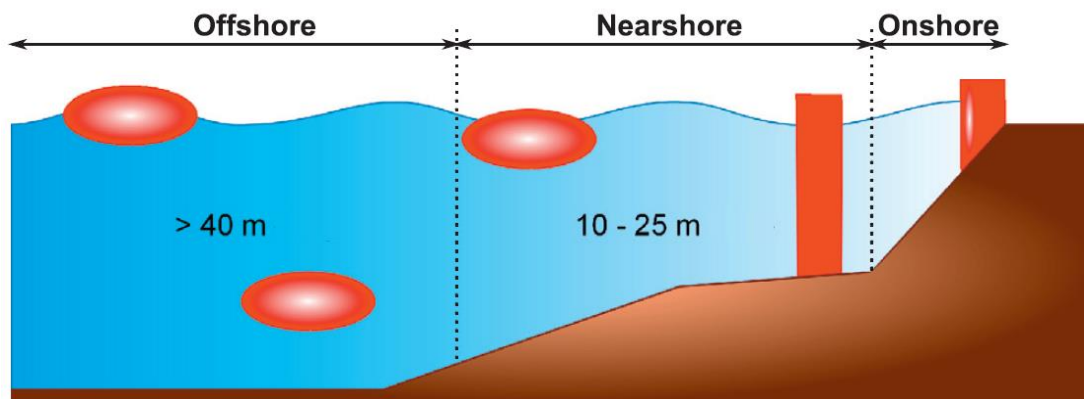


Figura 2.3 – Localização dos dispositivos em relação à costa [López et al., 2013].

A distribuição das pesquisas e desenvolvimento em dispositivos *onshore*, *nearshore* e *offshore* se mostra muito mais recorrente em estudos para dispositivos em maiores profundidades. Os autores em Magagna et al., 2015, apresentaram um gráfico e uma análise, em que são mostradas as proporções de estudo das três classificações em relação ao local de instalação dos dispositivos. Um ponto interessante de se verificar é a possibilidade de um dispositivo ser tanto *nearshore* como *offshore*, a Figura 2.4, apresenta as proporções de pesquisa e desenvolvimento.

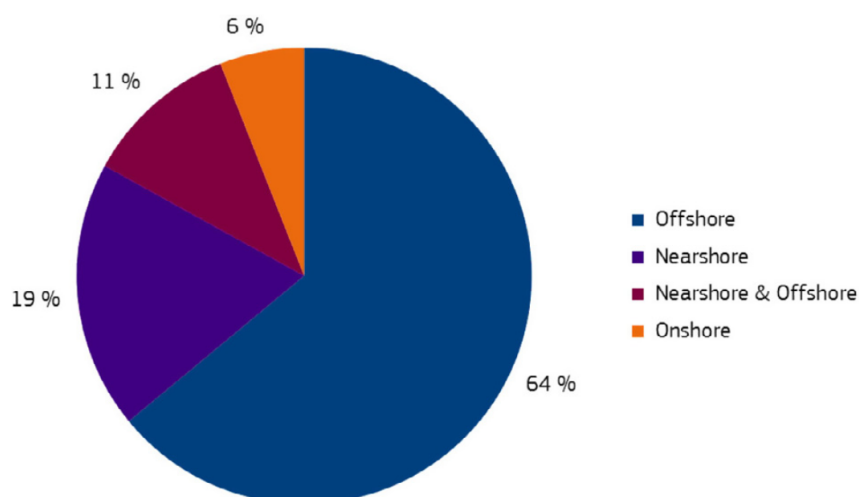


Figura 2.4 – Percentual de pesquisa e desenvolvimento de dispositivos conversores de energia das ondas do mar [Mofor et al., 2014].

Os dispositivos costeiros (*onshore*) estão localizados na costa e podem ser colocados em terra (em águas rasas), integrados em quebra-mar, em uma represa ou fixados em uma estrutura rochosa junto à praia. A principal vantagem desses conversores é sua fácil manutenção e instalação porque, na maioria dos casos, o local é acessível [Czech et al., 2012].

Além disso, eles não precisam de sistemas de ancoragem nem de longos comprimentos de cabos marítimos para conectar o WEC à rede de distribuição. No entanto, no litoral, as ondas contêm menos energia porque sua interação com o fundo do mar e a falta de terrenos adequados também causam dificuldade para a implementação desses sistemas.

Problemas ambientais também podem surgir, pois a costa do mar deve ser remodelada para a implementação dos WEC. Dispositivos desse tipo são classificados como de primeira ordem [Falcão, 2010; Drew et al., 2009; Czech et al., 2012].

Em contrapartida, os dispositivos próximos da costa (*nearshore*), classificados como de segunda ordem, são instalados a algumas centenas de metros da costa em águas de profundidade moderada (10 a 25 m). Eles geralmente ficam parados no fundo do mar (evitando atracções), mas a estrutura deve suportar as tensões que surge quando as ondas passam sobre ela. Em alguns casos, também são estruturas flutuantes e vale ressaltar que eles estão em uma região de maior potencial de ondas [Falcão, 2010; Drew et al., 2009; Czech et al., 2012].



Por fim, os dispositivos em alto mar (*offshore*), classificados como de terceira ordem, estão localizados em águas profundas (mais de 40 m), longe da costa, e construídos em estruturas flutuantes ou submersos atracados no fundo do mar. Devido à sua localização, eles podem explorar o vasto poder das ondas do mar aberto [Falcão, 2010]. Em função da abertura para o mar, a confiabilidade e capacidade de sobrevivência do dispositivo é um grande problema e sua estrutura tem que suportar cargas muito altas. Além disso, sua manutenção é um processo complicado e caro [Falcão, 2010; Drew et al., 2009; Czech et al., 2012].

A outra forma de classificação é em relação ao tamanho do dispositivo e características da onda que incide sob o mesmo. Os dispositivos de absorção pontual em comparação com o comprimento de ondas, geralmente são significativamente menores em relação ao diâmetro. Ao contrário de outros dispositivos, o absorvedor pontual recolhe a energia em todas as direções através dos movimentos. Esses dispositivos geram eletricidade a partir da ação de balouçar ou arremessar de um dispositivo, convertendo o movimento de subida e descida das ondas em movimentos rotatórios ou movimentos oscilatórios (dependendo do dispositivo específico). A Figura 2.5A apresenta um exemplo desses dispositivos, em especial o PowerBuoy 500kW [Lagoun et al., 2010].

Os dispositivos atenuadores são dispositivos WECs com estruturas longas comparadas com o comprimento de onda que incide sobre as mesmas e são colocadas em paralelo com relação à direção da onda. Em essência, eles “atenuam” a amplitude da onda. Atenuadores são compostos por uma série de seções cilíndricas ligadas entre si por articulações flexíveis que permitem que essas seções individuais girem em relação umas às outras. Um exemplo típico desse tipo de dispositivo é apresentado na Figura 2.5B, sendo o mesmo um dispositivo Pelamis 750 kW [Lagoun et al., 2010].

Por último, têm-se os dispositivos do tipo galgamento. Esses dispositivos são semelhantes aos atenuadores, já que também são estruturas longas. No entanto, os mesmos são colocados perpendicularmente às direções predominantes das ondas e em essência dissipam a ação da onda. Um exemplo é apresentado na Figura 2.5C, com o dispositivo Wave Dragon [Waveplane, 2019].

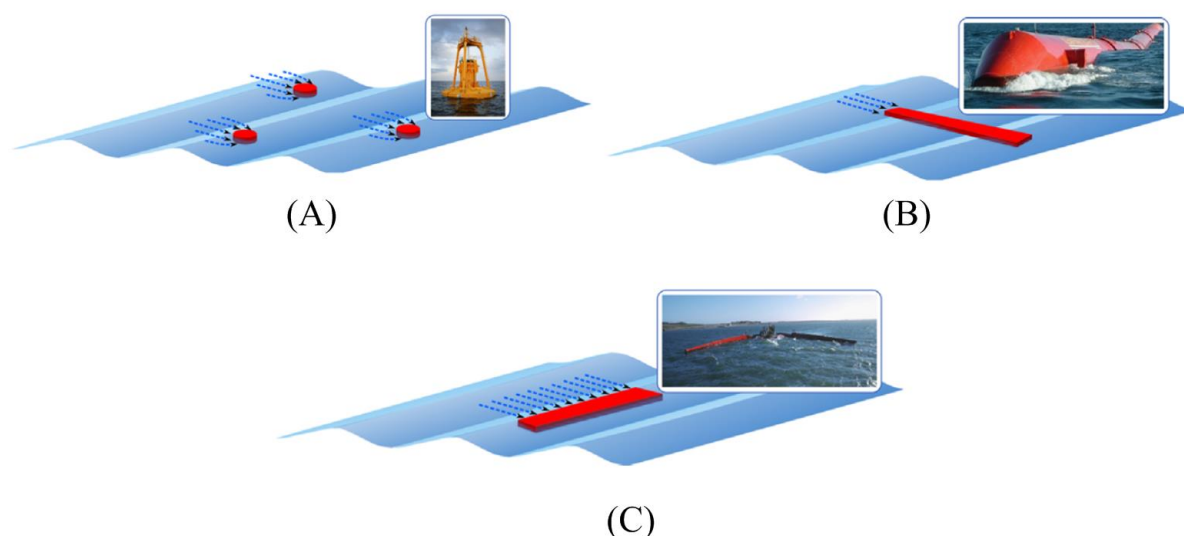


Figura 2.5 – Classificação dos dispositivos conversores de energia das ondas do mar em relação ao tamanho [López et al., 2013].

Outra classificação possível está associada ao princípio de funcionamento do conversor de energia das ondas do mar. Assim, existem, três classes principais de conversores de energia das ondas, que são: Coluna de Água Oscilante (CAO), Estruturas Flutuantes, podendo ser de absorção pontal (*point absorbers*) ou progressivos (*surging devices*), e galgamento [Cruz e Sarmento, 2004; Aquanet].

A Figura 2.6 apresenta esquematicamente algumas tecnologias existentes classificadas de acordo com o princípio de funcionamento.

Os conversores do tipo estruturas flutuantes são dispositivos onde a passagem da onda provoca oscilações. Através desse movimento, a energia da onda é convertida em eletricidade. Estes equipamentos oscilam relativamente a uma referência fixa ou a outras partes do equipamento. O movimento relativo do dispositivo pode ser utilizado para comprimir o fluido de trabalho e acionar uma turbina ou utilizar um gerador linear [Davyt, 2012].

Nos dispositivos de absorção pontual (*point absorbers*), o flutuador se move verticalmente ou em torno de um eixo em relação a uma estrutura fixa no fundo do mar. Nos conversores do tipo progressivo (*surging devices*), seus componentes possuem movimentos em relação a sua própria estrutura devido à incidência das ondas, gerando energia elétrica [Cruz e Sarmento, 2004; Iahnke, 2010].

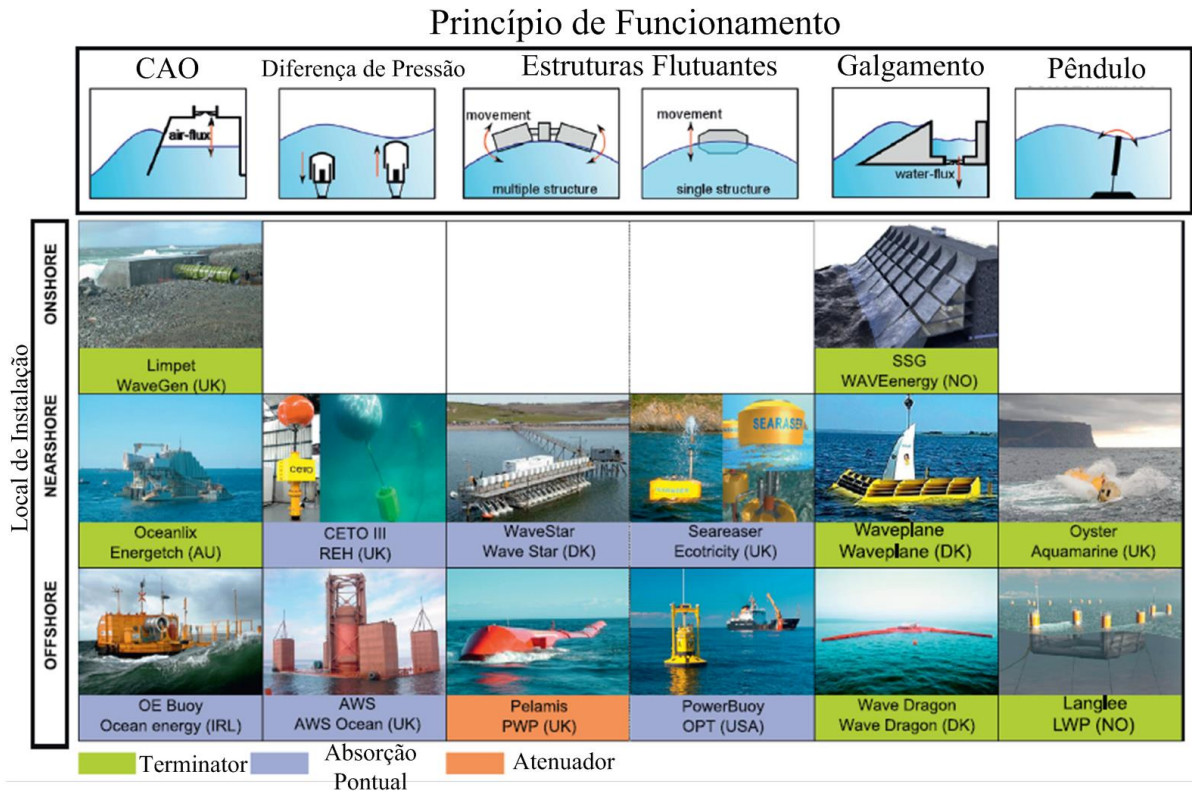


Figura 2.6 – Princípio de funcionamento e local de instalação dos dispositivos conversores de energia das ondas [Adaptado de López et al., 2013].

Os dispositivos do tipo galgamento apresentam diferentes modelos (*Sea Wave*, *Wave Plane* e *Wave Dragon*), porém todos baseados no direcionamento das ondas oceânicas incidentes para uma rampa e um reservatório (posicionado em um nível acima ao do mar) que armazena a água que galgou esta rampa. Então, aproveitando a energia potencial dessa água armazenada, a mesma é devolvida ao oceano após passar por turbinas (semelhante às utilizadas em hidrelétricas de baixa queda), onde ocorre a conversão em energia elétrica [Cruz e Sarmiento, 2004; Iahnke, 2010].

A Figura 2.7 apresenta a pesquisa e desenvolvimento (P&D) percentual das diferentes formas de conversão de energia das ondas em desenvolvimento. Observa-se que a Coluna de Água Oscilante (CAO) ocupa o terceiro lugar atualmente. O percentual apresentado na Figura 2.7 excede o 100% em função de representar o quanto se está estudando esse dispositivo em comparação com outras formas de obtenção energética renovável, avaliando assim cada princípio de funcionamento individualmente [López et al., 2013].

É importante, também, verificar como ocorre o processo desde a captação da energia das ondas até a distribuição na rede elétrica. A Figura 2.8, apresenta esquematicamente, como

ocorre todo o processo de conversão da energia das ondas, apresentando também os modelos de turbinas que serão apresentados na seção 2.4. Primeiramente a onda passa por um dos dispositivos conversores, se faz uma turbina entrar em funcionamento, converte-se a energia, manda-se para transformadores e, por fim, para a rede.

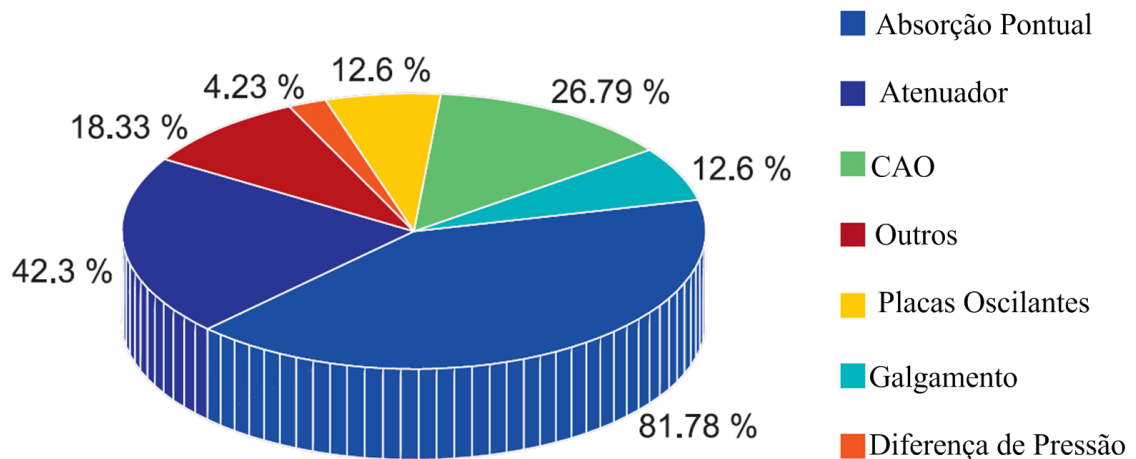


Figura 2.7 – Desenvolvimento percentual dos conversores de energia das ondas do mar [López et al., 2013].

Uma etapa importante no desenvolvimento de sistemas de conversão de energia das ondas é a realização de experimentos, geralmente realizados com um modelo em escala. Um modelo em escala pode representar tanto uma parte do equipamento como o equipamento inteiro e permite a avaliação de características específicas do seu funcionamento real, desde que suas dimensões sejam definidas por um fator de escala [McCormick, 1981].

No caso de modelos para estudo de escoamento de fluidos, esta escala é determinada por um critério de similaridade, o qual consiste em um fator de escala que permite estabelecer uma relação entre aspectos fluidodinâmicos do modelo e aspectos reais do escoamento. O uso de um critério de similaridade, no entanto, não altera o fato de que os modelos (numérico ou de laboratório) são construídos com base em simplificações do caso real. Um dos critérios mais utilizados em modelos de estudo de engenharia costeira é o Número de Froude que estabelece uma relação entre as forças de inércia e as forças de gravidade [Hughes, 1993].

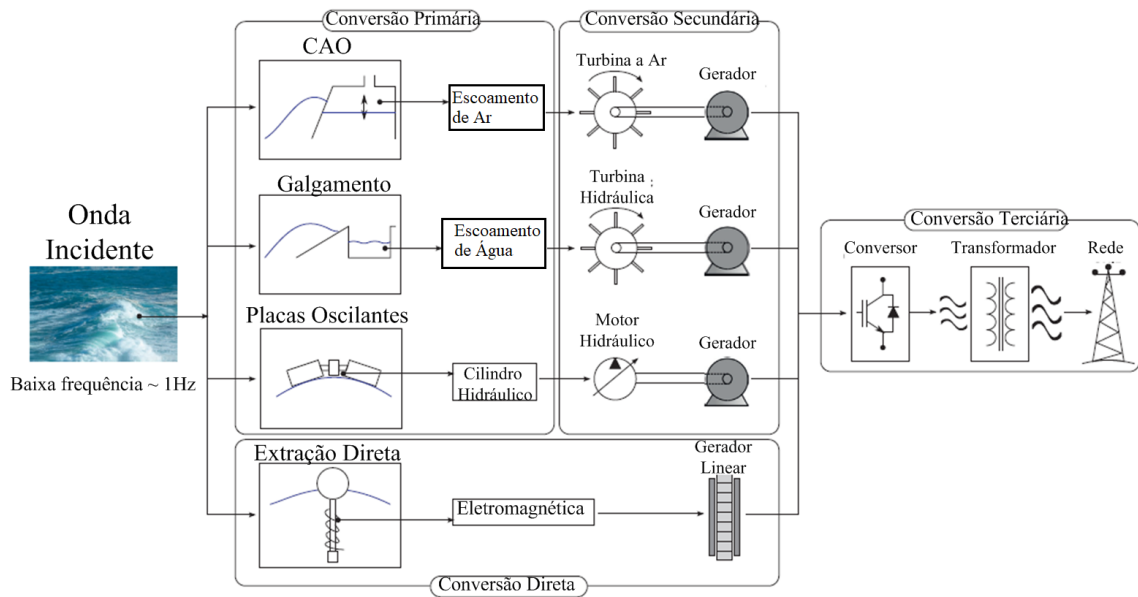


Figura 2.8 – Estágios de conversão da energia [Adaptado de López et al., 2013].

### 2.3 Conversor do Tipo Coluna de Água Oscilante

O dispositivo CAO foi um dos primeiros conceitos em extração da energia das ondas do mar [Tolmasquim, 2016]. Segundo Elhanafi et al., 2017, grande parte dos estudos sobre dispositivos CAO concentram-se para equipamentos localizados em terra (*onshore*) e próximos da costa (*nearshore*), pois estão diretamente conectados ao fundo do mar e pela facilidade de transmissão da energia convertida.

Os dispositivos CAO utilizam uma câmara semi-submersa aberta na parte inferior abaixo da superfície livre da água, o movimento recíproco das ondas aumenta e diminui o nível de água no interior da câmara, movendo o volume de ar interno. Esse escoamento de ar aciona uma turbina que gira sempre no mesmo sentido de rotação, embora o escoamento de ar seja bidirecional [Cruz & Sarmiento, 2004].

Para ter o aproveitamento dos sentidos opostos do fluxo de ar, normalmente são utilizadas turbinas do tipo *Wells*, as quais apresentam a propriedade de manterem o mesmo sentido de rotação das suas pás, independente do sentido do escoamento. O conjunto turbina e gerador é o responsável pela geração de energia elétrica [Cruz e Sarmiento, 2004].

Mesmo o princípio de funcionamento de um dispositivo de Coluna de Água Oscilante sendo simples, a construção de um modelo que descreva o seu funcionamento de uma forma fiel está longe de ser uma tarefa fácil. É importante no projeto destes dispositivos, conhecer a

potência incidente e as forças que atuam sobre eles. Assim, é possível adequar a geometria do equipamento à quantidade de energia que se pretende extrair.

As vantagens e desvantagens de utilização de dispositivos do tipo CAO devem ser levadas em consideração, pois são projetos que demandam, ainda, custos elevados. Uma vantagem de utilizar um dispositivo CAO para conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica é a velocidade do ar aumentada pela redução da área na seção transversal próximo à turbina, assim como o movimento lento das ondas para uma rotação rápida sem engrenagem mecânica [Twidell e Weir, 2015].

Outra importante vantagem é que a turbina e o gerador não ficam em contato direto com a água [Khaligh e Onar, 2010]. Uma desvantagem do dispositivo CAO são as grandes dimensões de concreto da estrutura, o que torna o custo da construção mais elevado [Khaligh e Onar, 2010]. As Figuras 2.9 e 2.10 apresentam esquematicamente o dispositivo CAO, tratado de forma tridimensional e bidimensional (com cinco câmaras acopladas), respectivamente.

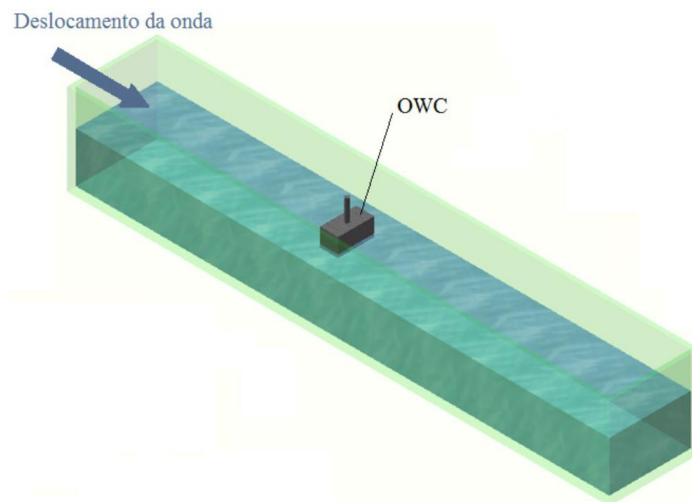


Figura 2.9 – Representação tridimensional do dispositivo CAO [Grimmler, 2013].

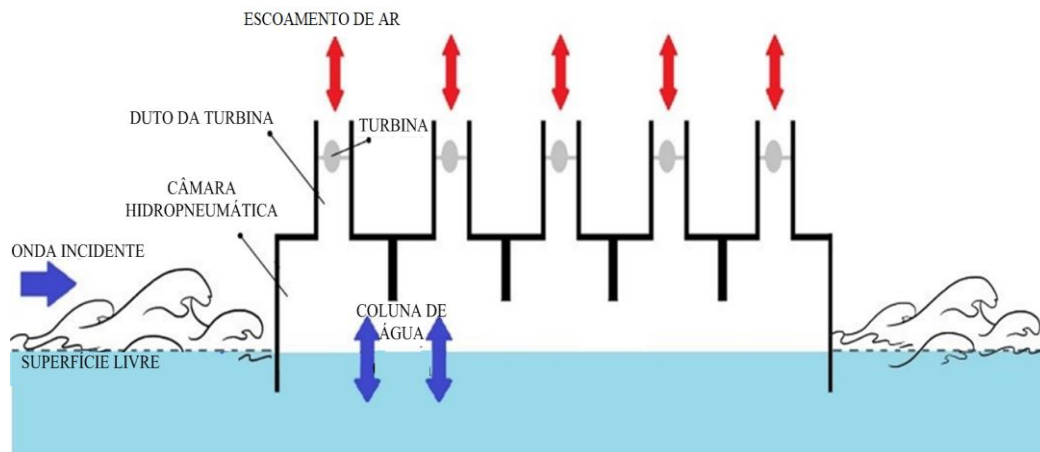


Figura 2.10 – Representação bidimensional do princípio de funcionamento do dispositivo Coluna de Água Oscilante acoplados.

A câmara CAO é um dos dispositivos de maior quantidade e duração de protótipos testados no mar, tendo inclusive algumas centrais piloto instaladas e outras em pleno funcionamento. Um destes projetos que se destaca é a central piloto da Ilha do Pico nos Açores (Portugal), a qual pode ser vista na Figura 2.11.

O local escolhido para a instalação da central piloto foi Porto Cachorro, costa noroeste da ilha do Pico, no arquipélago do Açores. O arquipélago apresenta condições propícias para o aproveitamento da energia das ondas. A sua localização é numa zona onde existe um elevado recurso energético, pelo fato de não existir uma plataforma continental responsável pela dissipação de energia das ondas por atrito no fundo, característica das ilhas vulcânicas [Cruz e Sarmiento, 2004].

O primeiro dispositivo em larga escala instalado para pesquisa foi perto de Bergen na Noruega, em 1985, e é mostrado na Figura 2.12A. Em 1991 foi construída a central *onshore* na ilha de Islay, na Escócia, avaliada em 75 kW, ela pode ser observada na Figura 2.12B.

Em 1990 um dispositivo CAO integrado a um quebra-mar foi construído na cidade de Sakata, Japão, com um potencial de 60 kW que pode ser visto na Figura 2.13A. O Oceanlinx é um projeto presente no porto MacDonnell na cidade australiana de Port Adelaide. Ele foi construído em 2014 e apresenta uma potência de 1 MW (pode ser visto na Figura 2.13B).



Figura 2.11 – Projeto de dispositivo 400 kW CAO da Ilha de Pico [Save Pico Powerplant, 2015].



Figura 2.12 – (A) Primeiro dispositivo em larga escala instalado (B) Central *Onshore* na ilha de Islay, Escócia.





Figura 2.13 – (A) Dispositivo localizado na cidade de Sakata, Japão e (B) Dispositivo Oceanlinx construído no porto de MacDonnell, Austrália.

Outro projeto de dispositivo *onshore* do tipo CAO é a Central do LIMPET na ilha de Islay (Escócia), o qual pode ser visto na Figura 2.14. A central LIMPET é a primeira a ser explorada comercialmente no mundo, foi instalada no ano 2000, tem capacidade de 500 kW e fornece energia elétrica a quatrocentas famílias da região.

Existem também alguns dispositivos *offshore*: o conversor *Mighty Whale* localizado no Japão, que pode ser visto na Figura 2.15A, e o *Energetech* localizado na Austrália, que pode ser visto na Figura 2.15B.



Figura 2.14 – Projeto de dispositivo CAO do LIMPET [Wavegen, 2015].



Figura 2.15 – Projeto de dispositivo: CAO Mighty Whale, Japão (A); CAO Energetech, Austrália (B) [Barreiro e Gil, 2008].

## 2.4 Turbinas para Dispositivos CAO

Turbinas de ar convencionais (turbinas unidirecionais) não são apropriadas para dispositivos CAO. No passado, este problema foi resolvido empregando sistemas de válvula retificadora para corrigir a direção do fluxo; hoje em dia, são utilizadas turbinas de ar de auto nivelamento [López et al., 2013].

Segundo Ramalhais, 2011, existem três tipos de turbinas que podem ser utilizadas em dispositivos do tipo CAO: *Wells*, Impulso e Denniss-Auld. A Turbina *Wells* foi inventada por A. A. Wells, em 1976, especificamente para ser utilizada com dispositivos de extração de energia das ondas do tipo CAO [Raghunathan, 1995]. Existem algumas variações onde a turbina de Pico (Figura 2.16A), por exemplo, possui guias que direcionam o escoamento.

A turbina Denniss-Auld (Figura 2.16B) foi desenvolvida na Austrália pela empresa Oceanlinx e foi instalada no dispositivo Oceanlinx OWC. É uma turbina auto retificadora semelhante a uma turbina *Wells* de passos variáveis. As pás estão localizadas na periferia do cubo do radiador em uma posição neutra, paralelas à direção axial do escoamento, em vez de serem tangenciais à direção de rotação como nas turbinas *Wells* e impulso.

A turbina impulso (Figura 2.16C) foi inventada em 1975 por I. A. Bebinsten. É uma turbina auto retificadora com um eixo de rotação perpendicular à direção de um fluxo de ar. Como a turbina *Wells*, ela possui várias versões.

A turbina *Wells* faz mover o eixo do gerador elétrico sempre no mesmo sentido de rotação, independente da direção do escoamento, como pode ser visto na Figura 2.17A. É

acionada pela variação de pressão e funciona na compressão e descompressão provocada pela onda incidente ao dispositivo. A Figura 2.17B mostra a Turbina Wells da central de Pico. (Watterson e Raghunathan, 1996)

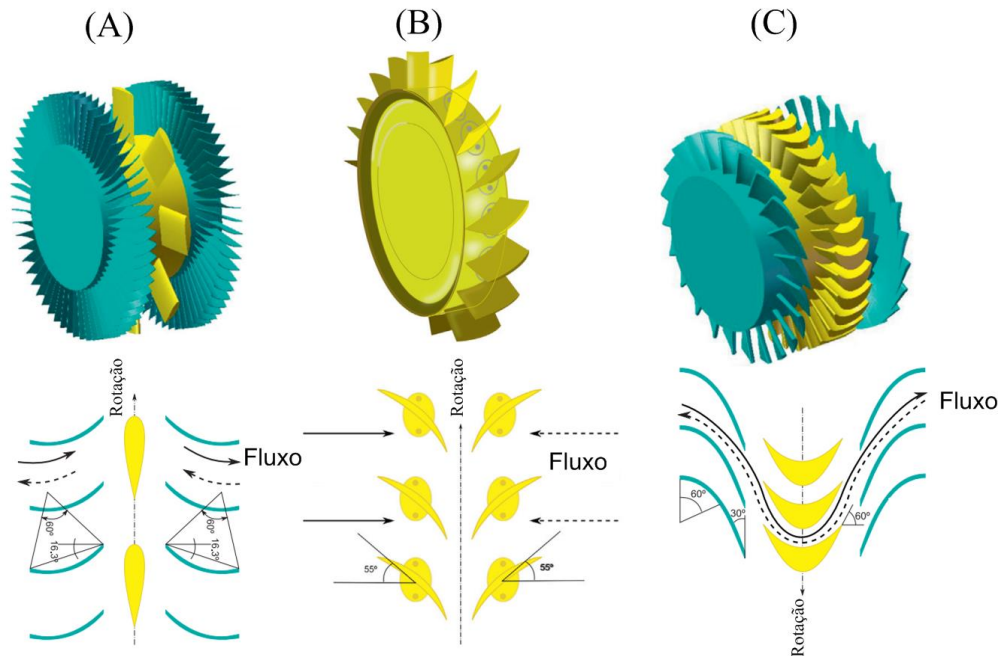


Figura 2.16 – Turbinas a ar para dispositivos CAO: (A) Wells, (B) Dennis-Auld e (C) Impulso [Wavegen, 2015].

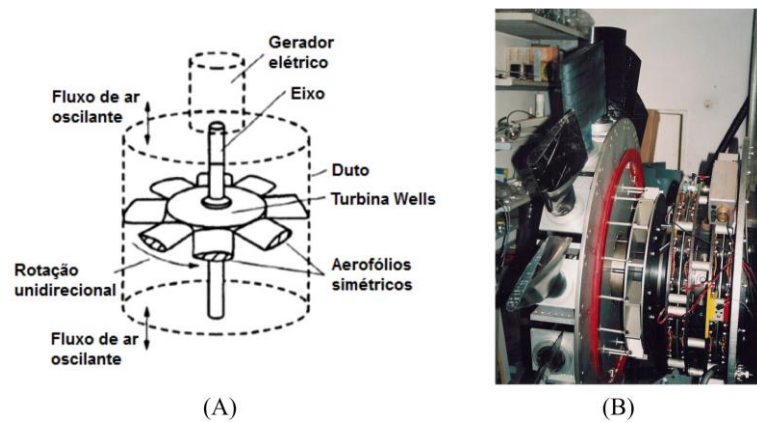


Figura 2.17 – (A) Sistema de funcionamento da Turbina Wells e (B) Turbina Wells da central de Pico [Watterson e Raghunathan, 1996].

## 2.5 Recurso Oceânico Nacional: Energia das Ondas

A extensa costa brasileira e as vastas áreas de mar territorial são condições naturais para o aproveitamento energético dos recursos do mar [Tolmasquim, 2016]. Estimativas da potência de geração de energia elétrica a partir da energia das ondas do mar na costa brasileira estão ao redor de 114 GW. Além disso, é possível converter cerca de 20% desse potencial em energia elétrica, o que significa 13% da capacidade instalada no país [Estefen, 2012].

O regime de ondas no Brasil possui mais de um sistema característico de agitação: a vaga (*Wind sea*) é gerada pelos ventos alísios e frequentes o ano inteiro; a ondulação (*swell*) está associada a passagens de frentes frias, resultantes da migração dos anticiclones extratropicais. As regiões Sul e Sudeste estão sujeitas a ondulações mais energéticas, associadas às frentes frias em algumas épocas do ano, enquanto o litoral nordeste é caracterizado por ondulações menores, porém constantes no ano todo, causada pelos ventos alísios [Tolmasquim, 2016].

Nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul, considerou-se o potencial de ondas mais significativo em relação à região Norte, resultando em 22 GW, 30 GW e 35 GW, respectivamente. A Figura 2.18 apresenta estes dados em cada região do litoral brasileiro, sendo os dados da região norte referente à energia das marés.

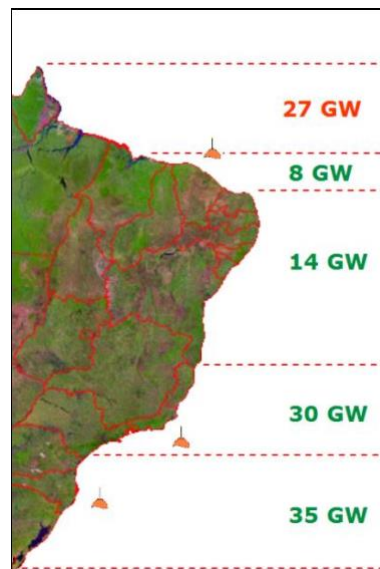


Figura 2.18 – Potencial teórico brasileiro estimado de ondas (verde) e marés (laranja)  
[COPPE/UFRJ; SEAHORSE WAVE ENERGY, 2013].

O Brasil tem um dos dispositivos de ponta na área de conversão de energia das ondas (vide Figura 2.19). Ele foi desenvolvido pelo Instituto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro [COPPE, 2015].



Figura 2.19 – Dispositivo conversor da energia das ondas do mar em energia elétrica [COPPE, 2015].

Em 2012 foi instalada no Porto de Pecém, a 60 quilômetros de Fortaleza, uma usina de ondas que tem uma capacidade de 100 kW. A conversão de energia é feita através dos flutuadores na base de braços mecânicos instalados no quebra-mar. O sistema é composto por dois módulos, cada um deles formado por uma boia com 10 metros de diâmetro e um braço mecânico de 22 metros de comprimento. As ondas fazem com que os braços se movimentem na direção vertical. Esse movimento gera uma força utilizada para impulsionar a água por tubos. Isso cria uma grande pressão na câmara hiperbárica, o que faz movimentar a turbina ligada a um gerador que produz eletricidade, a Figura 2.20 apresenta o esquema de funcionamento da usina [COPPE, 2015].

Além disso, a COPPE está trabalhando no desenvolvimento e construção de um protótipo *offshore* (Figura 2.21 e 2.22), para geração de energia elétrica na cidade do Rio de Janeiro. A usina será instalada a 14 quilômetros da praia de Copacabana, próximo da Ilha Rasa, com capacidade instalada de 100 kW. Ficará a uma profundidade de 20 metros e, em

sua capacidade máxima, a eletricidade gerada pode abastecer o equivalente a 200 casas residenciais [Planeta COPPE, 2015].

A geração de energia se dará a partir da movimentação vertical de um flutuador de 11 metros de altura e 4,5 metros de diâmetro, impulsionado pelas ondas do mar. O flutuador é guiado por uma coluna central, com fundação no leito marinho, e a sua movimentação será transformada em movimento rotativo no gerador, utilizando um sistema mecânico que integra o flutuador e gerador (Figura 2.21 e 2.22) [Planeta COPPE, 2015].

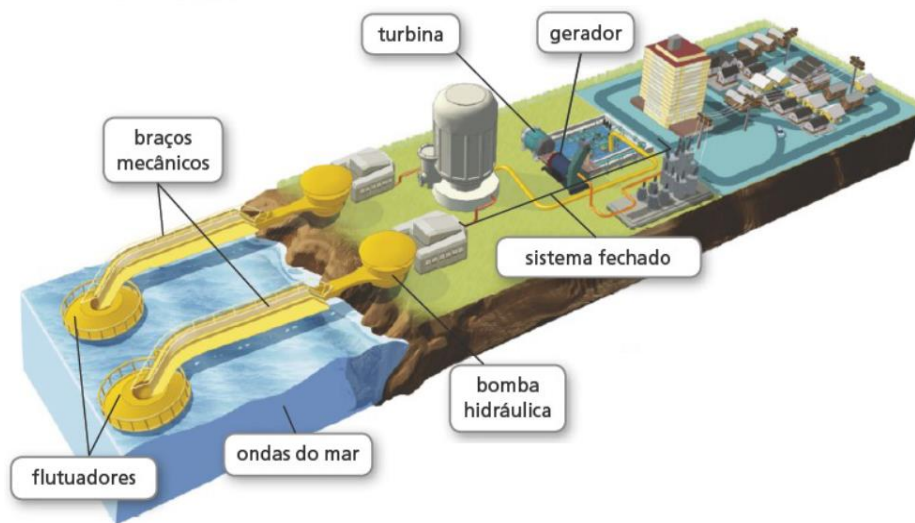


Figura 2.20 – Esquema de funcionamento da Usina de Pecém-CE [Tractebel, 2015].

No sul do Brasil, algumas Universidades e Institutos Federais vêm desenvolvendo pesquisas referentes à otimização geométrica de dispositivos CAO, tais como: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) e Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Paraná (IFPR). Estas pesquisas contribuem para a formação de pesquisadores e para o desenvolvimento de estudos, tanto numéricos quanto experimentais.

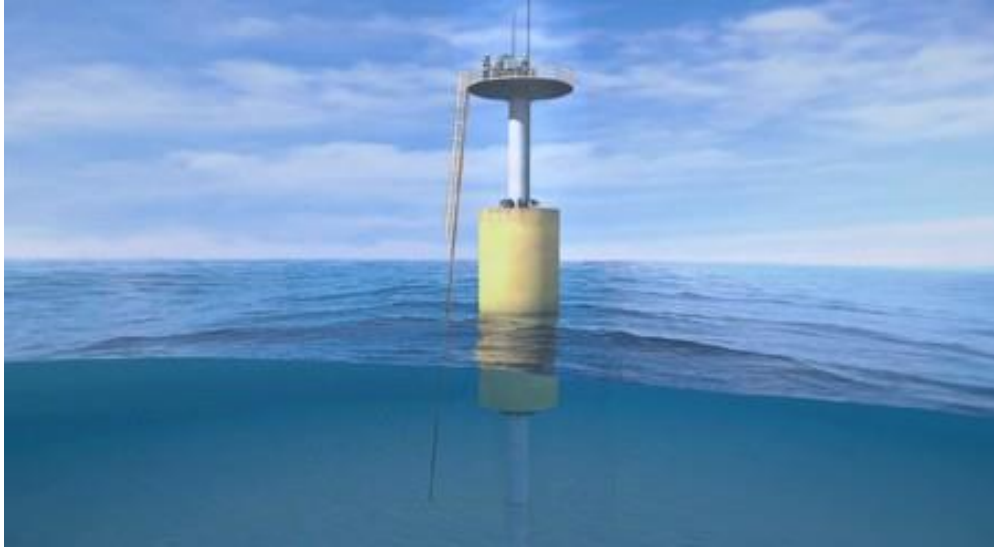


Figura 2.21 – Dispositivo que será instalado no Rio de Janeiro, Brasil [Planeta COPPE, 2015].



Figura 2.22 – Funcionamento do dispositivo [Planeta COPPE, 2015].

### 3 TEORIA DE ONDAS

As ondas de gravidade (ondas do mar) podem ser classificadas por diversos critérios, de acordo com o período ou frequência, com as forças perturbadoras e com as forças restauradoras. O vento transfere energia da atmosfera para o oceano, resultando no movimento irregular da superfície do oceano, que é denominado agitação marítima. Neste processo, a gravidade atua como força restauradora, para recuperar a condição de equilíbrio [Cruz e Sarmiento, 2004].

O interesse pelo estudo da teoria da mecânica das ondas vem de mais de um século. Iniciou-se com a teoria linear de ondas por Airy (1801-1892), continuando depois com as teorias de ordem superior de Stokes (1819-1903) e teoria de ondas longas de Boussinesq (1842-1929) [Ramalhais, 2011].

No entanto, apenas durante a segunda guerra mundial houve a necessidade de estudar mais profundamente os efeitos da interação entre as ondas e estruturas fixas ou flutuantes. A partir daí, assistiu-se a uma crescente aposta na pesquisa do comportamento das ondas (principalmente devido à exploração de petróleo *offshore*) através de estudos analíticos, ensaios em canais, tanques de onda e, também, mais recentemente, recorrendo à modelagem numérica [Ramalhais, 2011].

O mecanismo pelo qual são geradas as ondas de gravidade, pela ação do vento, é explicado pela combinação dos mecanismos de pressão e cisalhamento, tornando a modelagem do problema com boa acurácia. Quando a superfície de um corpo de água é perturbada na direção vertical, a força da gravidade atua para retornar a superfície à sua posição de equilíbrio [Sorensen, 2006].

As ondas de gravidade são influenciadas por diversos fatores que resultam em diferentes formas e tamanhos de ondas, dependendo da magnitude e intensidade de atuação dos mesmos sobre a água [Dean e Dalrymple, 1991]. Dentre estes, enumera-se quatro principais: o movimento de corpos na superfície, a ação dos ventos, abalos sísmicos e as forças gravitacionais exercidas pelo sol e pela lua, cada um ocasionando diferentes movimentações da superfície marítima [McCormick, 1981].

A superposição de diferentes ondas forma as ondas oceânicas, justificando o seu comportamento aleatório e de difícil representação matemática, especialmente devido às não linearidades envolvidas e às características tridimensionais. Porém, grandes ondas em uma série de ondas aleatórias podem ser determinadas na forma de ondas regulares, podendo então



ser descritas através de teorias determinísticas [Chakrabarti, 2005]. A Figura 3.1 ilustra esse fenômeno.

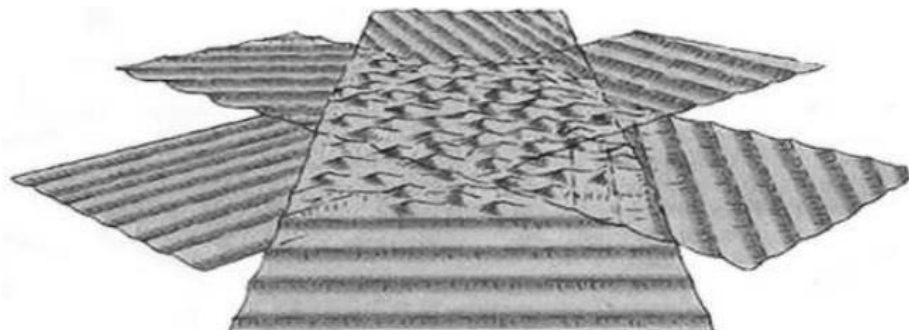


Figura 3.1 – Ilustração da formação de ondas numa certa região como resultado dos processos de interações e superposições [Carneiro, 2007].

Os modelos para descrição do comportamento de ondas podem ser classificados de acordo com teorias de ondas regulares (lineares e não lineares) e um espectro de ondas – composto por diversas ondas regulares sobrepostas. A teoria de ondas de Airy (também chamada de teoria linear ou de pequena amplitude) é a mais simples. Ela permite representar as ondas como oscilações regulares [U.S. Army, 1973] e é válida quando a declividade, a profundidade relativa e a altura de onda relativa são pequenas, ou seja, ondas de pequena amplitude (razão entre altura e comprimento da onda é muito menor que 1) e pequeno comprimento de onda [Carneiro, 2007].

A teoria de Stokes, por sua vez, se aplica às ondas de maior amplitude em águas relativamente profundas. Nesses modelos, as ondas são formadas pela soma de pequenas ondas regulares com altura e períodos diferentes [Gomes, 2014].

Outras teorias não lineares permitem uma melhor representação das ondas em situações não previstas pela teoria linear, especialmente quando há interação da onda com o fundo (águas rasas) e quando as ondas são mais altas [Carneiro, 2007].

Os espectros de ondas apresentam diferentes classificações, como os espectros de Pierson – Moskowitz, JONSWAP, Neumann e Bretchneider. O espectro de Pierson-Moskowitz é válido para um mar totalmente desenvolvido, ou seja, é o estado do mar em que se desenvolveram as ondas máximas correspondentes à força do vento atuante e assume que as ondas estão em equilíbrio com o vento.

O espectro JONSWAP foi proposto por Hesselman et al. (1973) sendo uma extensão do espectro de Pierson-Moskowitz, baseando-se em um extenso programa de medição de ondas conhecido por *Joint North Sea Wave Project* (Ochi, 1998). Foi descoberto que o espectro das ondas nunca está totalmente desenvolvido, pois continua a desenvolver-se através de interações não lineares onda-onda. O espectro representa mares com limitações de pista, sendo dependente da velocidade do vento e do comprimento da pista (Pierson & Moskowitz, 1964).

A partir da teoria linear, as ondas do mar podem ser vistas como um perfil senoidal que se propaga ao longo da superfície do mar. Os principais parâmetros para descrever as ondas são seu período ( $T$ ), que é o tempo necessário para duas cristas sucessivas passarem por um determinado ponto e altura ( $H$ ) (ver Figura 3.2), além da profundidade ( $h$ ) na qual elas se propagam [Dean e Darlymple, 1991].

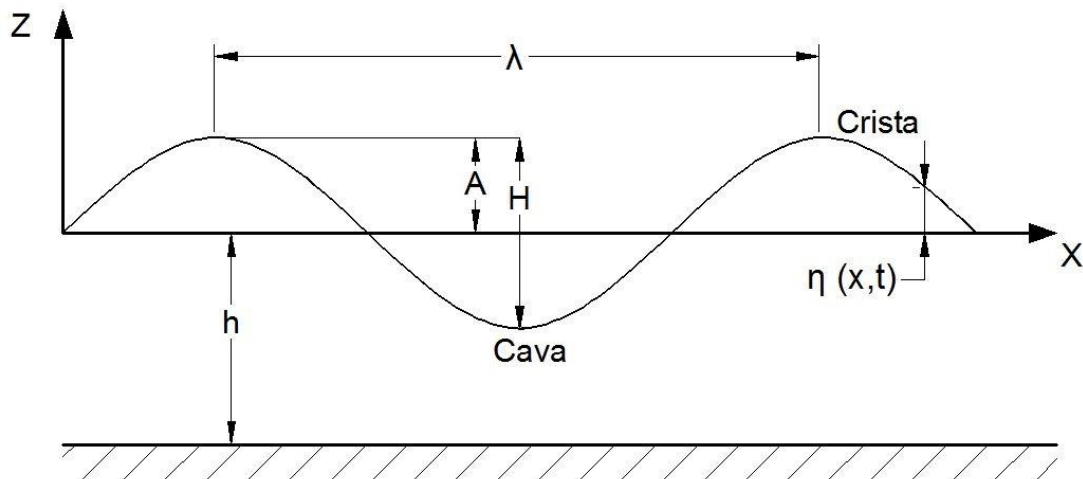


Figura 3.2 – Características da onda [Adaptado de Dean e Darlymple, 1991].

Outros parâmetros podem ser determinados teoricamente a partir dos já citados. O comprimento de onda é a distância entre duas cristas ou cavas sucessivas ( $\lambda$ ) e a altura ( $H$ ) é a distância vertical entre a cava e a crista da onda.

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

O termo  $\tanh(2\pi h/\lambda)$  que aparece na Equação (3.1) representa a relação de dispersão de onda (Dean e Dalrymple, 1991).

A elevação da superfície ( $\eta$ ) é a posição da superfície livre em relação ao seu nível médio e a amplitude da onda ( $A$ ) é a máxima elevação em relação ao nível médio. A velocidade da onda, ou celeridade ( $C$ ), é definida como:

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

A crista é o ponto mais alto atingido pela superfície livre da água (elevação) comparado com o plano do nível médio da água. Já o seu revés, a cava, é o ponto mais baixo atingido pela superfície livre da água comparado com o mesmo plano do nível médio de água.

Algumas dessas características devem ser levadas em conta na determinação da teoria de ondas a ser aplicada, sendo as principais: a altura de onda ( $H$ ), o comprimento de onda ( $\lambda$ ) e a profundidade da água ( $h$ ). Essas características compõem os seguintes fatores adimensionais:

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

A partir da teoria de segunda ordem de Stokes podem ser representadas ondas com cristas mais altas e cavas mais achatadas, como é visto na Figura 3.3. Outro fenômeno que se apresenta é o transporte de massa na direção de propagação da onda, uma vez que a solução não apresenta mais o caminho das partículas como uma órbita fechada [Gomes, 2010].

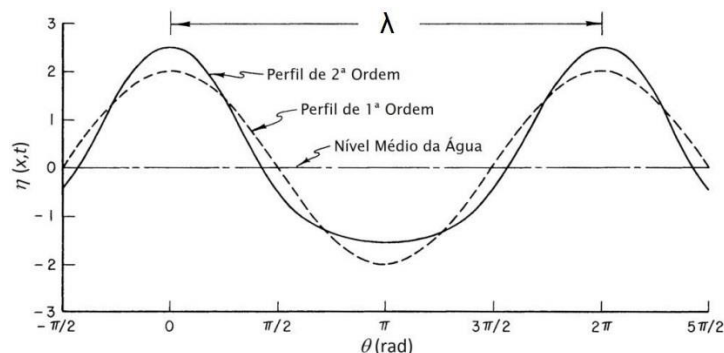


Figura 3.3 – Comparação entre uma onda de primeira e segunda ordem [Seibt, 2014].

A solução de Stokes é formalmente válida para  $kh < 1$  e  $H/\lambda \leq 1$ , sendo  $k = 2\pi/\lambda$  o número de onda [CEM, 2002]. Em termos do número de Ursell o limite de aplicação é  $U_R < 26$  [Dean e Dalrymple, 1991].

Um recurso comumente usado para determinar qual teoria de ondas deve ser usada é apresentado no gráfico da Figura 3.4. Conhecendo-se os parâmetros  $h$ ,  $H$  e  $T$  escolhe-se a teoria que melhor se adapta ao problema através do par ordenado formado.

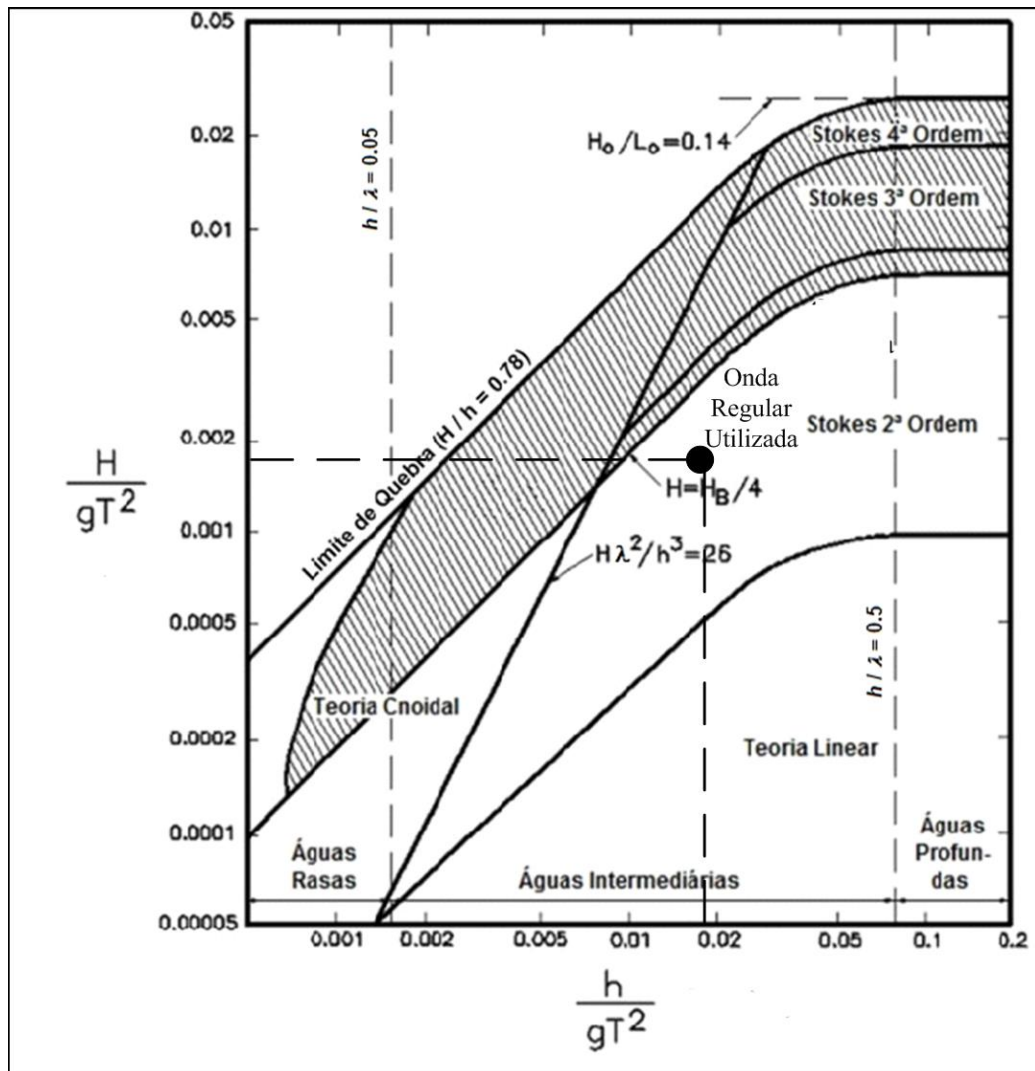


Figura 3.4 – Aplicabilidade das teorias de ondas [Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991].

Destaca-se o fato que a escala do gráfico da Figura 3.4 ser adimensional, mas as definições de profundidade ( $h$ ), altura da onda ( $H$ ), período de onda ( $T$ ) e gravidade ( $g$ ) estarem no sistema métrico inglês. Sendo assim, as características da onda medidas em metros

devem ser convertidas para pés (1,00 m = 3,28 pés). Da mesma forma, o valor da aceleração da gravidade ( $g$ ) deve ser considerado como 32,20 pés/s<sup>2</sup>. Para a onda estudada neste trabalho (Stokes de 2ª Ordem) com período de  $T = 7,5$  s, altura de  $H = 1$  m e profundidade de  $h = 10$  m, tem-se os referidos valores aproximados de  $H/gT^2 = 0.0018$  e  $h/gT^2 = 0.018$ .

### 3.1 Teoria Não Linear de Ondas ou Ondas de 2ª ordem de Stokes

Stokes, 1847, utilizando o método das perturbações para solucionar o problema de contorno da onda, desenvolveu uma teoria para ondas de amplitude finita que ele utilizou até a segunda ordem. Borgman e Chappellear, 1958 estenderam a equação até a terceira ordem e Skjelbreian e Hendrickson, 1961 até a quinta ordem.

A teoria de Stokes se aplica para alturas de ondas maiores em águas relativamente profundas. A partir da teoria de segunda ordem aparecem componentes super harmônicos, isto é, componentes de frequências mais altas em 2, 3,..., n vezes a frequência fundamental, o que acarreta em cristas mais altas e cavas mais achatadas. Outro fenômeno que aparece é o transporte de massa na direção de propagação da onda, uma vez que a solução não apresenta mais o caminho das partículas como uma órbita fechada [Carneiro, 2007].

Basicamente a teoria de Stokes consiste em assumir que as propriedades do movimento da onda, tais como o potencial de velocidade, podem ser representadas por uma série de pequenas perturbações. Portanto, quanto mais alto o número de termos incluídos na série, melhor é a aproximação das propriedades atuais da onda [Stokes, 1847].

Diferente do que ocorre na teoria linear, a trajetória de uma partícula, quando são consideradas teorias não lineares, não descreve uma órbita fechada. Esse comportamento se aproxima, ainda mais, do comportamento de ondas reais com o movimento de correntes marítimas, indicando a transferência de massa ao longo da direção de propagação da onda [Gomes, 2010].

Assim, a expressão do potencial de velocidade obtida a partir da teoria de Stokes de 2ª ordem, é descrita como [McCormick, 1973]:

$$\phi = \frac{H}{2} c \frac{\cosh(kh + kz)}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \left(\frac{H}{2}\right)^2 \frac{3\pi c}{4\lambda} \frac{\cosh(2kh + 2kz)}{\sinh^4(kh)} \sin(2kx - 2\omega t) \quad (3.3)$$

onde  $c$  é celeridade, dada por:

$$c = \frac{g}{k} \tanh(kh)^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

Derivando a Equação (3.3) em relação a  $u$  e  $w$ , é possível encontrar as respectivas componentes para a velocidade de propagação da onda como [Dean e Dalrymple, 1991]:

$$u = \frac{H}{2} gk \frac{\cosh(kh+kz)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left( \frac{H}{2} \right)^2 \omega k \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (3.5)$$

$$w = \frac{H}{2} gk \frac{\sinh(kh+kz)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left( \frac{H}{2} \right)^2 \omega k \frac{\sinh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (3.6)$$

A equação para a superfície livre é descrita como:

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos(2kx - 2\omega t) \quad (3.7)$$

onde  $z$  é a variação da posição da superfície livre da água até o fundo do mar. A teoria de segunda ordem de Stokes apresenta, razoavelmente, bons resultados, quando a relação profundidade comprimento de onda é maior que 1/10, o qual na prática abrange a maioria das aplicações de engenharia [Gomes, 2010]. No presente trabalho, é adotada uma onda que se enquadra na teoria de Stokes de 2ª ordem.

## 4 DESIGN CONSTRUTAL E APLICAÇÕES A DISPOSITIVOS CAO

Enunciada em 1996 [Bejan, 1996], a lei Construtal foi usada em seus primeiros anos como uma ferramenta e projeto para aumentar o desempenho de sistemas de engenharia ou para descrever fenômenos naturais [Lorente, 2019]. A lei Construtal diz respeito às mudanças sofridas por qualquer sistema onde existe escoamento (movimento, vida) no tempo, desde que lhe seja dada liberdade suficiente [Lorente, 2019].

O significado e a extensão da lei Construtal tornam-se não apenas mais amplos, mas também muito mais poderosos e, portanto, a mesma se disseminou em outras áreas do conhecimento além da engenharia, como: matemática, física, biologia, ciências sociais, economia e arquitetura [Lorente, 2019].

O design das estruturas naturais é um fenômeno físico que ocorre em sistemas de grande e pequeno porte como os flocos de neve, os raios, rios, tecidos vivos vasculares, o tráfego das cidades e a difusão de novas ideias sobre o mundo. A Teoria Construtal se baseia na lei Construtal “*Para um sistema finito onde há escoamento persistir no tempo (sobreviver) sua configuração deve mudar no tempo livremente de tal forma que forneça acesso fácil às suas correntes*”, isto é, o seu *Design* deve se modificar livremente conforme o tempo passa, para que o escoamento não cesse (morra) [Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012; Bejan e Lorente, 2013].

A Teoria Construtal permite entender o *design* dos escoamentos que ocorrem na natureza, como resultado da evolução no tempo visando o acesso mais fácil, rápido e com o menor consumo de energia. Para que haja esta evolução, é preciso que o sistema possua liberdade para evoluir e consiga superar as imperfeições (resistências, irreversibilidades) impostas pelo sistema.

A lei Construtal propõe uma forma de explicar como o *design* na natureza ocorre: “*Tudo o que escoar, evolui ao longo do tempo: a geração de design e evolução (mudança no design) são fenômenos universais*”. Isto é, a evolução dos sistemas que escoam não tem uma intenção definida, uma vez que cada sistema é único. Em vez disso, eles evoluem porque estão dirigidos pela Lei Construtal. Isto acontece da mesma forma que na lei da gravidade, onde as coisas devem se deslocar em direção ao centro do planeta com a mesma aceleração [Bejan, 2012].

A Teoria Construtal, abrange uma gama de processos físicos como pode ser visto, por exemplo, em Bejan e Zane, 2012. Através da Lei Construtal é possível determinar o formato de sistemas encontrados na natureza e no campo da engenharia. A melhor forma de conectar um ponto a uma área e vice versa é através do formato de árvore (*tree-shape*). Por isto esta configuração geométrica é encontrada em trabalhos de otimização térmica e geométrica de processadores de computador [Bejan e Lorente, 2008].

Mudanças no *design* dos leitos de rios, de forma a movimentar a água mais facilmente, bifurcação de veias no corpo dos animais, a fim de facilitar o escoamento sanguíneo nos tecidos, nos pulmões, entre tantos outros, são exemplos de configurações podem ser obtidas através da lei Construtal. Somente a evolução do corpo humano já nos exhibe um quadro gigantesco de exemplos que poderíamos observar. Entretanto, há muitas aplicações da lei Construtal em áreas de engenharia ou mesmo organização social.

A lei Construtal do design e evolução entende evolução como um processo dinâmico que ocorre devido à mudança do design. A Figura 4.1 apresenta esquematicamente como se faz a utilização do método Design Construtal, em associação com algum método de otimização, sendo o objetivo da lei Construtal explicar como o design nos sistemas térmicos de fluxo/escoamento se configuram e a associação que é realizada com algum método de otimização busca atender um anseio que se tem em engenharia, de maximizar a performance e racionalizar os recursos disponíveis.

O Design Construtal de ser aplicado em projetos de engenharia não é um método para aplicação exclusiva na mesma, mas um método de aplicação da Lei Construtal. A utilização do Design Construtal permite a obtenção de melhores geometrias, reduzindo a resistência global de suas correntes internas. Através da utilização de diferentes indicadores de performance, é possível analisar, também, uma determinada configuração que melhore o desempenho de sistemas com mais do que um indicador de desempenho [Bejan e Lorente, 2008].



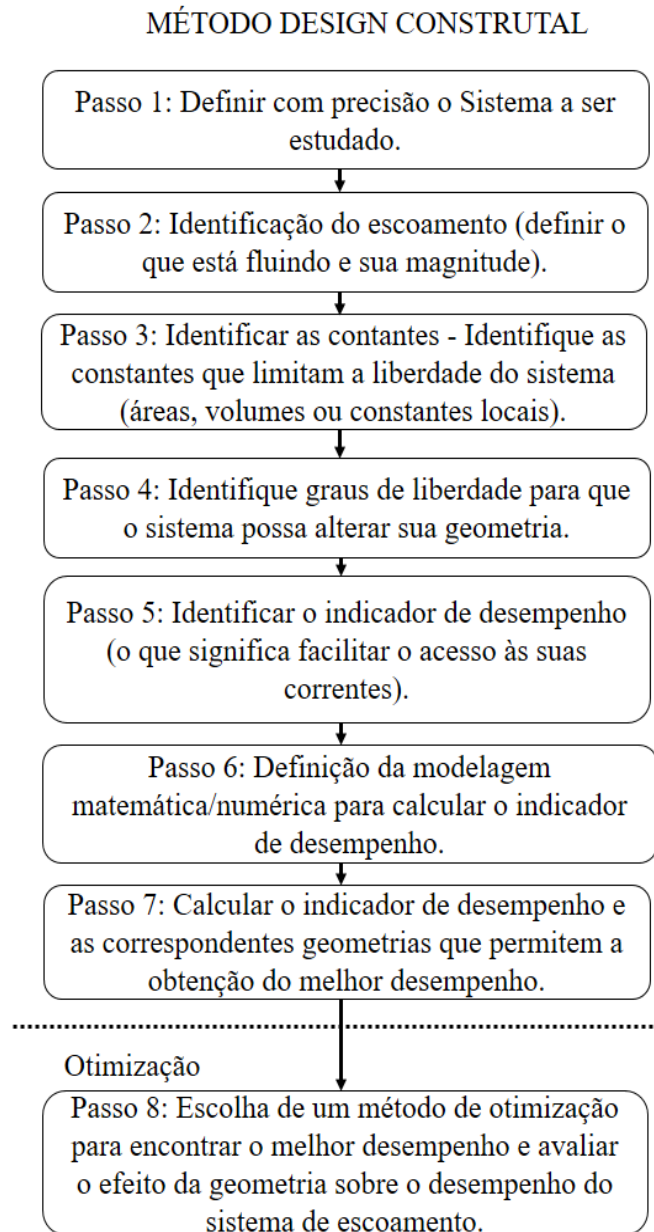


Figura 4.1 – Fluxograma da aplicação do método Design Construtal.

## 4.1 Formulação Geométrica com Design Construtal

A formulação geométrica de sistemas conversores de energia das ondas do mar por meio da utilização do método de Design Constructal está presente na formulação das etapas de implementação do método. O objetivo é verificar a influência da variação da geometria no indicador de desempenho.

O trabalho passa por sete diferentes variações geométricas, com o estudo do incremento de câmaras hidropneumáticas acopladas em um único dispositivo e a variação da altura e espessura da parede que divide o caso com duas câmaras acopladas. Em função da similaridade das geometrias é apresentada uma generalização da obtenção das mesmas, pois o processo de formulação segue igual para todos os casos estudados.

O método Design Construtal relaciona graus de liberdade (parâmetros geométricos que variam durante o processo de execução do método), restrições (parâmetros que são mantidos constantes durante a análise dos casos) e indicadores de desempenho ou performance (que devem ser aprimorados, visando atingir um desempenho superior).

As restrições do problema são o volume das câmaras hidropneumáticas ( $V_{En}$ ) e os volumes totais ( $V_{Tn}$ ) onde  $n$  varia de um a cinco, representando o número de câmaras acopladas e a variável  $j$  que aparece nas formulações varia de sete a onze, representando a variação geométrica referente ao duto da turbina.

$$V_{E_n} = (H_n)(L_n)(W) \quad (4.1)$$

$$V_{T_n} = V_{E_n} + (H_j)(l_n)(W) \quad (4.2)$$

A dimensão  $W$ , presente nas equações acima, é mantida constante e igual a 1 m, pois o problema é considerado bidimensional. No estudo realizado, considera-se um clima de ondas na escala real com período de 7,5 s e comprimento de onda de 65,4 m, valores estes definidos em função do espectro de pico.

Os graus de liberdade analisados no trabalho são as relações entre altura e largura das câmaras hidropneumáticas ( $H_1/L_1$ ,  $H_2/L_2$ ,  $H_3/L_3$ ,  $H_4/L_4$  e  $H_5/L_5$ ), profundidade de submersão, o qual representa quanto o dispositivo se encontra em relação ao fundo ( $H_{depth}$ ). Usando como referência o clima de ondas, define-se os primeiros casos analisados em todas as simulações,  $L_1 = \lambda$  e  $H_1 = H$ .

Para determinar os volumes totais, é definido que  $V_{En}$  representa 70% do  $V_{Tn}$ . Ou seja,  $V_{Tn} = 93,4 \text{ m}^3$  como indicado no trabalho de Gomes, 2014. Através das equações anteriores é possível obter as formulações que determinam as larguras ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$ ,  $L_5$ ,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ ,  $l_4$  e  $l_5$ ) e as alturas ( $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ ,  $H_4$ ,  $H_5$ ,  $H_6$ ) do problema estudado. A formulação das mesmas será apresentada somente para o primeiro dispositivo, pois é análoga para os demais, somente

trocando o sub-índice. A Figura 4.2 apresenta uma árvore com o fluxo de simulações realizadas.

$$L_n = \left[ \frac{V_{E_n}}{\left( \frac{H_n}{L_n} \right) W} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

$$H_n = L_n \left( \frac{H_n}{L_n} \right) \quad (4.4)$$

$$l_n = \left[ \frac{V_{T_n} - V_{E_n}}{\left( \frac{H_j}{l_n} \right) L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

$$H_j = l_n \left( \frac{H_j}{l_n} \right) \quad (4.6)$$

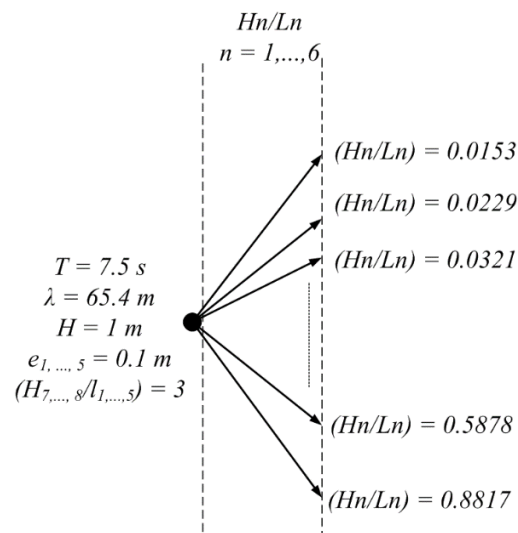


Figura 4.2 – Árvore de simulações realizadas.

## 5 MODELO COMPUTACIONAL

Os estudos de engenharia têm tornado-se cada vez mais complexos e detalhistas. Problemas que antes não demandavam tantos recursos, hoje são desenvolvidos e resolvidos de forma computacional. Os problemas de engenharia podem ser resolvidos por meio de um, ou uma combinação, de três métodos: experimental, analítico e/ou numérico.

A escolha de um, ou mais, destes métodos se dá mediante a complexidade do problema em estudo. Assim, os métodos podem apresentar vantagens ou desvantagens sobre os demais, dependendo das informações que se têm em questão [Martins, 2016].

O uso de métodos numéricos para a solução de problemas complexos da engenharia e da física é hoje uma realidade, devido ao desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento. Em função dessa disponibilidade computacional, o desenvolvimento de algoritmos para a solução dos mais diversos problemas tem recebido maior atenção dos analistas numéricos e engenheiros, fazendo aumentar o número de pesquisadores e usuários da simulação numérica [Maliska, 2004].

Além disso, a versatilidade e generalidade dos métodos numéricos para simulações de problemas de engenharia e a relativa simplicidade de aplicação dessas técnicas são outros fatores motivadores para o uso da metodologia numérica ou computacional [Maliska, 2004].

A metodologia de pesquisa utilizada no presente trabalho foi baseada na Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD – *Computacional Fluid Dynamics*), uma ferramenta que permite a análise e solução de problemas físicos de grande complexidade matemática, voltados a aplicações em engenharia [Maliska, 2004].

A Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) é a análise dos sistemas que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor e reações químicas, por meio de simulações computacionais. Uma investigação através de CFD tem como vantagens: a redução substancial de tempo e o custo de novos *designs*, a habilidade para estudar sistemas onde é difícil ou impossível fazer experimentos, a capacidade de estudar sistemas com condições perigosas e, além disso, não tem limite no nível de detalhamento dos resultados [Versteeg e Malasekera, 2007].

A metodologia por CFD aproxima as equações de conservação de massa e da quantidade de movimento da forma diferencial através de um sistema de equações algébricas, que pode ser solucionado computacionalmente. As aproximações são aplicadas a pequenos domínios no espaço e/ou no tempo e, então, a solução numérica gera resultados em localizações discretas no espaço e no tempo [Ferziger e Peric, 1997]. De uma maneira geral, os pacotes comerciais de CFD apresentam sofisticadas interfaces aos usuários, facilitando a definição do problema e a análise dos resultados [Gomes, 2014]. Para tanto, foi empregado no presente trabalho o *software* FLUENT que constitui um pacote comercial para CFD da empresa ANSYS®.

O FLUENT é um programa baseado no Método dos Volumes Finito, para a modelagem de escoamento de fluidos e de transferência de calor em geometrias complexas. Uma análise por CFD consiste de três etapas: o pré-processamento, o processamento e o pós-processamento [Versteeg e Malalasekera, 2007].

No pré-processamento, define-se o domínio computacional, a geração da malha, o número de elementos (ou células), a seleção dos fenômenos físicos ou químicos que precisam ser modelados, a definição das propriedades dos fluidos e a especificação das condições de contorno [Versteeg e Malalasekera, 2007].

No processamento, são resolvidas as equações que compõe o modelo do problema. Existem três métodos tradicionais para a solução numérica de equações diferenciais: o Método de Elementos Finitos (MEF), o Método das Diferenças Finitas (MDF) e o Método de Volumes Finitos (MVF). Os três métodos seguem os seguintes passos, respectivamente: aproximação das variáveis de fluxo desconhecidas através de funções simples, discretização das equações presentes no problema e solução das equações algébricas. A diferença entre eles está relacionada com a maneira como as variáveis do escoamento são aproximadas e com o processo de discretização empregado em cada método [Maliska, 2004; Versteeg e Malalasekera, 1999].

No pós-processamento ocorre à interpretação dos resultados, elaboração de gráficos, vídeos, tabelas e etc.

A modelagem computacional, realizada no presente trabalho foi desenvolvida empregando o Método dos Volumes Finitos. Para cada variação geométrica avaliada foi desenvolvida uma malha e a solução numérica. O processamento dos resultados, para determinar a potência hidropneumática disponível, a vazão mássica e a pressão, e o pós-

processamento foram realizados através de tabelas do *software* Excel. O tempo de processamento de cada simulação é de aproximadamente 22 horas, num computador com processador Intel Xeon X5450 com 16Gb de RAM, utilizando processamento em paralelo com 4 núcleos cada simulação.

## 5.1 Método dos Volumes Finitos

Em determinados problemas, não há a possibilidade de obtenção de uma solução analítica, então, por essa razão, se aplica uma aproximação numérica da equação diferencial, através de uma solução para um número mínimo discreto de pontos, com um possível erro, assumindo que quanto maior for à quantidade de pontos, mais próximo da solução exata será a solução numérica [Maliska, 2004].

Assim, a tarefa do método numérico é transformar uma equação diferencial, definida num domínio, em um sistema de equações algébricas. Para isso as derivadas da função existentes na equação diferencial devem ser substituídas pelos valores discretos da função. Transformar as derivadas em termos que contêm a função significa integrar a equação diferencial, e as diversas maneiras de fazê-lo são o que caracteriza o tipo de método numérico [Maliska, 2004].

A Figura 5.1 ilustra o processo de discretização empregado pelo método numérico, o qual transforma uma equação, definida no domínio  $D$ , em um sistema de equações algébricas.

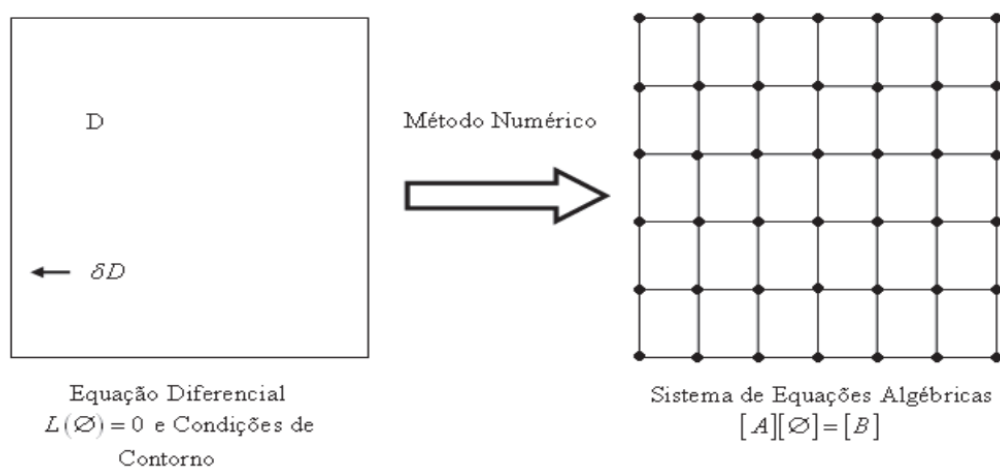


Figura 5.1 – Função do Método Numérico [Maliska, 2004].

O *software* escolhido para desenvolver esta pesquisa foi o *Ansys Fluent*, o qual é baseado no método numérico dos Volumes Finitos (MVF). O método foi originalmente desenvolvido como uma formulação especial de Diferenças Finitas. A preferência por este método é em função da robustez, devido às características conservativas do MVF. Em escoamentos de fluidos, é muito importante satisfazer aos princípios de conservação em nível discreto, pois se o que se busca com um método numérico é a solução da equação diferencial, a qual é a representação da conservação da propriedade em nível de ponto [Maliska, 2004].

O Método dos Volumes Finitos (MVF) é uma forma de se obter uma versão discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP). Diferentemente de outros métodos, entretanto, ele fundamenta-se em uma abordagem física do problema representado pela EDP. O seu desenvolvimento está intrinsecamente ligado ao conceito de fluxo entre regiões, ou volumes adjacentes, onde o fluxo de uma determinada grandeza, como massa ou energia, é a quantidade dessa grandeza que atravessa a área de uma fronteira. A quantidade líquida desta grandeza, que atravessa um volume de controle, por unidade de tempo, é calculada pela integração, sobre essa fronteira, da diferença entre os fluxos que entram e os que saem deste volume, o que é conseguido de forma mais geral pela integração das EDP's [Bortoli, 2000; Fortuna, 2000].

Quando os esquemas numéricos empregam a forma conservativa, é assegurada também a conservação global da propriedade do fluido para todo o domínio computacional. Um sistema na forma conservativa ou divergente é aquele em que na equação diferencial os fluxos estão dentro do sinal da derivada e, na primeira integração, aparecem os fluxos nas fronteiras do volume elementar, equivalente, dessa forma, ao balanço.

Existem duas maneiras de encontrar as equações aproximadas de um problema através do MVF. A primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, e a segunda, é a de integrar sobre o volume elementar, no espaço e no tempo, as equações na forma conservativa [Maliska, 2004].

Os processos são equivalentes, pois basta lembrar que, para deduzir as equações diferenciais que representam os fenômenos físicos é necessário primeiro realizar um balanço em um volume finito, fazendo-se, em seguida, o processo de limites para obter a equação diferencial. A dedução do Método dos Volumes Finitos pode ser encontrada em diferentes bibliografias de mecânica de fluidos computacional como Maliska, 2004, Patankar, 1980 e Fox, 2004.

A principal vantagem do Método dos Volumes Finitos é que a discretização espacial é feita diretamente no espaço físico. Assim, não há problemas com transformação de sistemas de coordenadas, como ocorre na discretização do Método das Diferenças Finitas (MDF).

Comparado com o MDF, outra vantagem do MVF é a sua grande flexibilidade – pode ser facilmente implementado em malhas estruturadas ou não estruturadas (explicado na seção 5.5). Isso torna o método de volumes finitos particularmente adequado para o tratamento dos fluxos em geometrias complexas e por garantir a conservação local da propriedade do fluido para cada célula do volume de controle. É interessante notar que, sob certas condições, o MVF pode ser equivalente ao MDF, ou até mesmo ao Método dos Elementos Finitos (MEF) de baixa ordem, devido às suas propriedades [Blazek, 2001].

## 5.2 Método *Volume of Fluid* (VOF)

A metodologia VOF, utilizada no presente trabalho, consiste em reproduzir a interação entre os fluidos envolvidos na simulação numérica do dispositivo do tipo CAO, que são o ar e a água neste caso. A mesma é considerada mais realística se comparada com outras metodologias como a metodologia ar, pois se mostra capaz de representar além da interação entre o ar e a água, a interação destes fluidos com a estrutura do conversor.

Através da formulação do método VOF, todas as fases são definidas e o volume ocupado por uma fase não pode ser ocupado por outra fase. Assim, para representar as fases contidas em cada volume de controle é necessário o conceito de fração volumétrica ( $\alpha$ ). Define-se a fração volumétrica como sendo uma variável contínua no espaço e no tempo, que representa a presença de um fluido no interior do volume de controle [Gomes, 2014].

Em cada volume de controle, a soma da fração volumétrica de todas as fases é unitária, de forma que se têm três possíveis situações. As células ou volumes de controle, com valores de  $\alpha_{\text{água}}$  entre 0 e 1, contém a interface entre água e ar (neste caso  $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$ ). As que possuem  $\alpha_{\text{água}} = 0$  estão sem água e completas de ar ( $\alpha_{\text{ar}} = 1$ ) e, por sua vez, as que apresentam  $\alpha_{\text{ar}} = 0$  estão cheias de água ( $\alpha_{\text{água}} = 1$ ).

As restrições associadas ao modelo VOF são:

- Usar com o modelo *pressure-based* (vide seção 5.6)
- Todos os volumes de controle (ou células) estão cheios de uma fase ou uma mistura das duas fases.



Além disso, quando o método VOF é empregado, apenas um único conjunto de equações, formado pelas equações de quantidade de movimento e de continuidade, é aplicado a todos os fluidos componentes do escoamento. Então, a fração de volume de cada fluido em cada célula (volume de controle) é considerada em todo o domínio computacional através da equação de transporte para a fração volumétrica. Assim, o modelo é composto pela equação de continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (5.1)$$

a equação da fração volumétrica:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha) + \nabla \cdot (\alpha \vec{v}) = 0 \quad (5.2)$$

Uma única equação da quantidade de movimento é resolvida ao longo do domínio e o campo de velocidades é compartilhado entre as fases. As equações de quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (5.3)$$

onde:  $\rho$  é a massa específica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ ),  $t$  é o tempo (s),  $\vec{v}$  é o vetor velocidade do escoamento (m/s),  $p$  é a pressão estática (Pa),  $\mu$  é a viscosidade ( $\text{kg/m.s}$ ),  $\left(\vec{\tau}\right)$  é o tensor das tensões e  $\vec{g}$  a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ).

O método VOF não calcula explicitamente a posição da superfície livre entre os fluidos. Esta é determinada pela discretização da fração volumétrica na região de interface entre os dois fluidos onde há valores  $\alpha$  entre 0 e 1 (Figura 5.2).

As propriedades físicas na zona de transição entre os dois fluidos são calculadas como médias ponderadas com base na fração volumétrica. Dessa forma, a massa específica e a viscosidade dinâmica, são escritas como (Srinivasan et al., 2011):

$$\rho = \alpha_{\text{água}}\rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}}\rho_{\text{ar}} \quad (5.4)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}}\mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}}\mu_{\text{ar}} \quad (5.5)$$

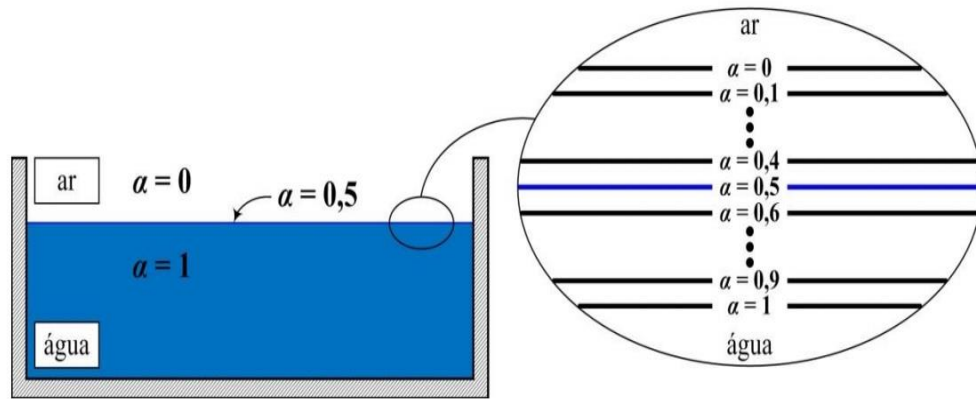


Figura 5.2 – Exemplo de identificação da superfície livre a partir da variação da fração de volume [Adaptado de De Brito, 2010].

A equação da fração volumétrica pode ser discretizada no tempo de forma explícita ou implícita. No método implícito de discretização utilizam-se esquemas de interpolação de diferenças finitas para obterem-se os fluxos em todos os volumes, incluindo os próximos a interface [Fluent, 2016].

Na abordagem explícita utilizam-se esquemas de interpolação de diferenças finitas aplicados aos valores da fração de volume que foram computados no passo de tempo anterior. Esta formulação não exige uma solução iterativa da equação de transporte durante cada etapa do tempo, como é necessário para o esquema implícito.

Quando este esquema é utilizado para a discretização do tempo, os fluxos da fase podem ser interpolados usando reconstrução da interface (como *Geo reconstruct* ou *Dono Aceptor*). Na abordagem de reconstrução geométrica, que é empregada neste trabalho, os esquemas de interpolação padrão do FLUENT são usados para obter o fluxo nas faces sempre que um volume está completamente preenchido com uma fase ou outra. Quando o volume está perto da interface entre as duas fases, o esquema de reconstrução geométrica é utilizado. O esquema de reconstrução geométrica representa a interface entre os fluidos utilizando a aproximação *piecewise-linear*.

No FLUENT, este esquema é o que apresenta a melhor precisão e é aplicável para malhas em geral, incluindo aquelas não estruturadas. Assume-se que a interface entre dois fluidos tem uma inclinação linear de cada volume e usa-se esta forma para o cálculo da advecção do fluido através das faces do volume.

Os esquemas de discretização disponíveis para VOF com formulação explícita são *upwind* de primeira ordem e segunda ordem. A formulação dos volumes de controle requer que o fluxo da convecção e da difusão nas faces do volume de controle sejam computados e balanceados com as condições do termo fonte dentro do próprio volume de controle.

### 5.3 Domínio Computacional

Uma das formas de representar o princípio de funcionamento dos dispositivos do tipo CAO é através da modelagem computacional dos mesmos. Os seis diferentes casos estudados neste trabalho são reproduzidos numericamente.

Na modelagem computacional de um tanque de ondas com um dispositivo CAO acoplado, alguns aspectos, como comprimento da onda e a altura da onda a ser gerada, devem ser levados em conta, pois de acordo com as dimensões dessas características definem-se as dimensões do tanque de ondas.

A Figura 5.3 apresenta, esquematicamente, um tanque de ondas com o dispositivo CAO acoplado bem como algumas características mais detalhadas e condições de contorno. Esta representação utiliza o caso com cinco câmaras acopladas por apresentar toda a caracterização numérica do problema geral.

O esquema do domínio computacional bidimensional apresentado, na figura já citada, é composto pelo dispositivo CAO inserido em um tanque de ondas. As dimensões do dispositivo são as alturas das câmaras acopladas ( $H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$ ), profundidade de submersão do dispositivo ( $H_{depth}$ ), as alturas dos dutos das turbinas ( $H_7, H_8, H_9, H_{10}, H_{11}$ ), comprimento dos dutos das turbinas ( $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$ ), comprimento das câmaras ( $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$ ) e espessura das colunas que compõem os dispositivos ( $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6$ ).

Para representar o problema numa escala adequada no domínio computacional é necessário o conhecimento de algumas características do clima de ondas, como: período ( $T$ ) e altura ( $H$ ) para a onda gerada, com uma profundidade ou nível de água ( $h$ ); assim, o comprimento ( $L_T$ ) e a altura ( $H_T$ ) do tanque de ondas podem ser definidas utilizando estes

parâmetros citados [Gomes et al., 2012b]. Não existe uma regra geral que estabeleça as dimensões do tanque de ondas, porém algumas questões devem ser consideradas.

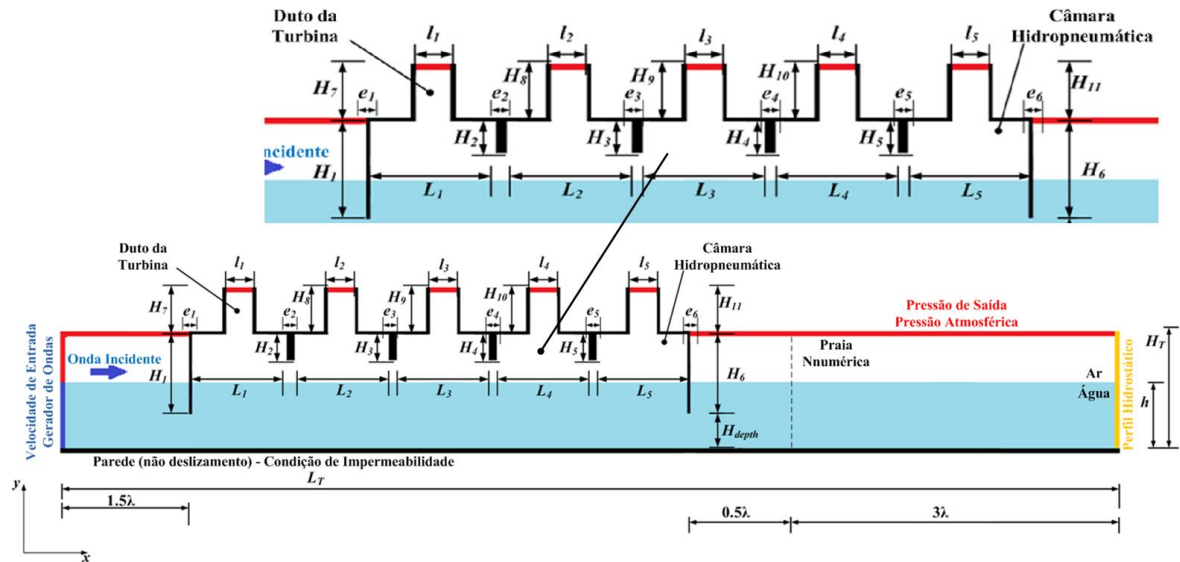


Figura 5.3 – Domínio computacional e condições de contorno.

A profundidade de propagação da onda é a mesma do tanque, representada por  $h$ . Para o comprimento do tanque é preciso considerar o comprimento da onda ( $\lambda$ ). É recomendável que o comprimento do tanque seja, aproximadamente, cinco vezes maior que o comprimento da onda [Gomes, 2014]. Assim, garante-se a simulação numérica da onda sem efeitos de reflexão por um tempo razoável de propagação.

Com relação à altura do tanque, é preciso considerar a profundidade mais a altura da onda. Assim, é possível definir que a altura mínima do tanque seja dada pela profundidade mais três vezes a altura da onda, como descrito em Gomes, 2014. A onda considerada neste trabalho segue uma escala real. As características da onda, tais como, a altura e o período, foram definidos levando-se em conta as características das ondas do litoral sul brasileiro.

As dimensões do tanque e as características da onda são apresentadas na Tabela 5.1 que se segue. Os valores definidos para o clima de ondas leva em consideração a onda presente no Sul do Brasil, mais especificamente na cidade de Rio Grande com base nos estudos apresentados por Letzow, 2020.

Tabela 5.1 - Dimensões do problema e clima de ondas.

Dimensões	Valores
Período da onda ( $T$ )	7,5 s
Comprimento da onda ( $\lambda$ )	65,4 m
Altura da onda ( $H$ )	1 m
Profundidade ( $h$ )	10 m
Comprimento do tanque ( $C_T$ )	327 m
Altura do tanque ( $H_T$ )	14 m

#### 5.4 Condições de Contorno

No problema em consideração, a onda incidente no dispositivo conversor é gerada no lado esquerdo do tanque de ondas, como pode ser visto na Fig. 5.3 (destacado em azul). Para a onda regular utilizada, utilizou-se a metodologia de geração de ondas disponível no *software* FLUENT®, em que se define a teoria de ondas a ser utilizada (neste caso Stokes de 2ª ordem), altura da onda e comprimento de onda, através do submodelo da metodologia multifásica VOF chamado *open channel wave BC*, aplicando uma velocidade prescrita [Fluent, 2016].

A velocidade varia em função do espaço e do tempo com base na Teoria de Stokes de 2ª ordem. A onda utilizada é classificada como de alta ordem. Entretanto, a influência dos termos de alta ordem é negligenciada, sem perda significativa [McCormick, 1976; Dean & Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005].

É importante ressaltar que, de acordo com a classificação proposta por Chakrabarti (2005), se a onda em consideração for linear serão utilizadas as Equações (3.19) e (3.20). Por outro lado, se a onda for considerada de segunda ordem, o que é o caso do trabalho em questão, serão utilizadas as Equações (3.23) e (3.24) para reprodução do perfil de velocidades.

Com relação às outras condições de contorno, na parte superior da superfície lateral esquerda, assim como na superfície superior do tanque e nas saídas dos dutos das turbinas dos dispositivos, é aplicada uma condição de pressão atmosférica (pressão de saída – vermelho). Na parte inferior direita do tanque é aplicada a condição de não deslizamento e impermeabilidade (parede – preto). A superfície direita apresenta uma condição de perfil hidrostático (amarelo).

A condição inicial imposta considera o fluido em repouso numa profundidade  $h = 10$  m. Para isso, a metodologia *flat*, presente no *software* ANSYS, é utilizada para inicializar o domínio computacional através da Equação (3.25) com tempo  $t = 0$  s.

Para auxiliar na redução da reflexão da onda, foi inserida uma região de praia numérica. Esta metodologia baseia-se na adição de um termo sumidouro ( $S$ ) na equação da conservação da quantidade do movimento para realizar o amortecimento das ondas incidentes. A formulação matemática é apresentada na Equação (5.6) [Zwart et al., 2007; Park et al., 1999],

$$S = - \left[ C_1 \rho V + \frac{1}{2} C_2 \rho |V|V \right] \left[ \left( 1 - \frac{z - z_{fs}}{z_b - z_{fs}} \right) \left( \frac{x - x_s}{x_e - x_s} \right)^2 \right] \quad (5.6)$$

em que  $C_1$  e  $C_2$  são os coeficientes de amortecimento linear e quadrático, respectivamente. O termo  $\rho$  é a massa específica,  $V$  é a velocidade,  $z$  é a posição vertical,  $z_{fs}$  e  $z_b$  são as posições verticais da superfície livre e do fundo,  $x$  é a posição horizontal,  $x_s$  e  $x_e$  são as posições horizontais do início e do fim da praia numérica. Lisboa et al., (2016), recomendam assumir os valores  $C_1 = 20$  e  $C_2 = 0$ .

## 5.5 Malha Computacional

Uma malha gerada de forma correta, respeitando-se as concentrações de volumes no local requerido pelo problema físico, evitando-se elementos distorcidos e com variação suave de espaçamento entre os elementos, não é uma tarefa fácil de realizar. É necessário, portanto, conhecer os métodos de geração de malhas para escolher o que mais se adéqua ao problema estudado [Maliska, 2004].

A qualidade das soluções em CFD é governada pelo número de elementos (volumes) da malha. O tempo de simulação e o esforço computacional também são dependentes do refinamento da malha, visto que uma malha de boa qualidade pode tornar os códigos de CFD mais robustos, independentemente do *solver* utilizado [Santos, 2008].

Existem algumas classificações para o tipo de malha utilizada em trabalhos de CFD. As malhas, basicamente, são definidas como estruturadas e não estruturadas.

O método de malhas estruturadas utiliza um padrão regular e repetido. Este tipo de malha utiliza elementos quadriláteros ou triangulares em 2D e elementos tetraédricos ou

hexaédricos em 3D. A utilização da malha estruturada possibilita um bom controle na sua construção, bem como um maior nível de precisão dos esquemas numéricos [De Brito, 2010].

A principal vantagem sobre outros tipos de malhas é que a malha estruturada permite a condensação ou a dispersão de pontos nas regiões com gradientes diferenciados do fluxo da grandeza a estudar. Malhas estruturadas possuem um número constante de volumes vizinhos, o que, após a discretização das equações, dá origem a um sistema de equações algébricas que, por sua vez, possui uma matriz de coeficientes diagonal [Maliska, 2004].

O método de malhas não estruturadas utiliza um conjunto arbitrário de elementos para preencher o domínio computacional e o arranjo dos elementos não apresenta um padrão fixo. Este tipo de malha utiliza triângulos e quadriláteros em 2D, e tetraedros, hexaedros e prismas em 3D. O uso da malha não estruturada permite gerar mais facilmente malhas em torno de geometrias complexas [De Brito, 2010].

Em discretizações usando malhas não estruturadas, podem-se ter diferentes números de vizinhos para cada volume, originando matrizes com banda diagonal variável, o que exige métodos mais elaborados para a solução de sistemas lineares [Maliska, 2004].

A vantagem de métodos de malha não estruturada é que eles se moldam facilmente a geometrias complexas, por apresentarem número ímpar de pontos de amarração, habilitando a solução destes problemas em um período relativamente curto de tempo [Santos, 2008].

A principal desvantagem de malhas não estruturadas é a falta de controle do usuário sobre a disposição da malha, que se limita a definir os limites e tamanhos dos volumes da malha. Além disso, simulações utilizando malhas não estruturadas demandam mais tempo e memória computacional do que as malhas estruturadas [Santos, 2008].

A malha utilizada no trabalho é estruturada, por tratar-se de uma geometria retangular não muito complexa, além da possibilidade de se obter maior precisão nos resultados. Neste trabalho, a malha utilizada segue a metodologia *stretched* desenvolvida por Mavripilis (1997) e apresentada nos trabalhos de Barreiro, (2009) e Gomes et al., (2012a).

A aplicação desta técnica consiste em definir regiões mais refinadas que outras. Estas regiões são definidas através do interesse da investigação que, no presente estudo, são as regiões de superfície livre. Essa estratégia de geração de malha pode ser estendida aos problemas de propagação de ondas regulares em tanques.

A Fig. 5.4 apresenta a malha bidimensional com os cinco dispositivos CAO acoplados e com o mesmo volume de entrada. As malhas dos outros casos estudados não são apresentadas, pois seguem o mesmo padrão.

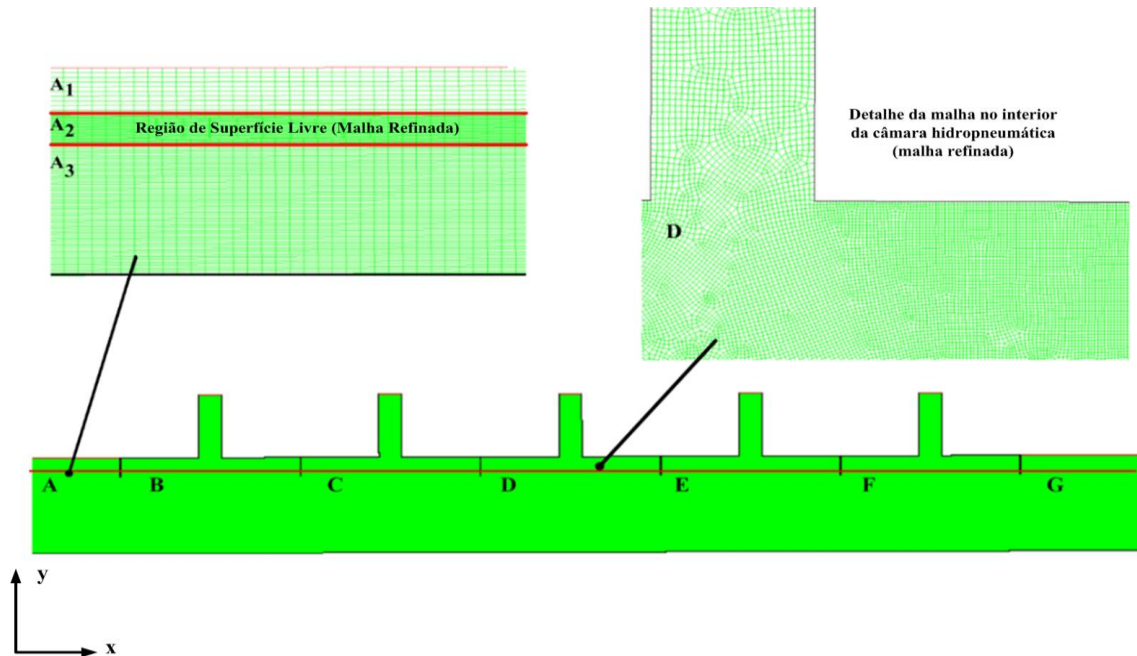


Figura 5.4 – Malha bidimensional com detalhes das regiões refinadas.

O domínio computacional foi dividido em sete regiões. A região A representa o domínio antes dos dispositivos CAO e está dividida verticalmente em três sub-regiões: A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>. Para a região da superfície livre da água (região A<sub>2</sub>) é adotado um refinamento de 40 volumes na direção vertical e 120 volumes na direção  $x$  em cada intervalo do comprimento de onda.

Além disso, 30 e 110 volumes são usados na direção  $y$  para a discretização espacial das regiões A<sub>1</sub> e A<sub>3</sub>, respectivamente, seguindo as recomendações de Barreiro (2009). Nas regiões B e C, encontram-se os dispositivos CAO, onde se pode verificar a malha mais refinada no interior dos mesmos.

Para a região dos dispositivos utilizou-se quadrados de 0,1 m de comprimento totalizando 620 volumes horizontais, enquanto que para as regiões fora dos dispositivos utilizaram-se quadrados de 1 m de comprimento. A região D representa a geometria após os dispositivos e apresenta 200 volumes horizontais.

Assim, as malhas criadas com as recomendações teóricas encontradas em trabalhos anteriores (Barreiro, 2009, Gomes et al., 2012a e Gomes, 2010) baseadas em testes de



qualidade de malha já feitos, possibilitam um ganho no tempo de pré-processamento, uma vez que, com as recomendações teóricas já estabelecidas, não se faz necessário o teste de qualidade de malha.

## 5.6 Parâmetros de Solução

Para se iniciar a solução de problemas em simulação numérica, definem-se primeiramente as condições de contorno, inicial e a malha a ser utilizada. A partir das condições definidas, definem-se os esquemas numéricos que são os parâmetros que delimitam como o FLUENT soluciona as equações durante a simulação numérica.

A divisão em subseções ocorre em função do detalhamento que será apresentado sobre o algoritmo de solução utilizado pelo FLUENT, na solução das equações deste trabalho. O FLUENT resolve as equações integrais para a conservação da massa e do movimento e, quando necessário, para a energia e outros escalares, como a turbulência e espécies químicas [FLUENT, 2016].

Os métodos numéricos de solução são: *Pressure-Based solver*, que é empregado para escoamentos de fluidos incompressíveis de baixa velocidade e *Density-Based Solver*, que é utilizado para fluidos compressíveis a alta velocidade. O método *VOF* está acoplado ao solver baseado na pressão [FLUENT, 2016].

O FLUENT permite escolher entre duas formas de solução das equações, *solver* segregado e *solver* acoplado. Neste trabalho é utilizado o *solver* segregado em todas as simulações numéricas.

O algoritmo acoplado resolve um sistema de equações acoplado que compreende a equação de quantidade de movimento e a equação de continuidade. As outras equações são resolvidas de forma dissociada como no algoritmo segregado [FLUENT, 2016].

No método de solução segregado, é utilizado um algoritmo de solução onde as equações são resolvidas sequencialmente ou segregadas a partir de outra equação. Isso resultará em um sistema de equações lineares com uma equação para cada volume do domínio.

### 5.6.1 Solução do Sistema de Equações

No estudo realizado, para resolver o sistema de equações discretizadas, é usado o *solver* de equações lineares de ponto implícito (Gauss Seidel) junto com o método Multigrid

Algébrico (AMG). O método AMG é usado para acelerar a convergência do *solver*, computando correções em uma série de níveis de malha grossa. O uso deste método reduz o número de iterações e o tempo da CPU para obter a convergência da solução, especialmente quando se tem um grande número de volumes de controle [FLUENT, 2016].

O AMG está caracterizado pelos parâmetros de suavização (*pré-sweeps*), os parâmetros de engrossamento (*post-sweeps*) e os parâmetros relacionados aos ciclos (*max cycles*). Em Gomes, 2014, foi desenvolvido um estudo para analisar a relação destes parâmetros e o tempo de simulação. Os resultados mostram que um valor de três para os parâmetros de pré e pós-suavização permitem obter a convergência nas simulações numéricas em menor tempo computacional.

### 5.6.2 Função de Interpolação

O Fluent usa a técnica do volume de controle para converter às equações pertencentes ao problema em equações algébricas que possam ser resolvidas numericamente. Esta técnica consiste em integrar as equações em cada volume de controle, resultando em equações discretas que conservam cada quantidade com base no volume de controle [Duarte, 2006].

Para a discretização da equação de quantidade de movimento, são associados valores discretos da variável no centro do volume de controle. Mas, para as faces dele, os esquemas de discretização *Upwind* de primeira ordem, *Upwind* de segunda ordem, *Power law* e *Quick* estão disponíveis.

- *Upwind* de primeira ordem: Quando este esquema é utilizado, assume-se que o valor da variável no centro do volume de controle pode ser considerado como o valor médio de todo o volume.
- *Upwind* de segunda ordem: Quando é desejada uma precisão de segunda ordem, as quantidades em todas as faces do volume são calculadas utilizando uma abordagem de reconstrução linear multidimensional aproximada. A solução para as faces é obtida usando uma expansão de série de Taylor a partir da solução do centro do volume de controle.
- *Power Law*: Este método faz uma interpolação usando a solução exata da equação de convecção-difusão para uma dimensão. Logo, após fazer a integração, a equação fica em função do número de Peclet.

- *Quick*: Este esquema é baseado na média ponderada de *Upwind* de segunda ordem e em uma interpolação central da variável.

Para este trabalho foi escolhido o esquema *Upwind* de primeira ordem.

### 5.6.3 Esquema de Discretização

Para a solução numérica da equação da quantidade de movimento, Equação (5.3), o campo de pressão e o fluxo de massa na face não são conhecidos e devem ser obtidos como parte da solução. O FLUENT utiliza um sistema de co-localização, segundo o qual a pressão e a velocidade são armazenadas no centro dos volumes. Para encontrar o valor da pressão na face, entre os volumes adjacentes, é necessário um esquema de interpolação para calcular os valores nominais da pressão no centro do volume [FLUENT, 2016].

O esquema padrão do FLUENT interpola os valores da pressão nas faces usando coeficientes da equação da quantidade de movimento. Quando há grandes gradientes nos termos fonte entre os volumes de controle, o perfil da pressão tem um gradiente elevado na face do volume e não pode ser interpolado usando este esquema. No presente trabalho, foi utilizado o esquema PRESTO (*PREssure STaggering Option*) que utiliza o balanço discreto da continuidade para um volume de controle inercial sobre a face para computar a pressão na face [FLUENT, 2016].

O esquema de discretização da fração volumétrica utiliza o esquema *Geo reconstruct*, que é utilizado neste trabalho. O esquema assume que a interface entre dois fluidos tem uma inclinação linear dentro de cada célula, o que é utilizado para calcular a advecção do fluido através das faces da célula.

### 5.6.4 Avaliação do Gradiente

O gradiente é utilizado na discretização das equações e ele contribui na construção dos valores da variável nas faces do volume de controle. O gradiente de uma variável conhecida é empregado para discretizar os termos da convecção e difusão nas equações de conservação. Os métodos disponíveis são *Green Gauss Cell Based*, *Green Gauss Node Based* e *Least Squad Cell Based*. No método *Green Gauss Cell Based* (o selecionado) o valor da variável é

tomado de uma média aritmética dos valores dos volumes de controle mais próximos. Detalhes deste método podem ser encontrados em FLUENT, (2016).

### 5.6.5 Acoplamento Pressão-Velocidade

Para o acoplamento pressão-velocidade foi adotado o método PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), cuja relação de aproximação entre as correlações para a pressão e velocidade possui um grau mais elevado que os métodos SIMPLE e SIMPLEC [Gomes, 2010].

- Método PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*): O esquema de acoplamento da pressão-velocidade PISO é da família do SIMPLE, e é baseado no grau mais alto da relação de aproximação entre as correções para a pressão e velocidade. Para melhorar a eficiência dos cálculos, o algoritmo PISO possui duas correlações adicionais: correção das vizinhanças e correção “*skewness*”. Este algoritmo é utilizado para problemas em estado transiente, que é o caso deste estudo.

Detalhes mais aprofundados dos métodos podem ser encontrados em Patankar, 1980.

### 5.6.6 Discretização Temporal

Existem duas formas de aproximação para o avanço do tempo: iterativo e não iterativo. A ideia básica do esquema de avanço não-iterativo (NITA-*Non-Iterative Time Advancement*), utilizado neste trabalho, é que para preservar a precisão total no tempo, não é necessário reduzir o erro a zero, mas somente se deve fazer isto a mesma ordem do erro de truncamento. O esquema NITA não precisa de repetições exteriores e realiza uma única iteração exterior por passo de tempo, o que acelera, significativamente, as simulações transientes.

Um parâmetro importante para a precisão dos resultados de uma simulação numérica é a definição do passo de tempo. O passo de tempo (*time step*) empregado nas simulações desta pesquisa foi de 0,01s em todos os casos. O tempo total para cada simulação é de 225 s,

tempos mais elevados são possíveis graças à praia numérica que diminui o efeito de reflexão da onda. Assim, o trabalho realizado tratou de um escoamento transiente e laminar, na Tabela 5.2 tem-se um resumo de todos os parâmetros e esquemas numéricos empregados nas simulações deste estudo.

Tabela 5.2- Parâmetros de simulação adotados.

<b>Formulação</b>	<b>Parâmetros adotados</b>
	Transiente
Solução no tempo	Formulação implícita de 1ª ordem Baseado na pressão Avanço não iterativo
Modelo VOF	Formulação explícita
Controle da solução	Método de acoplamento pressão-velocidade: PISO Método de discretização da pressão: PRESTO! Formulação da quantidade de movimento: <i>Upwind</i> de 1ª ordem Esquema de discretização da fração geométrica: <i>Geo-reconstruct</i>

## 5.7 Sondas de Monitoramento

Após determinar todos os procedimentos para iniciar a simulação do problema a ser estudado, devem-se determinar as superfícies de monitoramento (as quais são as sondas de medição ou superfícies distribuídas no domínio computacional para salvar os dados em cada iteração). A interpretação dos resultados obtidos é feita através das sondas definidas e, nesta seção, serão apresentadas as sondas presentes em uma única câmara hidropneumática, pois as demais seguem a mesma definição.

Na Figura 5.5 é apresentada uma esquematização das sondas utilizadas para o problema. Para cada caso estudado a posição das sondas varia proporcionalmente à variação geométrica do dispositivo, isto é, com duas câmaras acopladas têm-se as mesmas sondas na segunda câmara hidropneumática nas posições referentes à segunda sonda e assim por diante.

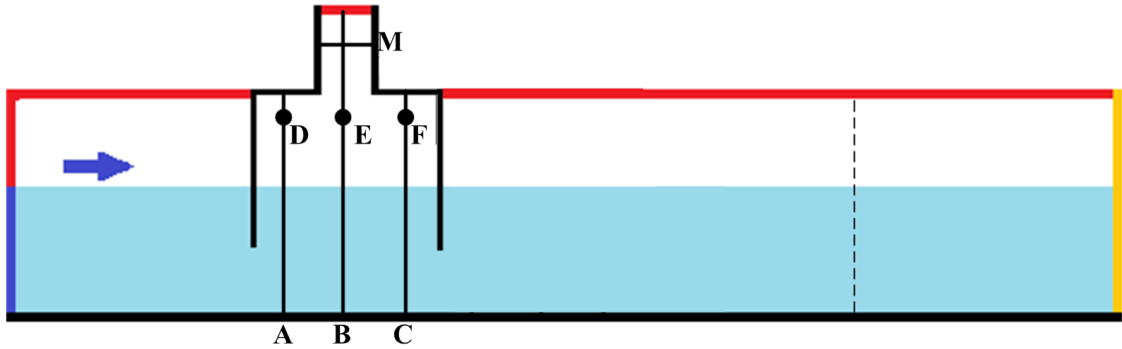


Figura 5.5 – Superfícies de monitoramento no domínio computacional bidimensional.

A função das linhas verticais de monitoramento A, B e C é medir a elevação de água (superfície livre) através da seguinte integral,

$$\int \alpha dA = \sum_{t=1}^n \alpha_t |A_t| \quad (5.7)$$

onde  $\alpha$  é a quantidade de água em cada volume e  $A_t$  é a área de cada volume ( $m^2$ ), mas, por se tratar de uma linha, representa o comprimento de cada volume de controle bidimensional.

Importante destacar que as posições das sondas são variáveis, uma vez que dependem da configuração geométrica da câmara CAO. A média aritmética da elevação da superfície livre medida nestas linhas de monitoramento indica a elevação de água dentro das câmaras CAO.

A função da linha horizontal M localizada na entrada da câmara CAO é monitorar a vazão volumétrica, dada por,

$$\int v \cdot dA = \sum_{t=1}^n v_t A_t \quad (5.8)$$

onde  $v$  representa a velocidade na direção  $y$  ( $m/s$ ) e  $A_t$  a área da superfície que é atravessada pelo escoamento de ar ( $m^2$ ). A linha de monitoramento M também mede a vazão mássica,

$$\int \rho_{ar} v \cdot dA = \sum_{t=1}^n \rho_{ar,t} v_t A_t \quad (5.9)$$

onde  $v$  representa a velocidade na direção  $y$  (m/s),  $A_t$  a área da superfície que é atravessada pelo escoamento de ar ( $m^2$ ) e  $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar ( $kg/m^3$ ).

Na mesma linha também é medida a pressão estática  $P_e$  (Pa),

$$\frac{1}{A} \int P_e dA = \frac{1}{A} \sum_{t=1}^n P_{e_t} |A_t| \quad (5.10)$$

onde  $n$  é o número de volumes.

A pressão estática pode ser calculada através da seguinte relação para a pressão total:

$$P = P_e + P_d \quad (5.11)$$

onde  $P_d$  é a pressão dinâmica (Pa) dada por:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (5.12)$$

Por fim, as sondas localizadas nos pontos D, E e F medem a pressão total.

Neste trabalho foram avaliadas a vazão mássica (na saída do duto da turbina), a pressão (no interior da câmara) e a potência hidropneumática.

Os valores médios foram calculados empregando a média aritmética para problemas transientes *Root Mean Square* (RMS) [Marjani et al, 2006]:

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (5.13)$$

onde  $x$  representa a grandeza que se deseja calcular a média RMS.

A potência hidropneumática é calculada segundo [Dizadji e Sajadian, 2011]:

$$P_{hid} = \left( P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (5.14)$$

onde:  $P_{ar}$  é a pressão estática na chaminé do dispositivo CAO (Pa),  $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\dot{m}$  é a vazão mássica média atravessando o duto da turbina ( $\text{kg/s}$ ) e  $v_{ar}$  é a velocidade do ar na chaminé ( $\text{m/s}$ ) dada por:

$$v_{ar} = \frac{\dot{m}}{A\rho_{ar}} \quad (5.15)$$

onde  $A$  representa uma área em corte transversal da chaminé ( $\text{m}^2$ ). Como o estudo realizado é bidimensional a terceira dimensão é considerada unitário. A potência da onda incidente (W) ao dispositivo CAO é dada por

$$P_{INC} = \frac{\rho g A^2 \omega}{4k} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (5.16)$$

onde  $\rho$  é a massa específica da água ( $998,2\text{kg/m}^3$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,81\text{m/s}^2$ ),  $A$  amplitude da onda (m),  $\omega$  a frequência da onda ( $\text{s}^{-1}$ ),  $k$  o número de onda e  $h$  a profundidade de água (m). A potência da onda incidente no presente trabalho, calculada pela Equação (5.16), é igual a  $5692,65\text{W}$ , para os casos de ondas regulares.

## 5.8 Verificação e Validação do Modelo Numérico

Para simular computacionalmente os problemas de engenharia em escala real, representam-se os mesmos problemas em escala de um protótipo. Os modelos computacionais, muitas vezes, são construídos em escala reduzida, também chamada de escala de laboratório [Seibt, 2014].

Esse é um recurso bastante usado para pesquisas e desenvolvimento de projetos de engenharia, sendo essencial para validação de estudos por métodos computacionais, pois os modelos físicos de laboratório fornecem dados para validação do estudo numérico. Por outro lado, as equações do modelo matemático, em sua forma analítica, proporcionam a verificação do modelo em relação à base teórica do estudo [Seibt, 2014].

Uma primeira forma de testar o modelo VOF aplicado à simulação numérica de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica é verificar a geração



da onda com as características definidas a priori. Na simulação numérica da propagação de ondas regulares em tanques de ondas, a elevação da superfície livre pode ser determinada de forma analítica através da Equação (3.18) e Equação (3.25).

No presente trabalho, a verificação do modelo computacional foi realizada comparando a elevação da superfície livre ao longo do tempo, numa posição específica obtida de forma numérica, com a respectiva solução analítica. Também foram verificadas as propriedades da praia numérica e analisadas as diminuições da altura da onda, fato esse esperado com o uso do recurso da praia numérica.

Na Figura 5.6, foram comparados os resultados numéricos com os analíticos para o caso bidimensional, os quais foram obtidos pela Equação (3.23) na posição  $x = 98,1$  m. Na Figura 5.6(A) verifica-se todo o tempo de simulação de 225 s e na Figura 5.6(B) apenas um intervalo de tempo é apresentado para mostrar a similaridade entre as soluções. A Figura 5.6 (C) mostra a aplicação de uma sonda no final do tanque de ondas, mostrando a efetividade da praia numérica na diminuição da altura da onda e redução na reflexão da mesma.

A diferença relativa entre as soluções numérica e analítica foi medida instantaneamente e a média das diferenças foi 1,48 %, sendo o valor máximo encontrado de 5,44%.

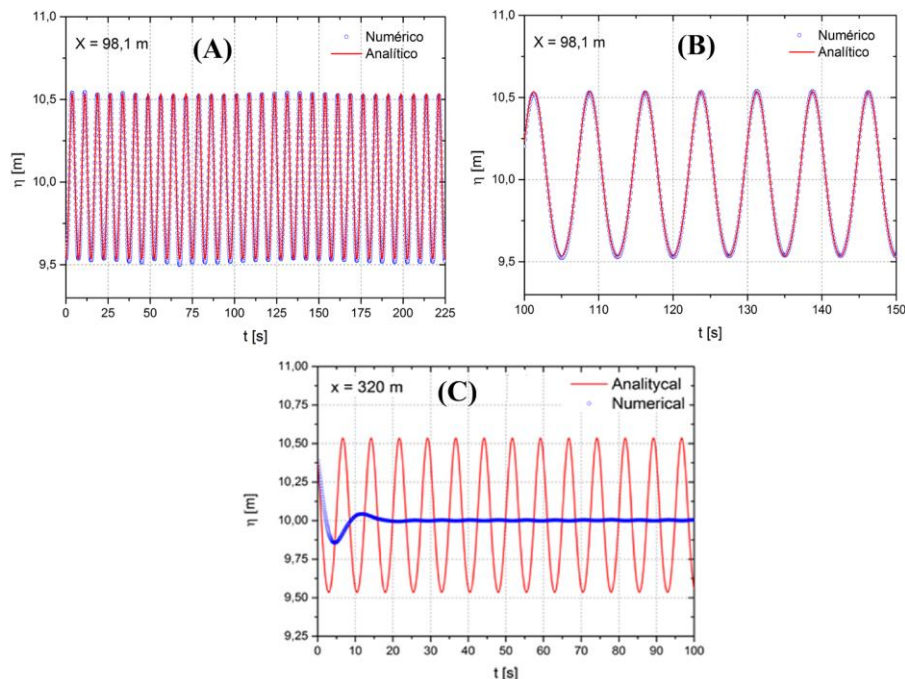


Figura 5.6 – Elevação da superfície livre da água para o caso bidimensional: (A) Todo o tempo computacional; (B) detalhe de  $100 \text{ s} < t < 150 \text{ s}$  e (C) Aplicação da praia numérica na posição  $x = 320 \text{ m}$ .

Outra etapa do trabalho consiste em validar o modelo numérico, considerando a interação entre a água, o ar e a estrutura do dispositivo CAO. Os dados obtidos foram comparados com os resultados experimentais e numéricos de Liu et al., (2011) seguindo as recomendações apresentadas por Gomes (2014).

As dimensões do canal de onda e do dispositivo OWC são descritas em Liu et al., (2011) e determinam o domínio computacional. Em todos os casos, a turbina não está inserida no duto da turbina, as variações da pressão do ar e da velocidade do ar são analisadas na câmara hidropneumática para os diferentes períodos de onda ( $3,5 \text{ s} \leq T \leq 8 \text{ s}$ ), sendo a altura da coluna d'água (profundidade) de 16 m e a altura da onda gerada de 2 m.

Assim, os resultados foram comparados com os obtidos numericamente e experimentalmente por Liu et al., (2011). Deve-se notar que o modelo numérico aqui adotado difere do modelo numérico empregado por Liu et al., (2011) porque ao comparar os resultados discretos obtidos para a velocidade, eles estão superestimados em relação às magnitudes das velocidades experimentais. Esse fato é justificado devido aos efeitos de ressonância entre as ondas e a câmara. Os valores numéricos obtidos concordam com os encontrados nos trabalhos anteriores considerando os domínios 2D e 3D, conforme mostrado na Figura 5.7 (A).

Apesar das diferenças nos resultados, tanto as magnitudes de velocidade quanto de pressão estão em linha com os resultados numéricos da referência e, principalmente, com os resultados experimentais para campo de pressão da Figura 5.7 (B). Pode-se notar que conforme o período das ondas aumenta, a pressão relativa também aumenta, para  $T = 6,5 \text{ s}$  e  $7 \text{ s}$ , os resultados obtidos estão entre os resultados 2D e 3D de Liu et al., (2011), enquanto para  $T = 8 \text{ s}$ , o modelo computacional proposto conduz a praticamente o mesmo valor do resultado experimental.

O modelo matemático e numérico utilizado neste trabalho considera o escoamento em regime laminar e incompressível, sendo esta uma das simplificações do modelo real adotado. Conforme mostrado por Liu et al., (2011), na região interna da câmara, o número de Reynolds calculado é alto, configurando um escoamento turbulento e utilizando uma abordagem de Reynolds averaged Navier Stokes (RANS) com o modelo de turbulência  $k-\epsilon$  padrão.

Embora os resultados obtidos no presente trabalho não sejam totalmente convergentes com os apresentados por Liu et al., (2011), em geral, apresentam as mesmas tendências para

os resultados numéricos e experimentais dos autores. Portanto, é possível considerar o modelo computacional empregado como verificado e validado.

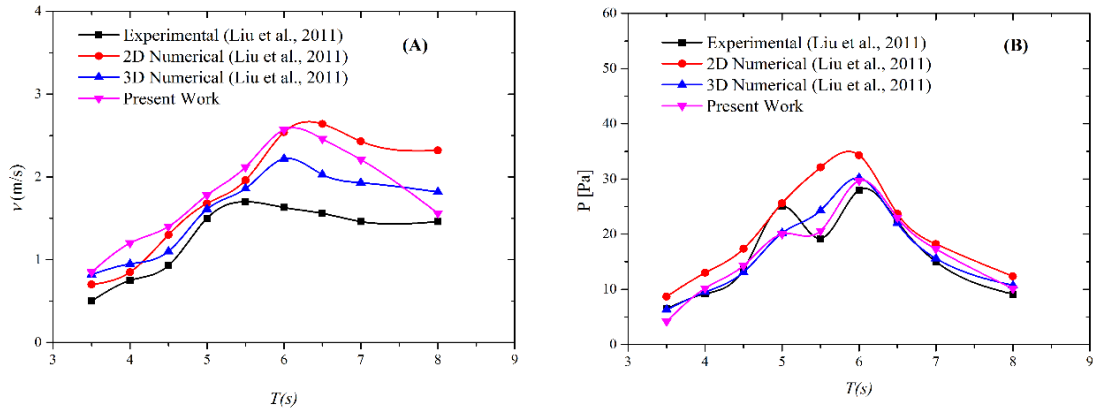


Figura 5.7 – Comparação entre os resultados obtidos no presente estudo e os apresentados por Liu et al., 2011 para diferentes períodos de onda.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente trabalho aborda um estudo de conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica através de um dispositivo do tipo CAO com variação da quantidade de câmaras hidropneumáticas acopladas. Toda a pesquisa se desenvolveu de forma numérica sendo realizada a verificação e validação do modelo utilizado.

A apresentação dos resultados se faz com a análise individual de cada caso com um número respectivo de câmaras acopladas, isto é, são mostrados os resultados individuais dos estudos que vão desde uma única câmara acoplada até cinco. Ao final, é comparado o desempenho do indicador de performance para cada caso e, assim, determinado o que ocorre com a potência hidropneumática, vazão mássica e pressão com o incremento das câmaras.

O uso do Design Construtal, associado com o método de otimização Busca Exaustiva, é determinante para aperfeiçoar a geometria dos dispositivos estudados. Assim, o clima de ondas estabelecido e as relações entre a onda incidente e a configuração geométrica do dispositivo conversor são pontos importantes na análise geométrica dos mesmos.

Os indicadores de performance são a média RMS para a potência hidropneumática, pressão e vazão mássica. Assim, é possível obter uma recomendação teórica numérica acerca da geometria do dispositivo do tipo CAO que possui a maior eficiência na transformação de energia, sempre levando em conta as dimensões físicas aceitáveis para um problema real. O estudo foi realizado para uma onda em escala real e regular (Stokes de 2ª ordem). O clima de ondas e as dimensões do tanque de ondas foram apresentados na Tabela 5.1.

### 6.1 Estudo de um Dispositivo com uma Única Câmara

O primeiro caso analisado é quando se tem um dispositivo CAO com uma única câmara hidropneumática, este estudo já foi bastante reproduzido por outros pesquisadores, mas os mesmos utilizaram comprimento e período de ondas diferentes do que foi usado nesta pesquisa. Por este motivo e por representar o caso mais básico de estudo, se faz importante a sua análise.

Por se tratar de um dispositivo com apenas uma câmara retangular, o grau de liberdade analisado foi  $H_1/L_1$  (razão entre altura e largura da câmara do primeiro dispositivo frente à onda incidente). O grau de liberdade  $H_7/l_1$  (razão entre altura e largura da chaminé do primeiro dispositivo) é mantido constante e igual a  $H_7/l_1 = 3$ , conforme indicado por Lima, (2016). Outros dois graus de liberdade também são mantidos constantes,  $e_2$  (espessura da coluna que divide os dispositivos) e  $H_{depth}$  (profundidade de submersão do dispositivo), e seus respectivos valores são  $e_2 = 0,1$  m e  $H_{depth} = 9,86$  m, valores esses que foram definidos pelo trabalho desenvolvido em Lima (2016) e Lima et al., (2019).

Ao todo foram analisadas onze configurações geométricas para este caso e o volume de entrada permaneceu constante e igual ao apresentado na seção anterior. Na Tabela B.1 (Vide apêndice B), é possível verificar as dimensões geométricas destes modelos de CAO. Todas as medidas foram calculadas através das Equações (4.1 - 4.6) e todos os resultados encontrados para essa configuração de dispositivo podem ser verificados na Tabela C.1.

A Figura 7.1 apresenta os resultados obtidos para potência hidropneumática, pressão e vazão mássica, conforme foi sendo variada a relação  $H_1/L_1$ , mantendo-se o volume de entrada constante. Na Figura 6.1 (A) é possível observar uma tendência linear de aumento da potência hidropneumática, apresentando um valor de máximo absoluto dentre os casos estudados quando se tem  $H_1/L_1 = 0,2613$  ( $H_1 = 4,1335$ m e  $L_1 = 15,8219$ m) para uma potência de  $P_{hid} = 2,4$  kW.

Ao verificar o gráfico que representa a potência, se observa que conforme se aumenta a altura da câmara e diminui-se a largura, ocorre um aumento de desempenho até um valor máximo. A mudança de inclinação da curva da potência ocorre e, rapidamente, uma tendência de decréscimo é verificada.

A justificativa para a diminuição da potência, após certo valor de  $H_1/L_1$ , é definida pela relação direta existente entre pressão e vazão mássica no cálculo da mesma. Com o aumento da altura da câmara, o efeito de pistão que ocorre com a coluna de ar que se encontra dentro da mesma diminui e o mesmo ocorre com a pressão.

Mesmo as câmaras retangulares apresentando vantagem na conversão energética em função da rápida diminuição de área entre a câmara e o duto da turbina, o aumento da altura da câmara associado à diminuição da largura protagonizam a diminuição do efeito de pistão. Outro ponto que também é determinante é o efeito de reflexão nas paredes internas das câmaras, causando vórtices que diminuem a eficiência de conversão energética.

A análise da vazão mássica se faz com a sonda de monitoramento que se encontra no meio do duto da turbina, desta forma a geometria que apresenta o valor máximo de vazão mássica coincide com a encontrada para potência. A Figura 6.1 (B) mostra os resultados encontrados para vazão mássica, mas é destacável a semelhança entre as tendências de crescimento da potência e vazão. Isso se justifica, pois a quantidade de ar que passa pelo duto da turbina é a responsável pela conversão energética.

A tendência que se mostra após o caso de mais alto desempenho de vazão mássica é de diminuição, mas com estabilidade. A justificativa para essa tendência se mostra pelo aspecto contínuo das ondas, mesmo com o efeito de reflexão dificultando o efeito de pistão. O valor de vazão mássica do caso de melhor desempenho é  $\dot{m} = 16,9 \text{ kg/s}$ .

A Figura 6.1 (C) apresenta o desenvolvimento da pressão ao longo das variações geométricas e, como os outros indicadores de performance, a pressão apresenta o seu maior valor ( $P = 695,8 \text{ Pa}$ ) para a mesma configuração geométrica dos casos anteriormente analisados. Como a vazão mássica, a mesma apresentou uma variação pequena quando comparado seu valor máximo e mínimo (cerca de 35%).

A pressão é um parâmetro diretamente proporcional a potência hidropneumática como pode ser visto na Equação 5.14. Assim, o caso de mais alta pressão ocorre concomitantemente com o caso de mais alta potência, tendo a configuração geométrica correspondente igual aquelas dos casos anteriores já apresentados.

A justificativa para o aumento de pressão se dá pela diminuição da largura da câmara hidropneumática. Mas, com o aumento da altura, verifica-se que a mesma apresenta um estado similar a constante, pois o efeito de pistão se torna cada vez menor em função do aumento da altura da câmara.

Observando a Figura 6.1, verifica-se que a variação de vazão mássica, pressão e potência hidropneumática apresentam seu valor mais significativo para valores dos graus de liberdade entre  $0,25 \leq H_1/L_1 \leq 0,38$ . Assim, a influência da variação geométrica da câmara hidropneumática causa alterações significativas nos parâmetros avaliados.

Como o indicador de desempenho é a potência hidropneumática, tem-se para  $(H_1/L_1)_o = 0,2613$  a geometria que apresenta o melhor desempenho do dispositivo CAO e, associando estes valores encontrados com a onda característica apresentada, verifica-se  $(H_1/L_1)_o \approx 16(H/\lambda)$ , caracterizando uma recomendação teórica para dispositivos com uma única câmara.

Assim, o melhor desempenho foi verificado para  $(H_1/L_1)_o = 0,2613$  com  $P = 695,833$  Pa,  $\dot{m} = 16,172$  kg/s e  $(P_{hid})_m = 2416,16$  W. O caso com menor desempenho foi para  $H_1/L_1 = 0,0153$  com  $P = 454,62$  Pa,  $\dot{m} = 6,22$  kg/s e  $P_{hid} = 257,97$  W.

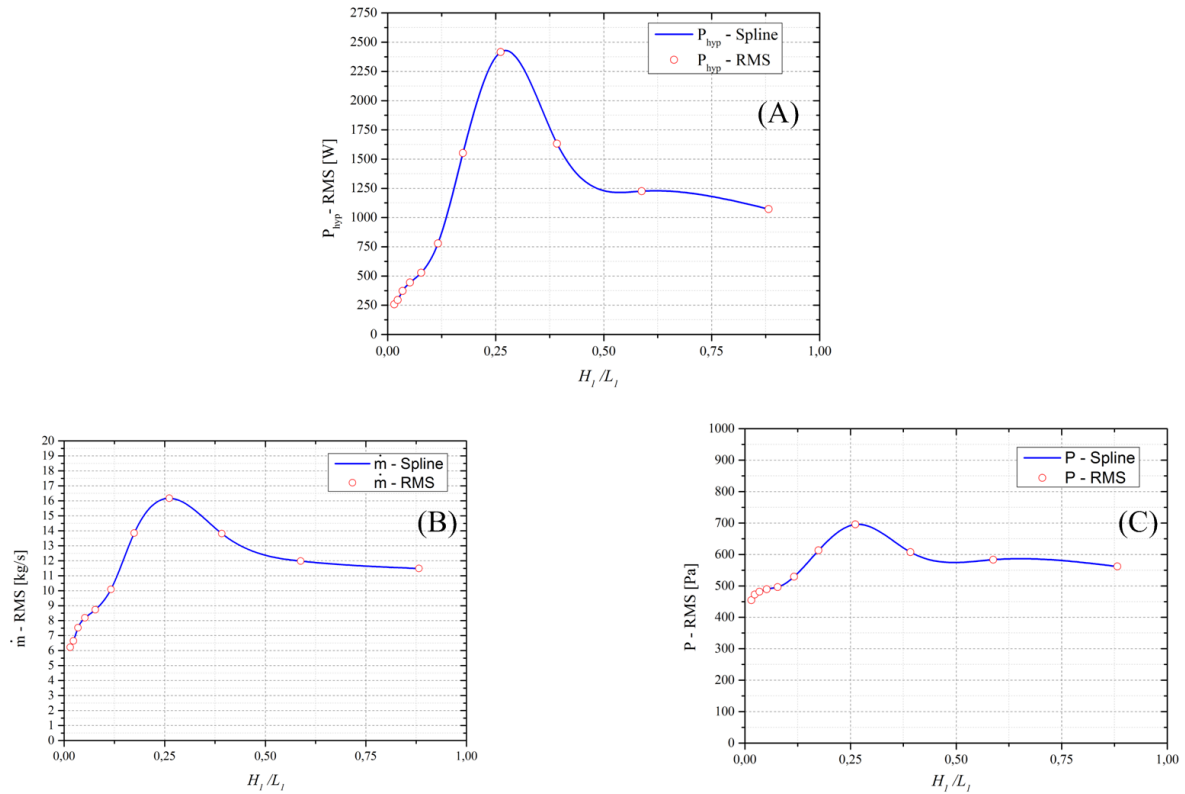


Figura 6.1 – Resultados da potência hidropneumática (A), vazão mássica (B) e pressão (C) para o caso de uma única câmara no dispositivo CAO variando um grau de liberdade.

Conclui-se que os casos de mais alto e mais baixo desempenho apresentam uma diferença significativa entre os resultados em relação à geometria dos dispositivos. Assim, com este estudo inicial, pode-se iniciar um estudo comparativo quando se incrementa o número de câmaras hidropneumáticas acopladas em um único dispositivo.

## 6.2 Estudo de um Dispositivo com Duas Câmaras Acopladas

Diferente do estudo realizado na seção anterior, nesta parte da pesquisa é investigado um dispositivo, mas com duas câmaras acopladas. Esse tipo de dispositivo é definido com uma coluna que divide as duas câmaras com uma espessura determinada.

A primeira parte de estudo deste tipo de dispositivo verifica somente a variação das alturas e larguras das duas câmaras hidropneumáticas acopladas ao mesmo tempo. Posteriormente, estuda-se a variação da altura e espessura da coluna que divide as câmaras acopladas.

O fato de ser um estudo inédito e que complementa a área de estudos de dispositivos CAO justifica sua execução, mas, além disso, abre-se espaço para a implementação de dispositivos mais longos se assemelhando a uma fazenda de conversão de energia das ondas. Partindo do estudo de Lima (2016), que mostra a viabilidade do uso de câmaras retangulares em detrimento de outras configurações geométricas, as câmaras acopladas nesta análise apresentam este formato.

Nos estudos realizados por Lima et al., (2018) e Lima et al., (2019), foi proposto o estudo de dispositivos CAO com câmaras acopladas. Os graus de liberdade inicialmente analisados foram  $H_1/L_1$  (razão entre altura e largura da câmara do primeiro dispositivo frente à onda incidente) e  $H_3/L_2$  (razão entre altura e largura do segundo dispositivo).

No presente estudo os graus de liberdade  $H_7/l_1$  (razão entre altura e largura da chaminé do primeiro dispositivo) e  $H_8/l_2$  (razão entre altura e largura da chaminé do segundo dispositivo) são mantidas constantes e iguais a  $H_7/l_1 = H_8/l_2 = 3$ . Outros dois graus de liberdade também são mantidos constantes  $e_2$  (espessura da coluna que divide os dispositivos) e  $H_{depth}$  (profundidade de submersão do dispositivo), e seus respectivos valores são:  $e_2 = 0,1$  m e  $H_{depth} = 9,86$  m.

Ao todo foram analisadas onze configurações geométricas para o caso em que se variaram somente estes dois graus de liberdade de forma igual e com volumes de entrada constantes. Na Tabela B.1 é possível verificar as dimensões geométricas destas configurações. Como no caso anterior, todas as medidas foram calculadas através das Equações (4.1 - 4.6).

Os resultados analisados referentes à potência hidropneumática, a pressão e vazão mássica podem ser verificados na integral na Tabela C.2 no Apêndice C. A Figura 6.2 apresenta todos os resultados encontrados com a variação dos graus de liberdade para o dispositivo com duas câmaras acopladas.

Os resultados para todos os indicadores de performance são totais, isto é, soma-se os resultados encontrados para cada câmara isolada, sendo, neste caso, a soma da potência, pressão e vazão mássica da primeira e da segunda câmaras. A análise da influência individual de cada câmara se faz no decorrer da análise dos indicadores de desempenho.



Seguindo o estudo feito para o dispositivo com uma única câmara, inicia-se o estudo da potência hidropneumática (Vide Figura 6.2 (A)). A tendência de crescimento segue um perfil próximo ao que foi encontrado para o caso com somente uma única câmara acoplada, isto é, atingindo seu valor de mais alto desempenho quando  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = 0,2613$  e decaindo até atingir um mínimo valor para  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = 0,8817$  seguido de aumento até atingir a partir de  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = 1,9839$ . Uma justificativa para essa estabilidade que o gráfico aparenta ao total da potência acumulada pode ser justificada em função de que os efeitos reflexivos da onda no interior das câmaras podem ser atenuados em função de serem duas câmaras divididas por uma coluna. Assim, após um valor máximo, ocorre um decréscimo que se justifica pelo aumento da altura das paredes e diminuição da largura da câmara, influenciando diretamente no efeito de pistão e, conseqüentemente, na pressão e vazão mássica.

A Figura 6.2 (B) apresenta, também, a mesma tendência que o caso com uma única câmara acoplada e uma estabilidade após o caso de mais alto desempenho. Mas, diferente do resultado encontrado anteriormente, a diferença entre o caso de mais alto desempenho e o de mais baixo é grande (cerca de 64,2%), mostrando que a variação geométrica e inclusão de câmaras acopladas influencia neste parâmetro.

A pressão é calculada como a soma da pressão estática com a pressão dinâmica, em que a pressão dinâmica apresenta um fator quadrático em relação à velocidade do ar. Assim, com o aumento da velocidade do ar, conseqüentemente, ocorre o aumento da pressão e, em função da duplicidade de câmaras, o efeito quase cíclico da pressão se justifica no gráfico da Figura 6.2 (C).

Observando os resultados da Figura 6.2, os valores geométricos que representam os casos de mais alto desempenho coincidem em todos os indicadores de desempenho. Os valores dentro do intervalo de  $H_1/L_1; H_3/L_2$ ,  $0,25 \leq H_1/L_1; H_3/L_2 \leq 0,38$ , corresponde com os mesmos encontrados para o caso com uma única câmara acoplada.

Como o indicador de desempenho é a potência hidropneumática, tem-se para  $H_1/L_1 = H_3/L_2 = 0,2613$  a geometria que apresenta o melhor desempenho do dispositivo CAO e associando estes valores encontrados com a onda característica apresentada, verifica-se  $H_1/L_1 \approx H_3/L_2 \approx 16(H/\lambda)$ , coincidindo com o caso anterior.

Os resultados que podem ser vistos na Figura 6.3 são as topologias de velocidade, do caso de mais alto desempenho, na direção y. Na Figura 6.3 (A) apresenta o campo de fração volumétrica de água, em especial, ressaltando a parte que compreende as câmaras

hidropneumáticas e as chaminés do dispositivo na fase de compressão, isto é, quando a onda incide no primeiro dispositivo.

A Figura 6.3 (B) mostra a velocidade do ar dentro das chaminés, em que se verifica um aumento da velocidade do ar (detalhe em vermelho) quando inicia o efeito de pistão, neste caso a compressão.

Assim, o melhor desempenho foi verificado para  $(H_1/L_1)_o = (H_3/L_2)_o = 0,2613$  com  $P = 1343,033$  Pa,  $\dot{m} = 30,812$  kg/s e  $(P_{hid})_m = 4514,135$  W. O caso com menor desempenho foi para  $H_1/L_1 = H_3/L_2 = 0,0153$  com  $P = 916,642$  Pa,  $\dot{m} = 11,415$  kg/s e  $P_{hid} = 446,798$  W.

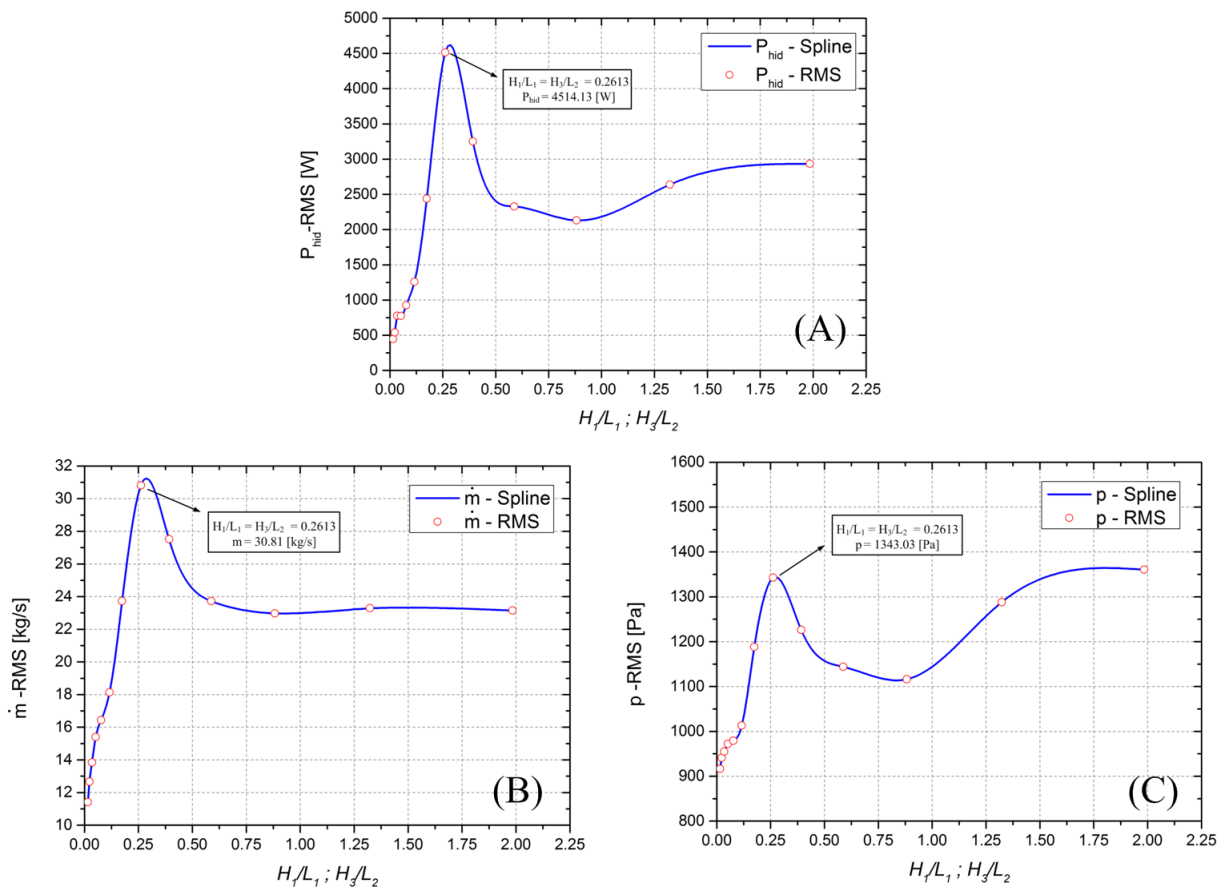


Figura 6.2 – Resultados da potência hidropneumática (A), vazão mássica (B) e pressão (C) para o caso de dois dispositivos CAO acoplados e variando dois graus de liberdade.

Portanto, a inclusão de uma câmara, tornando o dispositivo com duas câmaras acopladas, mostra que a influência da geometria é determinante no estudo desse tipo de conversor. Assim, define-se a aplicabilidade do estudo de dispositivos CAO com duas câmaras acopladas.

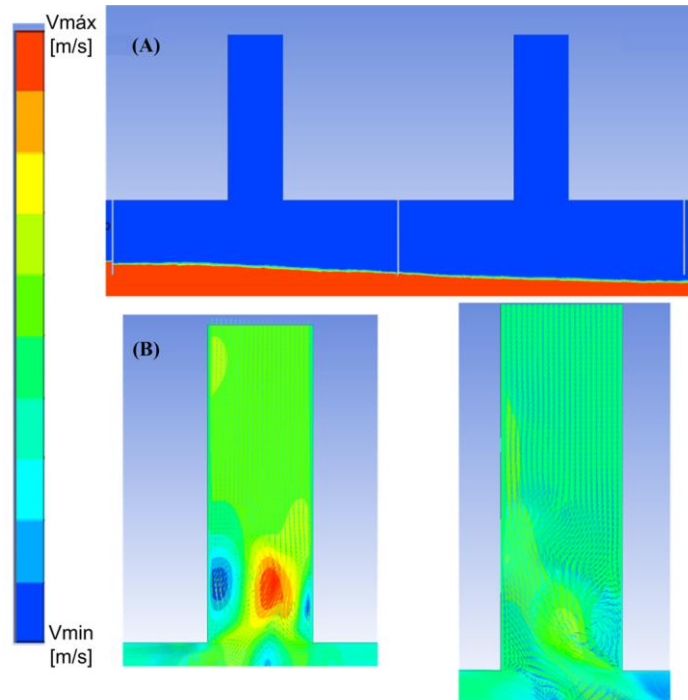


Figura 6.3 – (A) Campo de fração volumétrica de água e (B) Topologias da velocidade na direção  $y$  (m/s) e fases água, para a variação de dois graus de liberdade:  $H_1/L_1$  e  $H_3/L_2$ .

### 6.2.1 Dispositivos com Duas Câmaras Acopladas - Estudo dos Graus de Liberdade $H_2$ e $e_2$

O segundo estudo realizado é uma continuação da análise do efeito dos graus de liberdade na potência hidropneumática de um dispositivo CAO com duas câmaras hidropneumáticas acopladas. A avaliação dos mesmos se faz de forma individual, pois impactam diretamente no indicador de desempenho que continua sendo a potência hidropneumática.

Assim, os graus de liberdade considerados são:  $H_2$  (altura da coluna que divide os dispositivos) e  $e_2$  (espessura da coluna que divide as câmaras hidropneumáticas). Como na análise anterior, alguns graus de liberdade foram mantidos constantes,  $H_{depth}$  (profundidade de submersão do dispositivo),  $H_7/l_1$  (razão entre altura e largura da chaminé do primeiro dispositivo) e  $H_8/l_2$  (razão entre altura e largura da chaminé do segundo dispositivo), os

valores seguem os mesmos apresentados na seção anterior e mantêm constantes também  $H_1/L_1$  e  $H_3/L_2$  com os valores de mais alto desempenho já determinados.

Como é feita a análise de dois graus de liberdade, em um primeiro momento variou-se apenas  $H_2$  mantendo  $e_2$  constante e igual 0,1 m. Com o resultado da análise de  $H_2$ , varia-se  $e_2$  mantendo  $H_2$  constante, mas sendo o valor escolhido o de mais alto desempenho encontrado, o uso dessa técnica se faz com a definição de um conjunto fixo e determinado de variações geométricas dentro de um espectro de opções, sendo esse espectro um subconjunto da técnica de otimização busca exaustiva.

Ao todo foram analisadas vinte e duas configurações geométricas (doze para variação de  $H_2$  e dez para variação de  $e_2$ ). As Tabelas B.2 e B.3 apresentam as geometrias estudadas.

Foram analisados os resultados obtidos referentes à potência hidropneumática, pressão e vazão mássica, os mesmos podem ser observados nas Tabelas C.3 e C.4, em que são apresentados os resultados encontrados para os indicadores de performance. Na Figura 6.4, são apresentados os resultados para as grandezas calculadas no caso do grau de liberdade  $H_2$ .

A análise inicial é feita quando se varia o grau de liberdade  $H_2$  individualmente. Através da Tabela B.2 é possível verificar que os valores da coluna que divide os dispositivos aumentam, em especial, a mesma cresce em direção ao fundo do tanque de ondas. Tomou-se o cuidado para que não fosse obstruída a passagem de água entre os dispositivos.

Considerando os resultados apresentados na Figura 6.4 (B), verifica-se uma variação nos valores de vazão mássica para os doze casos estudados. Este fenômeno pode ser explicado pelo fato de mesmo com a coluna dividindo os dispositivos sendo maior, ainda assim a profundidade de submersão ( $H_{depth}$ ) do dispositivo é suficiente de forma a não diminuir o volume de água dentro das câmaras mantendo o efeito de pistão dentro das mesmas.

Com a vazão mássica se mantendo com valores de pouca oscilação, espera-se que a pressão também apresente um comportamento similar. Assim, observando a coluna dos resultados para pressão na Tabela C.3 e na Figura 6.4(C) verifica-se um início com baixas pressões, mas conforme a altura da coluna aumenta a pressão também segue esse perfil, estabilizando conforme pode ser verificado.

O aumento da pressão se deve ao fato da mesma ser calculada através de um fator quadrático em relação à velocidade do ar na chaminé do dispositivo. Quando  $H_2$  atinge valores que diminuem o volume de água no interior da câmara, diminui assim a coluna de

água que aumenta a velocidade ar que se desloca no duto da turbina do dispositivo, diminuindo assim a pressão do ar.

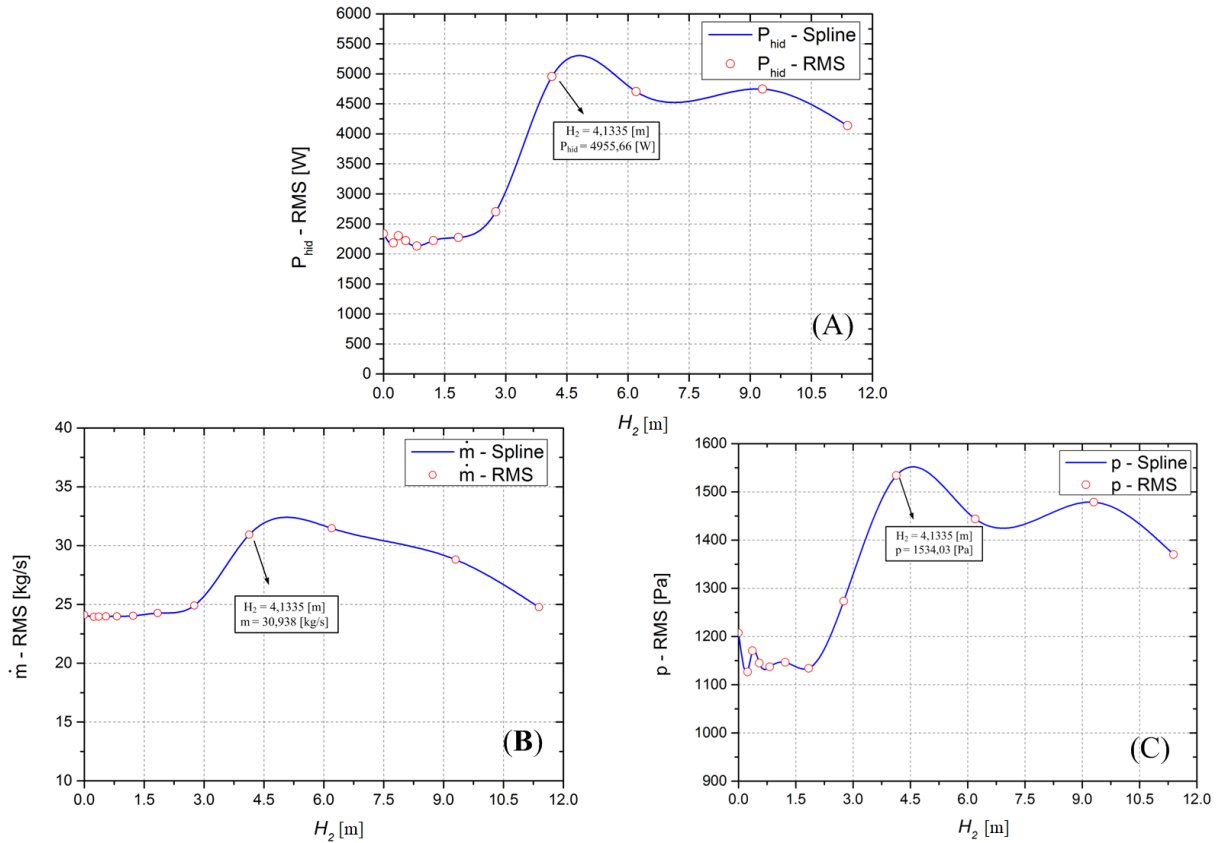


Figura 6.4 – Resultados de Potência Hidropneumática (A), Vazão mássica (B) e Pressão(C) para o caso do grau de liberdade  $H_2$ .

A Figura 6.4(A) apresenta os resultados obtidos para potência hidropneumática, onde, observa-se que a mesma segue um perfil próximo ao encontrado nos resultados de pressão e vazão mássica. Este fato ocorre em função da dependência linear da potência com essas duas grandezas.

Em comparação com a primeira análise realizada na seção anterior, a variação da geometria da coluna que divide as câmaras hidropneumáticas faz com que ocorra uma melhora no desempenho de conversão do dispositivo. O estudo inédito de câmaras acopladas mostra que o valor assimétrico da parede central, quando comparado com as paredes laterais dos dispositivos, apresenta um ganho em potência hidropneumática, diferente do uso de colunas simétricas.

Tem-se que o valor de geometria que está associado ao valor de mais alta potência é  $H_2 = 4,1335$  m. Associando este valor com as características da onda utilizada, obtém-se que o grau de liberdade  $H_2 \approx (\lambda / 15)$ .

Outro aspecto que deve ser levado em consideração são as topologias de velocidade, em especial neste trabalho são apresentadas as mesmas na direção  $y$ . A Figura 6.5, mostra como se dá a passagem do ar na chaminé do dispositivo CAO quando se tem a fase de compressão na câmara hidropneumática (Figura 6.5 A). A Figura 6.5 (B) apresenta o comportamento do ar, verificando que o mesmo se desloca no sentido de saída da chaminé, esse efeito se faz em função do efeito de pistão.

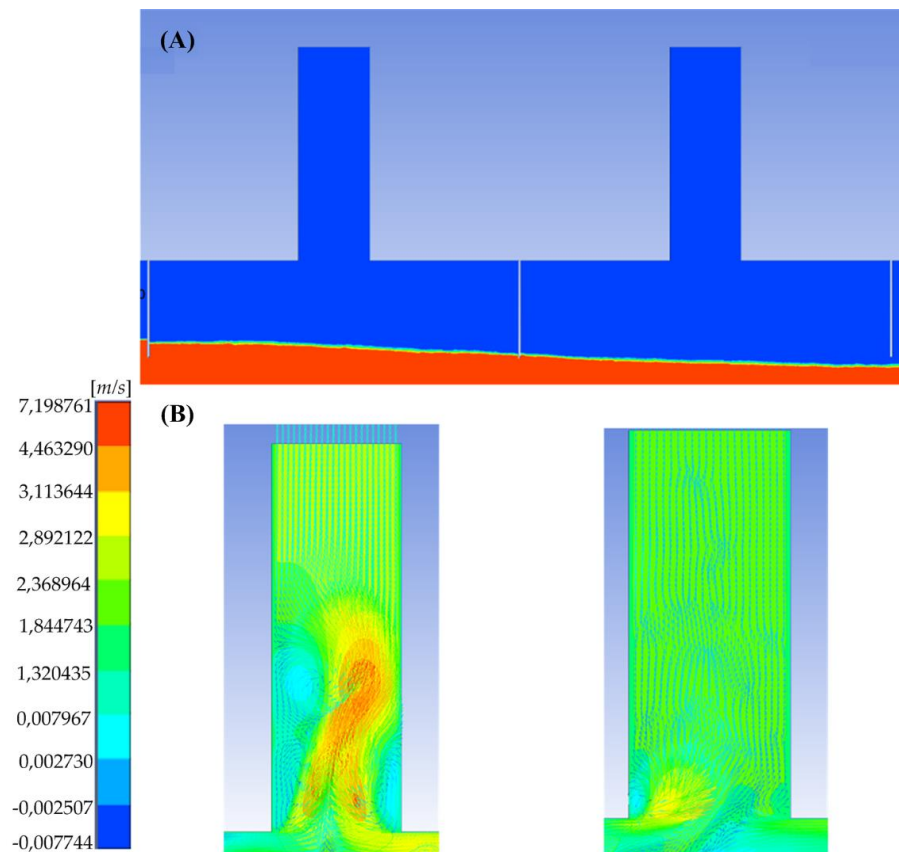


Figura 6.5 – Topologias da velocidade na direção  $y$  (m/s) e fases água, para a variação do grau de liberdade:  $H_2 = 4,1335$  m.

Assim, o caso de mais alto desempenho foi verificado para  $(H_2)_o = 4,1335$  m com  $p = 1.534,037$  Pa,  $\dot{m} = 30,938$  kg/s e  $(P_{hid})_m = 4,9$  kW. O caso com menor desempenho foi para  $H_2 = 0,8165$  com  $p = 1137,148$  Pa,  $\dot{m} = 23,988$  kg/s e  $P_{hid} = 2,1$  kW.

Considerando os resultados apresentados, determinou-se a altura da coluna que divide os dispositivos CAO acoplados de forma a maximizar a potência hidropneumática do sistema. O estudo que segue refere-se à análise da espessura desta mesma coluna, mantendo-se constante o valor ótimo encontrado para  $H_2$ . O grau de liberdade que caracteriza a espessura da parede que divide os dois dispositivos CAO é  $e_2$  e representa o estudo inicial para determinar as dimensões básicas para o estudo inédito de dispositivos com mais câmaras acopladas.

Tendo verificado altura e largura da câmara hidropneumática, altura da coluna que divide os dispositivos e agora analisando a espessura desta mesma parede, será possível determinar a geometria que apresenta uma maximização da potência hidropneumática disponível para os casos estudados.

Para este caso foram estudadas dez geometrias em que foram variadas as espessuras da coluna. A Tabela B.3 apresenta todas essas geometrias estudadas. Os resultados encontrados para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática podem ser observados na Tabela C.4 e na Figura 6.6.

A vazão mássica apresentou uma pequena variação (aproximadamente 7,72 %) em seus valores conforme a espessura da coluna aumentou. Este fato pode ser explicado em função do volume de entrada da câmara hidropneumática, que permaneceu constante e assim não ocorreu grande diferença nos valores encontrados.

A pressão segue a mesma tendência verificada para vazão mássica, somente com uma variação maior (aproximadamente 10,93 %). A explicação para estes valores não variarem é a mesma para a baixa variação da vazão mássica, pois mantendo o volume de entrada constante, foi possível manter a mesma pressão na câmara hidropneumática e com as dimensões da chaminé constantes, o fluxo de ar que passa pela mesma permanece o mesmo, explicando a baixa variação de pressão.

Quando é verificada a pressão e vazão mássica ao mesmo tempo, percebe-se uma semelhança em relação ao seu comportamento. As duas apresentam um crescimento nos primeiros valores de espessura e alcançam um valor máximo. No caso da pressão, esta apresenta algumas oscilações e começa a diminuir, conforme comportamento mostrado na Figura 6.6 (C).

Como as duas grandezas influenciam o cálculo da potência hidropneumática, espera-se que a mesma apresente um comportamento semelhante, o que pode ser observado na Figura

6.6(A). A variação de potência fica em torno de 15,70 %, mostrando que uma variação geométrica como a espessura da coluna que divide os dispositivos, influencia diretamente no desempenho de forma a causar um aumento de, aproximadamente, 13 % na potência hidropneumática sem uma variação geométrica abrupta.

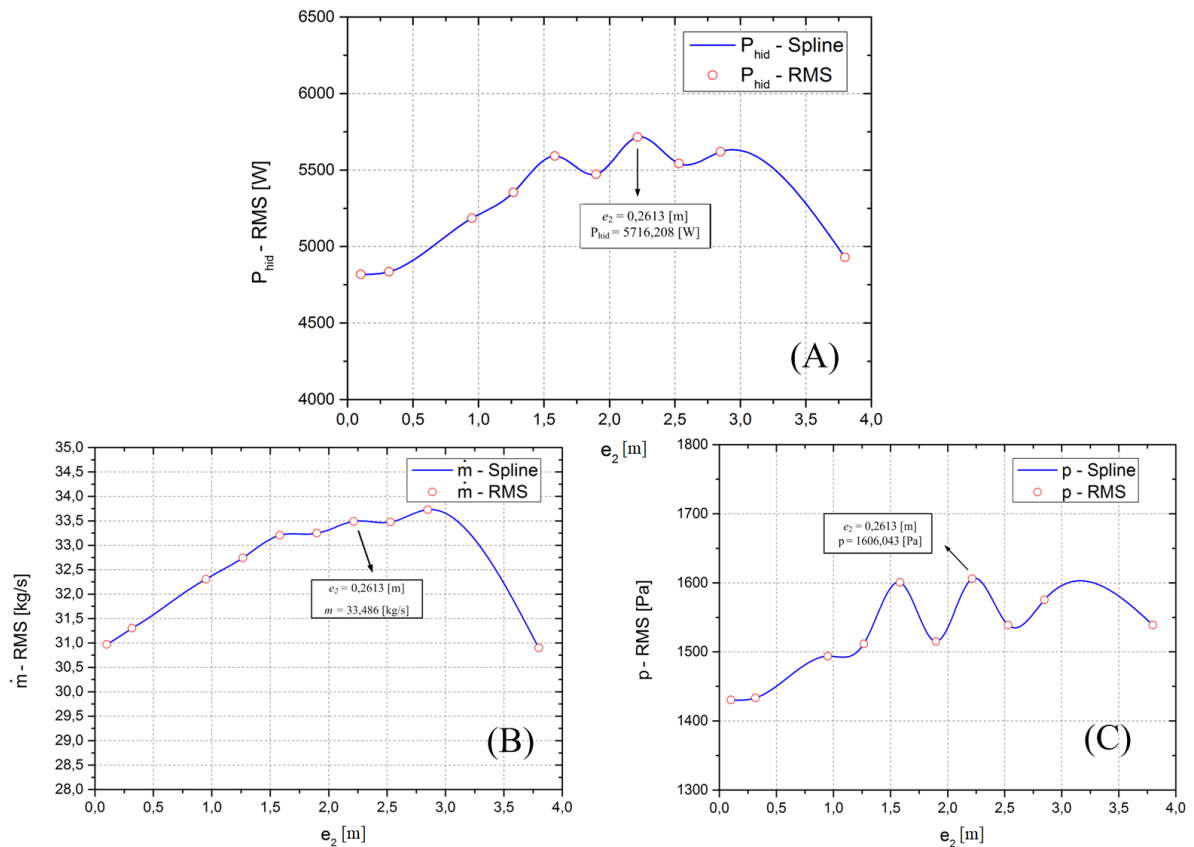


Figura 6.6 – Resultados da Potência Hidropneumática (a), Vazão mássica (b) e Pressão(c) para o caso do grau de liberdade  $e_2$ .

A Figura 6.7 mostra o aumento dos valores dos indicadores de desempenho (pressão e vazão mássica) no decorrer do estudo dos quatro graus de liberdade, mantendo constante em cada caso o valor de melhor desempenho encontrado anteriormente.

Como nos casos já apresentados, com a determinação da geometria que maximiza a potência hidropneumática disponível para os casos estudados é possível associar os valores encontrados com as características da onda utilizada no presente trabalho. Assim, define-se que o valor de geometria com mais alto desempenho é  $e_2 = 2,215 \text{ m} \approx (11/5) H$ .



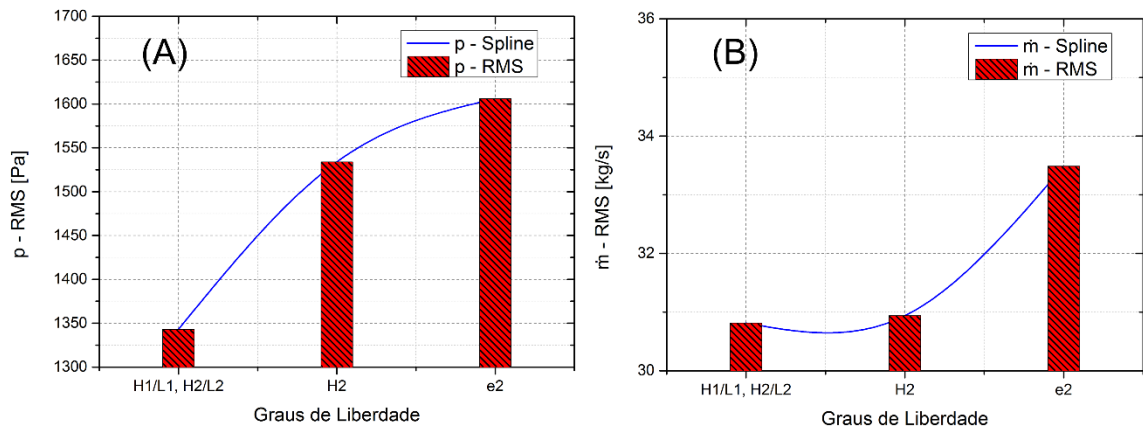


Figura 6.7 – Valores dos graus de liberdade encontrados para os valores de melhor desempenho para pressão (A) e Vazão Mássica (B).

O caso de mais alto desempenho foi verificado para  $e_2 = 2,215$  m com  $P = 1606,043$  Pa,  $\dot{m} = 33,486$  kg/s e  $P_{hid} = 5.716,208$  W. O caso com menor desempenho foi para  $e_2 = 0,100$  com  $P = 1430,491$  Pa,  $\dot{m} = 30,969$  kg/s e  $P_{hid} = 4.818,480$  W.

O trabalho desenvolvido com estes graus de liberdade possibilitou o aumento da potência hidropneumática, como pode ser observado na Figura 6.8. De uma maneira geral é possível observar que mudanças na geometria da câmara hidropneumática acarretam mudanças no desempenho do dispositivo CAO.

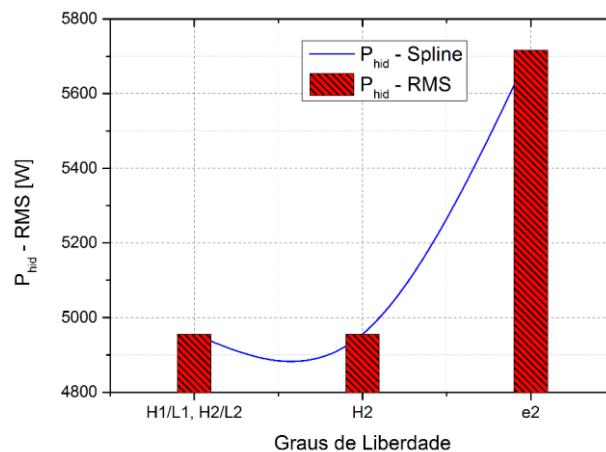


Figura 6.8 – Variação da potência hidropneumática para os valores ótimos de cada grau de liberdade analisado.

### 6.3 Estudo de um Dispositivo com Três Câmaras Acopladas

O incremento de mais uma câmara hidropneumática é apresentada nesta seção. Seguindo os estudos anteriores onde foram apresentados dispositivos com apenas uma e duas câmaras acopladas, agora são estudados os fenômenos que ocorrem quando se tem três câmaras acopladas.

Como nos casos anteriores os volumes de entrada serão mantidos constantes e os graus de liberdade analisados serão:  $H_1/L_1$  (razão entre altura e largura da câmara do primeiro dispositivo frente a onda incidente),  $H_2/L_2$  (razão entre altura e largura do segundo dispositivo) e  $H_3/L_3$  (razão entre altura e largura do terceiro dispositivo).

Os graus de liberdade  $H_7/l_1$  (razão entre altura e largura do duto da turbina do primeiro dispositivo),  $H_8/l_2$  (razão entre altura e largura do duto da turbina do segundo dispositivo) e  $H_9/l_3$  (razão entre altura e largura do duto da turbina do terceiro dispositivo) são mantidas constantes e iguais a  $H_7/l_1 = H_8/l_2 = H_9/l_3 = 3$ . Outros dois graus de liberdade também são mantidos constantes  $e_2$  (espessura da coluna que divide os dispositivos) e  $H_{depth}$  (profundidade de submersão do dispositivo), e seus respectivos valores são:  $e_2 = 0,1$  m e  $H_{depth} = 9,86$  m.

Ao todo foram avaliadas onze configurações geométricas. Na Tabela B.1 é possível verificar as dimensões geométricas destas configurações. A Tabela C.5 apresenta os resultados encontrados para todas as análises feitas nos casos estudados.

A Figura 6.9 apresenta os indicadores de performance analisados e seus resultados, lembrando que eles representam a soma total dos indicadores de performance, isto é, soma-se o resultado de cada indicador em cada câmara individualmente, sendo o valor total a soma de todos. A Figura 6.9 (A) mostra o resultado da potência hidropneumática somada para as três câmaras acopladas para diferentes valores dos graus de liberdade. A configuração geométrica do caso de mais alto desempenho corresponde com o encontrado nos casos estudados anteriormente.

Inicialmente verifica-se uma pequena flutuação de valores de potência, fato justificável pela inclusão da terceira câmara acoplada, tendo uma baixa potência na terceira câmara acoplada, pois o tempo que leva para onda chegar nesta câmara é superior às demais. Com o passar do tempo, estabiliza a passagem das ondas e ocorre o pico do valor de potência e logo após uma diminuição que demonstra tendência de seguir em queda.

A diminuição da potência hidropneumática se dá pelo fato de que com o acréscimo de mais uma câmara, os efeitos de reflexão no interior das mesmas aumenta, associados à

diminuição dos efeitos de pistão levando assim a resultados menores. O acréscimo de mais uma câmara não representa uma piora no desempenho do dispositivo. Pelo contrário, ocorre uma melhora em comparação às análises anteriores com um aumento considerável em todos indicadores de desempenho (este estudo é apresentado na seção 6.6).

Quando analisamos a vazão mássica (vide Figura 6.9 (B)) é possível verificar seu maior valor no mesmo intervalo do grau de liberdade presente na potência, isso se dá pela ligação direta entre potência e vazão. O declínio da vazão é suave e apresenta uma leve tendência de continuidade, isso se justifica pela ação contínua do efeito de pistão, mesmo que fraco, dentro das câmaras.

A pressão é uma grandeza diretamente proporcional à potência hidropneumática, tanto que as oscilações entre as mesmas se assemelham muito como pode ser observado na Figura 6.9 (C) e o valor de geometria que apresenta o valor de mais alto desempenho coincide com a potência.

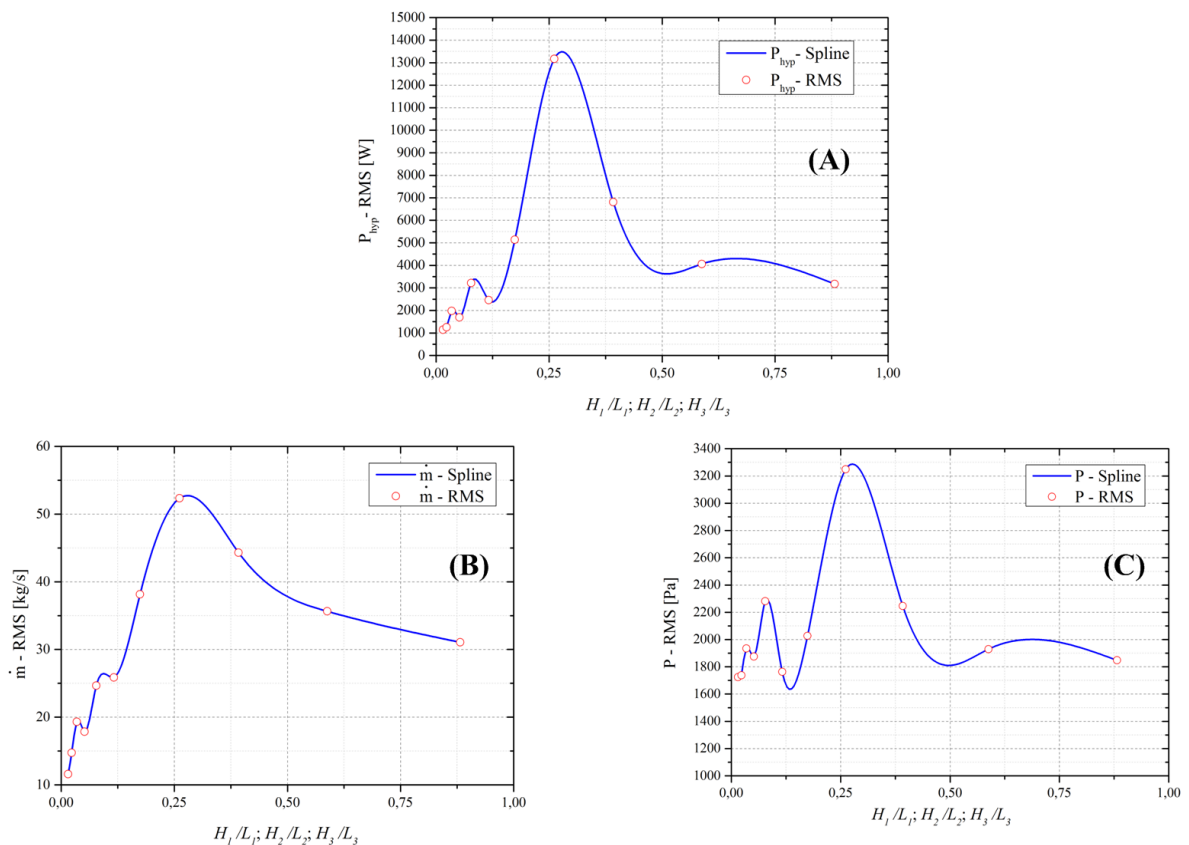


Figura 6.9 – Resultados da potência hidropneumática (A), vazão mássica (B) e pressão (C) para o caso de três dispositivos CAO acoplados ( $e_2 = 0,1$  m);

Observando a Figura 6.9, verifica-se uma variação de vazão mássica (cerca de 62,9 %) e pressão (cerca de 31,7 %) significativas para valores dos graus de liberdade entre  $0,25 \leq H_1/L_1; H_3/L_2 \leq 0,38$ , intervalo em que se encontra o aumento de ambos os parâmetros. Assim, a influência da variação geométrica da câmara hidropneumática causa alterações significativas nos parâmetros avaliados.

Como o indicador de desempenho é a potência hidropneumática disponível, tem-se para  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = H_3/L_3 = 0,2613$  a geometria que apresenta o melhor desempenho do dispositivo CAO e associando estes valores encontrados com a onda característica apresentada, verifica-se  $H_1/L_1 \approx H_2/L_2 \approx H_3/L_3 \approx 16(H/\lambda)$ .

Assim, o melhor desempenho foi verificado para  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = H_3/L_2 = 0,2613$  com  $P = 3248,08$  Pa,  $\dot{m} = 52,34$  kg/s e  $P_{hid} = 13165,98$  W. O caso com menor desempenho foi para  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = H_3/L_2 = 0,0153$  com  $P = 1723,3$  Pa,  $\dot{m} = 11,59$  kg/s e  $P_{hid} = 1141,77$  W.

Conclui-se que os casos de mais alto e mais baixo desempenho apresentam uma diferença entre os resultados que é significativa em relação à geometria dos dispositivos. Assim, inicia-se o estudo mais aprofundado de câmaras hidropneumática acopladas e como se dá a relação entre o aumento das mesmas e os indicadores de performance.

## 6.4 Estudo de um Dispositivo com Quatro Câmaras Acopladas

A penúltima análise a ser feita é referente a inclusão da quarta câmara hidropneumática acoplada a único dispositivo. Espera-se que um dispositivo CAO com quatro câmaras tenha uma potência disponível superior aos casos com menor quantidade das mesmas.

Como nos casos anteriores os volumes de entrada serão mantidos constantes e os graus de liberdade analisados serão:  $H_1/L_1$  (razão entre altura e largura da câmara do primeiro dispositivo frente a onda incidente),  $H_2/L_2$  (razão entre altura e largura do segundo dispositivo),  $H_3/L_3$  (razão entre altura e largura do terceiro dispositivo) e  $H_4/L_4$  (razão entre altura e largura do quarto dispositivo).

Os graus de liberdade  $H_7/l_1$  (razão entre altura e largura do duto da turbina do primeiro dispositivo),  $H_8/l_2$  (razão entre altura e largura do duto da turbina do segundo dispositivo),  $H_9/l_3$  (razão entre altura e largura do duto da turbina do terceiro dispositivo) e  $H_{10}/l_4$  (razão entre altura e largura do duto da turbina do quarto dispositivo) são mantidas constantes e iguais a  $H_7/l_1 = H_8/l_2 = H_9/l_3 = H_{10}/l_4 = 3$ . Outros dois graus de liberdade também são

mantidos constantes  $e_2$  (espessura da coluna que divide os dispositivos) e  $H_{depth}$  (profundidade de submersão do dispositivo), e seus respectivos valores são:  $e_2 = 0,1$  m e  $H_{depth} = 9,86$  m.

Ao total foram simuladas onze configurações geométricas, seguindo a mesma variação dos casos apresentados nas seções anteriores. Os indicadores de performance analisados foram a potência hidropneumática, vazão mássica e pressão.

A configuração geométrica analisada pode ser vista na Tabela B.1 bem como os resultados encontrados para cada caso podem ser vistos na Tabela C.6. Associando os resultados apresentados na Figura 6.10 com os da Tabela C.6 é possível verificar todas as soluções encontradas.

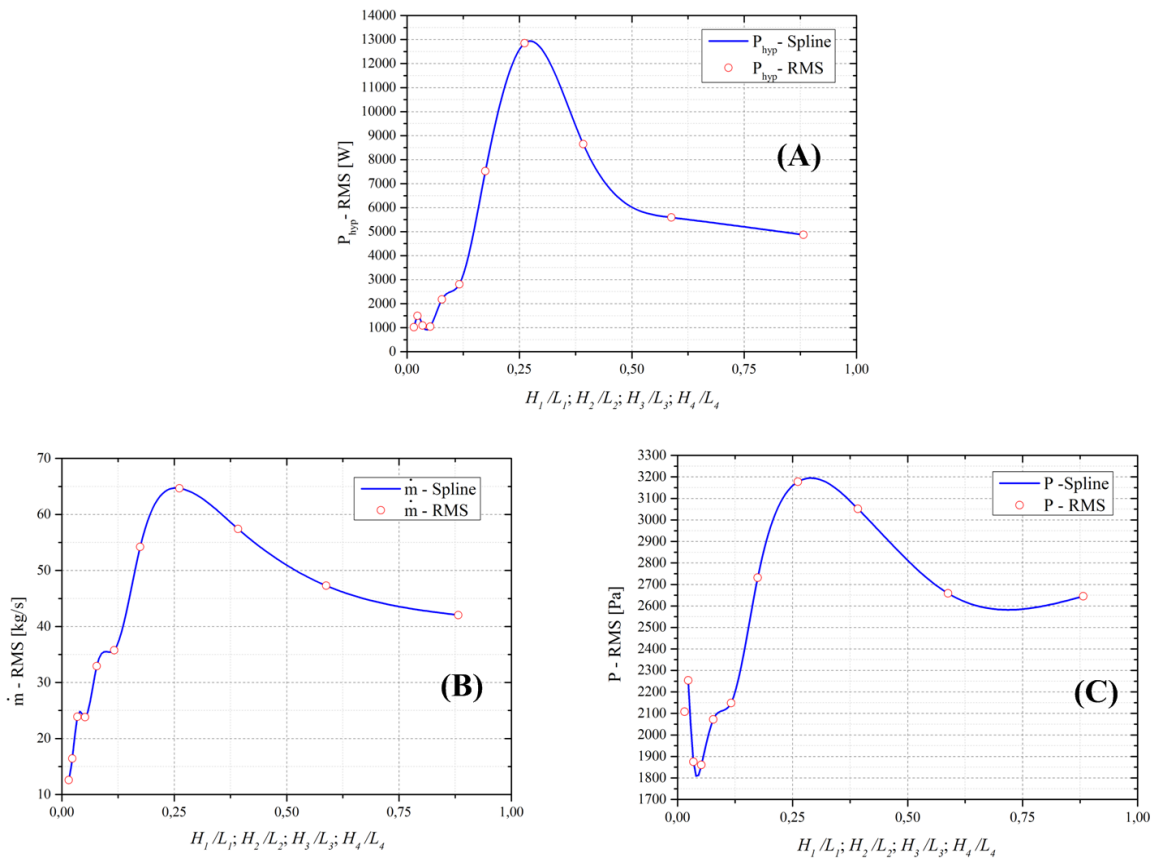


Figura 6.10 – Resultados da potência hidropneumática (A), vazão mássica (B) e pressão (C) para o caso de quatro dispositivos CAO acoplados.

Inicialmente é avaliada a potência hidropneumática que nos retorna a potência disponível no dispositivo. Os dados são coletados individualmente em cada dispositivo e, após, determina-se a potência total, que representa a soma dos resultados individuais

encontrados em cada câmara acoplada. A análise individual de cada câmara não é realizada, pois são pequenas as variações dos indicadores de performance quando analisados sozinhos.

A Figura 6.10 (A) apresenta os resultados encontrados para potência hidropneumática. Como nas configurações geométricas apresentadas nas seções anteriores, o comportamento da curva de potência é muito similar com os casos anteriores. O valor de geometria que apresenta o mais alto desempenho de potência é o mesmo dos casos anteriormente analisados  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = H_3/L_3 = H_4/L_4 = 0,2613$ , tendo assim a mesma recomendação teórica já apresentada na seção anterior.

Observa-se também na Figura 6.10 (A), que após o valor máximo de potência ocorre um decréscimo como nos casos anteriores, tendo a sua justificativa como sendo a diminuição do efeito de pistão em função do aumento da altura das câmaras e diminuição das larguras e também pelo aumento do efeito de reflexão no interior das mesmas. Nota-se também um perfil de continuidade e leve queda de potência ao analisar os valores finais de variação geométrica, isso ocorre devido ao aumento do número das câmaras acopladas que permite uma constante ação, mesmo que menor, do efeito de pistão, por esse motivo as diminuições dos valores e também incluso está o aumento do efeito de reflexão interno de cada câmara acoplada.

A Figura 6.10 (B), apresenta a variação da vazão mássica conforme varia-se os graus de liberdade analisados. As oscilações sutis de diminuição e o aumento até chegar ao valor de mais alto desempenho (que coincide geometricamente com a potência) justificam-se pelo tempo que leva para onda passar por todas as câmaras acopladas. Note-se que a onda perde um pouco da sua potência devido aos efeitos reflexivos das paredes das estruturas. Ao chegar ao seu ponto de mais alta vazão, observa-se uma diminuição suave dos valores convergindo para uma constante. Esse fenômeno ocorre devido ao movimento contínuo das ondas e a influência da praia numérica que promove a diminuição da reflexão sob o dispositivo.

A pressão, apresentada na Figura 6.10 (C), que tem uma influência direta sobre a potência hidropneumática, inicialmente apresenta um declínio, pois somente as câmaras iniciais apresentam variação de pressão, enquanto as finais estão com pouca oscilação. Como nos casos anteriores, a configuração geométrica de mais alto valor de pressão é a mesma encontrada para vazão e potência.

Com a passagem de todas as ondas pelo dispositivo, é possível verificar um comportamento oscilatório na pressão, pois o efeito de pistão, mesmo que menor, ainda mantém o comportamento de aumento e diminuição de pressão na passagem da câmara para o

duto da turbina. Observa-se, também, que o dispositivo com quatro câmaras acopladas apresenta um desempenho inferior ao caso com três câmaras acopladas.

Como nos casos anteriores, são analisados os casos de mais alto e baixo desempenho para assim ser possível verificar a influência da geometria sobre a potência disponível. Assim, o melhor desempenho foi verificado para  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = H_3/L_2 = H_4/L_4 = 0,2613$  com  $P = 3177,11$  Pa,  $\dot{m} = 64,65$  kg/s e  $P_{hid} = 12847,06$  W. O caso com menor desempenho foi para  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = H_3/L_2 = H_4/L_4 = 0,0153$  com  $P = 2108,15$  Pa,  $\dot{m} = 12,58$  kg/s e  $P_{hid} = 1022,76$  W.

## 6.5 Estudo de um Dispositivo com Cinco Câmaras Acopladas

Este tipo de dispositivo é inédito, pois ainda não se tem registro na bibliografia a respeito de um estudo com cinco câmaras acopladas. Como nos casos anteriores, todos os indicadores de performance analisados apresentam um resultado total, isto é, soma-se o resultado individual de cada câmara para assim determinar um resultado global para cada indicador.

Os graus de liberdade analisados nesta etapa do trabalho são:  $H_1/L_1$  (razão entre altura e largura da câmara do primeiro dispositivo frente a onda incidente),  $H_2/L_2$  (razão entre altura e largura do segundo dispositivo),  $H_3/L_3$  (razão entre altura e largura do terceiro dispositivo),  $H_4/L_4$  (razão entre altura e largura do quarto dispositivo) e  $H_5/L_5$  (razão entre altura e largura do quinto dispositivo).

Os graus de liberdade correspondentes aos dutos das turbinas são considerados constantes e com o mesmo valor dos casos anteriores, assim como a profundidade de submersão e a espessura da coluna que divide os dispositivos. Estes graus de liberdade apresentam os valores de:  $H_7/l_1 = H_8/l_2 = H_9/l_3 = H_{10}/l_4 = H_{11}/l_5 = 3$ ,  $e_2 = 0,1$  m e  $H_{depth} = 9,86$  m. O total de simulações para esse caso foi o mesmo estabelecido para os anteriores, sendo um total de onze casos. As geometrias utilizadas e os resultados de todas as simulações podem ser observados na Tabela B.1 e Tabela C.7, respectivamente.

Inicialmente é realizada a análise da pressão no interior das câmaras hidropneumáticas, pois é um dos indicadores de desempenho. Devido ao movimento oscilatório provocado pelas ondas que atingem o aparelho, ocorre um movimento da coluna d'água que está dentro das

câmaras, simulando o movimento do pistão, causando um processo denominado compressão e descompressão do ar.

Quando a onda atinge a câmara, temos a compressão do ar e com isso uma força empurra o ar em direção ao duto da turbina do dispositivo. Assim, ocorre um aumento da pressão dentro da câmara até a descompressão, que é quando a onda completa sua passagem pelas câmaras. Ao todo, os resultados de pressão foram analisados em quinze sondas de medição, três para cada câmara hidropneumática. A Figura 6.11 mostra as pressões em cada um dos casos analisados.

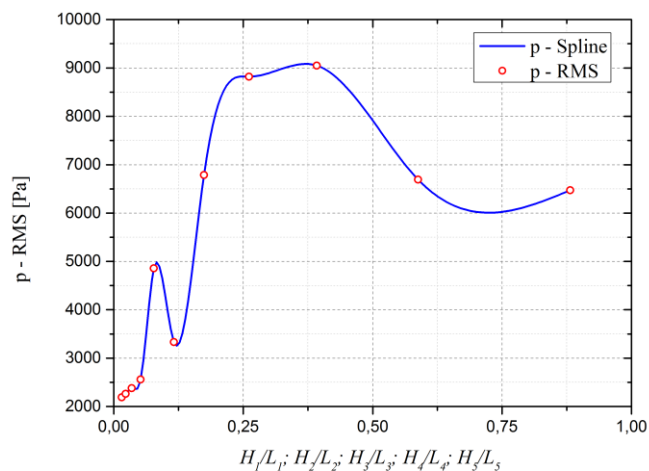


Figura 6.11 – Pressão total em um dispositivo com cinco câmaras acopladas.

À medida que os graus de liberdade aumentam, surge um ponto máximo absoluto de pressão onde, imediatamente a seguir, começa a sua diminuição. Isto é justificado pela descontinuidade geométrica, pois a partir de um determinado ponto (neste caso máximo absoluto) começa a ocorrer perda de pressão e aumento de recirculação do ar no interior do duto da turbina.

A diferença de pressão entre o caso de desempenho mais alto e o de desempenho mais baixo mostra uma diferença absoluta de 6858,5 Pa, com um aumento de 75,8% no ganho entre o desempenho mais baixo e o mais alto.

A vazão mássica representa a quantidade de ar que passa pelo duto da turbina. Essa quantidade de ar é responsável por movimentar as pás presentes no gerador escolhido para conversão de energia. Na Figura 6.12, é possível observar um aumento da vazão mássica até o caso 8, onde, após, ocorre uma diminuição assintótica da mesma, corroborando os resultados



apresentados por Gomes (2014), um dos referenciais teóricos. Esse comportamento pode ser explicado pela diminuição do fluxo de ar causado pela descontinuidade das geometrias estudadas. Assim, sabe-se que o maior fluxo de massa corresponde diretamente à maior potência hidropneumática encontrada.

A Figura 6.13 apresenta o gráfico da potência hidropneumática para cada um dos casos estudados. Como a potência e a vazão são diretamente proporcionais, há semelhança entre as tendências no comportamento dos indicadores de desempenho. A diferença entre os casos de maior e menor desempenho para os casos de fluxo de massa apresenta uma diferença absoluta de 65,7 kg/s e um ganho de 79,9% em relação ao caso de mais baixo desempenho.

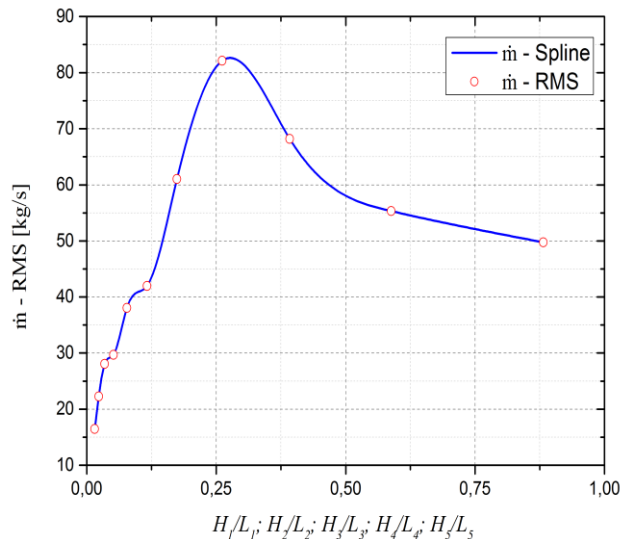


Figura 6.12 – Vazão mássica na turbina de um dispositivo com cinco câmaras acopladas.

O caso de maior potência hidropneumática disponível corresponde à potência máxima convertida em relação à incidência das ondas nos dispositivos acoplados. Assim, após atingir o ponto máximo de extração de energia, há uma diminuição do mesmo, pois devido aos mesmos efeitos geométricos explicados acima, ocorrem perdas de pressão e, conseqüentemente, de fluxo de massa e de potência. Também, pode-se justificar a diminuição aos efeitos da reflexão no interior das cinco câmaras.

Assim, o caso da maior potência hidropneumática apresentou a seguinte combinação de graus de liberdade:  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = H_3/L_3 = H_4/L_4 = H_5/L_5 = 0.2613$  ( $H_1 = \dots = H_5 = 4.13$  m e  $L_1 = \dots = L_5 = 15.82$ m),  $H_7/l_1 = H_8/l_2 = H_9/l_3 = H_{10}/l_4 = H_{11}/l_5 = 3$  ( $H_7 = \dots = H_{11} = 9.17$  m e  $l_1$

=...= 3.06 m), obtendo um total de 30815,7 W ou aproximadamente 30,8 kW de energia disponível.

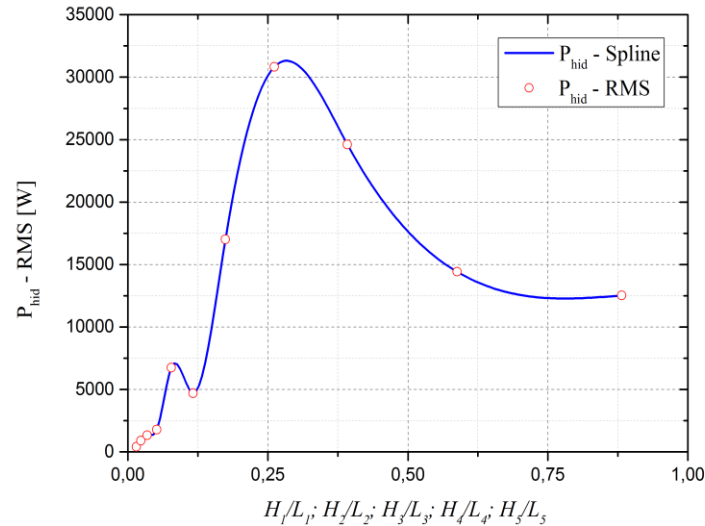


Figura 6.13 – Potência hidropneumática para um dispositivo com cinco câmaras acopladas.

O caso de desempenho mais baixo apresentou configurações iguais a:  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = H_3/L_3 = H_4/L_4 = H_5/L_5 = 0.0153$  ( $H_1 = \dots = H_5 = 1.0$  m e  $L_1 = \dots = L_5 = 65.4$ m),  $H_7/l_1 = H_8/l_2 = H_9/l_3 = H_{10}/l_4 = H_{11}/l_5 = 3$  ( $H_7 = \dots = H_{11} = 9.17$  m e  $l_1 = \dots = 3.06$  m), obtendo um total de 416,8 W de energia disponível.

Comparando os casos de desempenho mais alto e mais baixo, há um ganho de 30,3 kW, a diferença entre os casos representa um ganho de potência de 72,9 vezes em comparação com o caso de desempenho mais baixo.

Os resultados encontrados mostram que a variação geométrica de dispositivos do tipo CAO quando acoplados, apresenta uma grande variação na conversão de energia. A análise geométrica das estruturas proporciona a escolha da mesma que apresenta a maior potência disponível, pois sem as análises realizadas, existe o risco de se construir estruturas conversoras com tamanhos que não representem a potência máxima.

Outro aspecto que também pode ser evidenciado com os resultados obtidos é uma recomendação teórica para projetos de conversores do tipo CAO com até cinco câmaras acopladas, sendo  $H_1/L_1 = H_2/L_2 = H_3/L_3 = H_4/L_4 = H_5/L_5 = 16(H/\lambda)$ , este resultado é semelhante aos que já foram apresentados para dispositivos com menos câmaras acopladas.

## 6.6 Análise da Variação de Câmaras Acopladas em Dispositivos CAO

Com a conclusão das análises dos dispositivos variando de uma a cinco câmaras acopladas, se fez necessário o estudo da influência da inclusão das câmaras, verificando o aumento ou diminuição dos indicadores de performance, quando comparados todos os casos. A análise dos resultados ocorre explorando cada câmara individualmente e, assim, definindo os maiores valores para os indicadores de desempenho.

A Figura 6.14 mostra os valores de pressão RMS para os casos variando o número de câmaras acopladas (CC), onde cada linha representa cada um dos casos estudados. O aumento da pressão ocorre por dois motivos. A primeira é que com o aumento da altura das CA, há uma maior concentração de pressão em cada câmara, mesmo com o aumento do número de CA. O segundo motivo refere-se à geometria das câmaras. As câmaras com três dispositivos acoplados apresentam uma pressão maior do que as câmaras com quatro dispositivos em algumas configurações.

Esse comportamento se deve ao reflexo das ondas no interior das câmaras, tornando o movimento oscilatório mais descontínuo e aumentando o efeito pistão, consequentemente aumentando a pressão e a velocidade, causando recirculação no duto da turbina, como pode ser visto na Figura 6.15, com o detalhe de uma das câmaras e seu duto de turbina. O intervalo com valores de  $0,25 < H_n / L_n < 0,50$ , para os cinco casos analisados, apresenta em todos eles os seus maiores valores de pressão.

Entende-se que essas configurações geométricas dentro desta faixa proporcionam um aumento na pressão acumulada devido à diminuição do comprimento de entrada dos dispositivos e um aumento na altura. A simulação do movimento do pistão causado pela compressão e descompressão da câmara com maior trajetória vertical para movimentação mostra o crescimento da pressão interna em todas as câmaras, influenciando diretamente na potência hidropneumática.

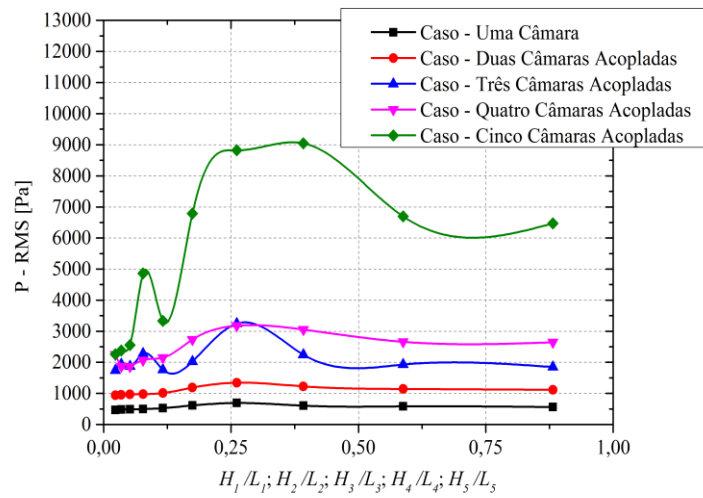


Figura 6.14 – Pressão acumulada em cada dispositivo acoplado.

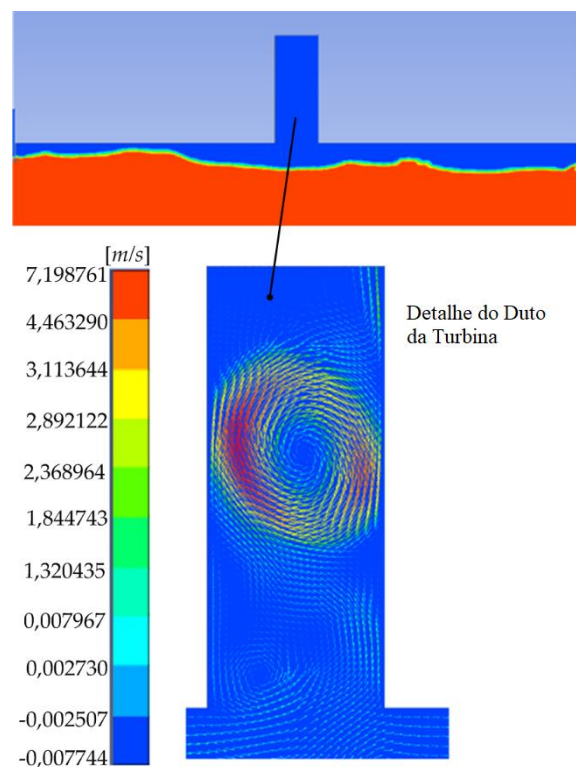


Figura 6.15 – Modelo de dispositivo com água (vermelho) e ar (azul) e recirculação de ar no duto da turbina em uma das câmaras do caso com cinco câmaras acopladas.

A Figura 6.16 mostra os maiores valores de pressão acumulada para cada caso estudado, lembrando que para cada configuração geométrica analisada, soma-se a pressão em cada câmara acoplada, sendo seu total a pressão acumulada. Nesta figura, é possível identificar que

dispositivos com apenas uma câmara apresentam valores de pressão menores que os demais e esse comportamento pode ser explicado pela baixa pressão acumulada que ocorre por possuírem uma única câmara.

Observe que dispositivos com três câmaras têm valores de pressão mais altos do que dispositivos com quatro câmaras, esse comportamento se deve ao efeito de pistão mais regular em dispositivos com três câmaras acopladas, para os casos ótimos. Dispositivos com cinco câmaras acopladas possuem o maior valor de pressão acumulada e os casos com maior desempenho em todas as geometrias analisadas também estão concentrados na mesma faixa de valores.

Percebe-se que dispositivos com maior número de câmaras acopladas apresentam maior pressão, parâmetro que implica diretamente no cálculo da potência hidropneumática, conforme pode ser observado na Equação (5.14). Além disso, há um padrão e tendência de aumento da pressão com o aumento das câmaras hidropneumáticas.

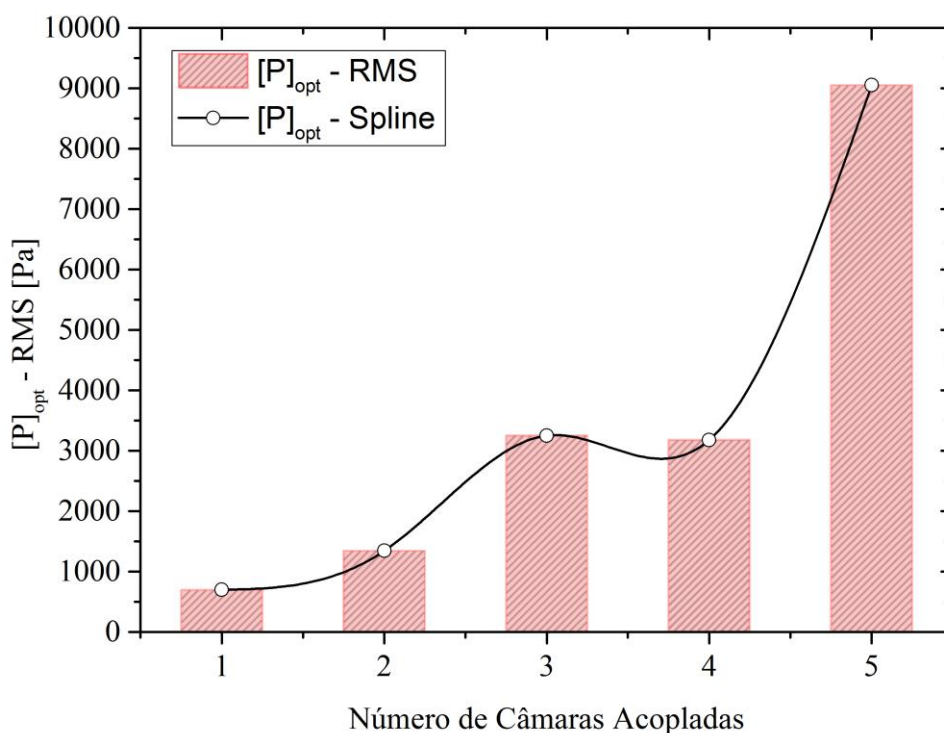


Figura 6.16 – Pressão dos casos de mais alto desempenho.

A vazão mássica é outro componente da equação de potência hidropneumática. Ela influencia diretamente no cálculo e, através do fluxo de ar que passa pelo duto da turbina,

ocorre a conversão de energia quando há uma turbina implantada. A Figura 6.17 mostra o comportamento da mesma para cinco estudos relacionados.

Como observado para pressão, os casos de maior desempenho estão dentro da mesma faixa de valores para os casos analisados ( $0.25 < Hn/Ln < 0.50$ ). A justificativa para essa conclusão está no processo de compressão e descompressão, que, assim como a pressão, ocorre com o aumento da altura das câmaras e diminuição da largura, mantendo o volume de entrada fixo.

Há um aumento gradual e uniforme em todos os casos, com um valor de pico para o indicador de desempenho no mesmo ponto de  $Hn/Ln$  em todas as análises. À medida que a razão aumenta, ou seja, a altura da câmara aumenta e o comprimento da câmara diminui, há um declínio nos valores da taxa de fluxo de massa. Esse comportamento é justificado pelo comprimento do duto em que está localizada a turbina do dispositivo, que permanece constante, pois mesmo com alta pressão, o fluxo de massa tende a diminuir.

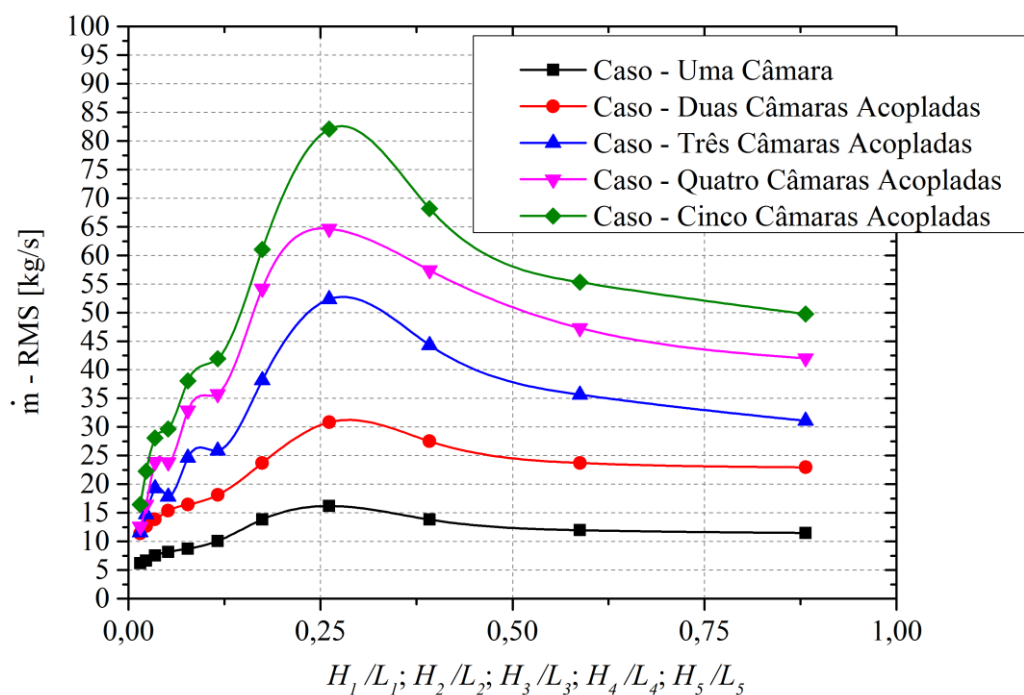


Figura 6.17 – Vazão mássica acumulada em cada dispositivo acoplado.

Assim, como na pressão, após a análise da média RMS das cinco configurações geométricas, são verificados os valores com maior vazão mássica e o desenvolvimento desses

valores é analisado com o aumento do número de câmaras acopladas, como visto na Figura 6.18.

Conforme o número de câmaras acopladas aumenta, a taxa de fluxo de massa também aumenta. A explicação para esse fenômeno é o maior número de efeitos de pistão nas câmaras hidropneumáticas e o aumento da vazão mássica. Em todos os casos, o comprimento e a altura do duto teriam os mesmos valores na turbina de conversão de energia.

A potência hidropneumática representa uma associação dos resultados obtidos com a vazão mássica e a pressão. A Figura 6.19 mostra a variação da potência hidropneumática acumulada para todos os casos estudados.

Com o aumento do número de dispositivos acoplados, ocorre um aumento da potência hidropneumática. Este fato pode ser explicado devido ao aumento da pressão e do fluxo de massa acumulado com o aumento do número de câmaras acopladas.

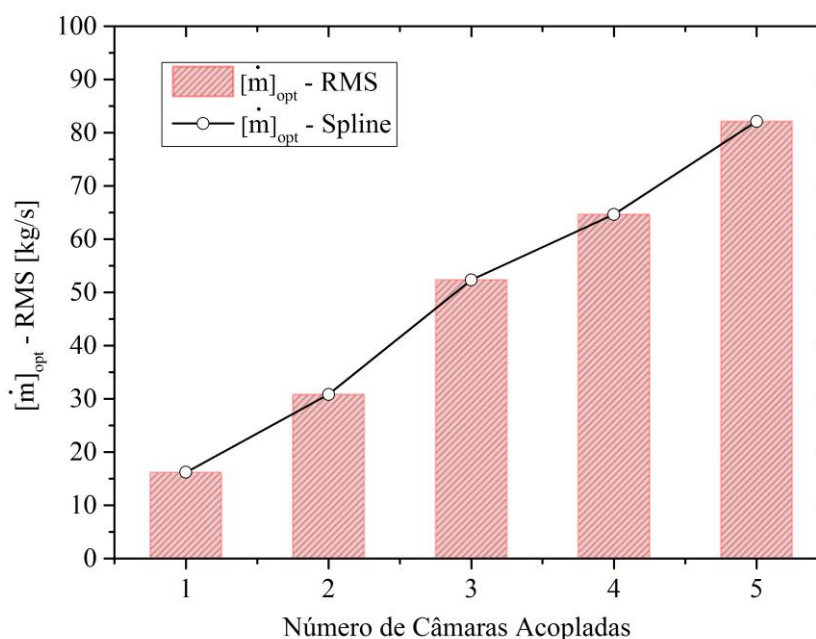


Figura 6.18 – Vazão mássica dos casos de melhor desempenho.

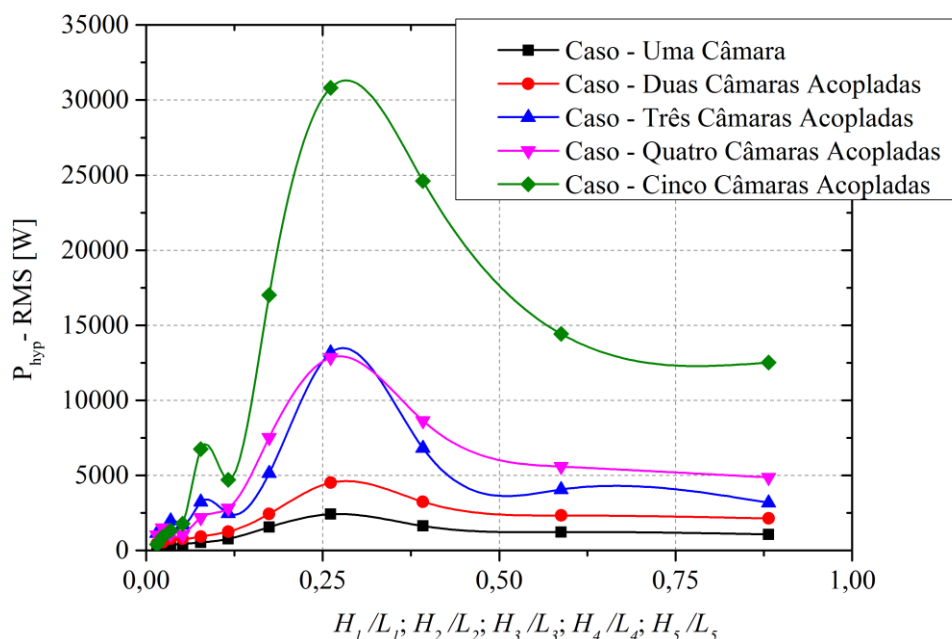


Figura 6.19 – Potência hidropneumática disponível acumulada em cada dispositivo acoplado.

Como nas demais grandezas analisadas, a potência hidropneumática disponível apresenta seus maiores valores em cada uma das configurações analisadas na faixa de  $0,25 < Hn/Ln < 0,50$ . O aumento da potência indica que mais energia está sendo convertida no dispositivo, portanto, com cinco câmaras acopladas, a potência hidropneumática máxima acumulada é maior do que nos demais casos.

A potência hidropneumática mostra um ponto máximo, mas depois começa a diminuir. Esse comportamento se deve à geometria da câmara hidropneumática. Com o aumento da câmara, quanto maior sua altura e menor seu comprimento, menor será a energia convertida.

A Figura 6.20 mostra os resultados da maior potência hidropneumática acumulada para todos os casos. Ao comparar os casos de três e quatro câmaras acopladas, é possível identificar uma ligeira diferença de potência entre eles. O dispositivo com três câmaras acopladas apresenta uma maior potência acumulada do que o dispositivo com quatro câmaras.



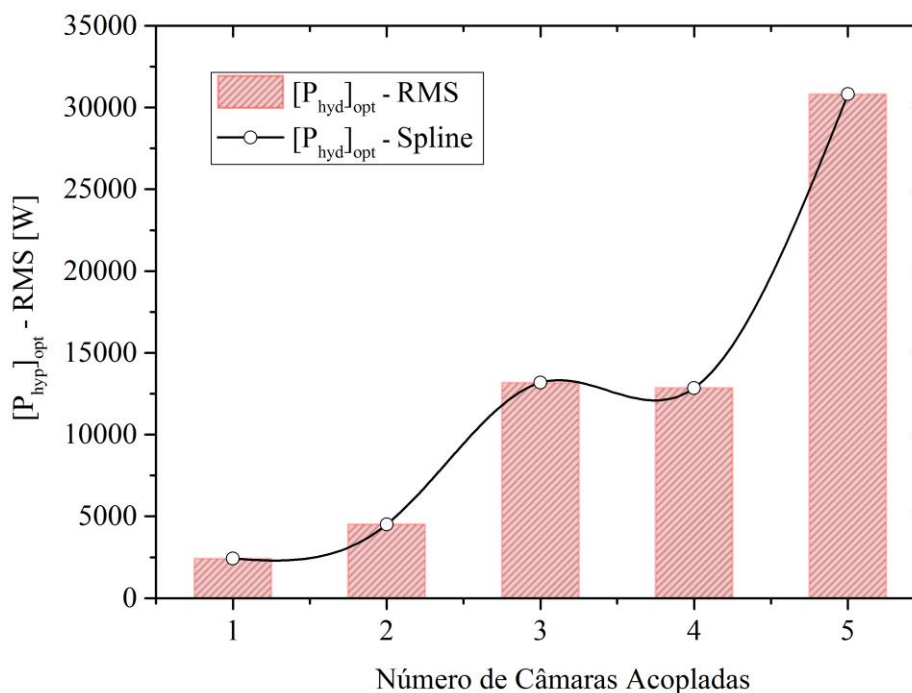


Figura 6.20 – Potência hidropneumática disponível nos casos de melhor desempenho.

Os resultados mostram que a adição de cinco dispositivos acoplados converte mais energia hidropneumática do que os demais com menos acoplamentos. A análise geométrica da estrutura determina a configuração que apresenta a potência hidropneumática máxima convertida para todos os casos analisados. É uma ferramenta útil em projetos de construção de dispositivos que convertam a energia das ondas do mar em função de suas grandes estruturas.

A utilização do método Design Construtal foi decisiva para a análise dos dados. A variação geométrica definida pelo método e a análise dos graus de liberdade e resultados do indicador de desempenho mostraram a potência máxima convertida.

O caso com o melhor desempenho dentro da faixa exibida, com cinco câmaras conectadas e com geometria com a relação  $Hn/Ln = 0,2613$  ( $Hn = 4,1335$  m e  $Ln = 15,8219$  m) apresentou uma potência de  $[P_{hyd}]_{opt} = 30,8$  kW. O caso de desempenho mais baixo tem uma câmara e a relação  $Hn/Ln = 0,2613$  ( $Hn = 4,1335$  m e  $Ln = 15,8219$  m) tendo uma potência de  $[P_{hyd}]_{opt} = 200$  W.

Outro aspecto que pode ser obtido por meio dos resultados apresentados é uma recomendação teórica utilizando os parâmetros altura e comprimento de onda referenciados na investigação numérica.

As configurações geométricas que apresentam a conversão máxima estão dentro da faixa  $16(H/\lambda) < Hn/Ln < 32(H/\lambda)$ , sendo esta a recomendação teórica para os casos de dispositivos acoplados, com base no intervalo para os casos que apresentam o maior desempenho em cada número de dispositivos acoplados ( $0.25 < Hn/Ln < 0.50$ ). Assim, a utilização do método de Design Constructal mostra-se muito útil para a análise de dispositivos com múltiplas câmaras acopladas e o aumento do número de câmaras acopladas mostra um ganho significativo de energia.

## 7 CONCLUSÕES

No presente trabalho é apresentada uma sequência de estudos relacionada a dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) com câmaras hidropneumáticas acopladas. Através de uma abordagem empregando-se o método Design Construtal, o intuito é aprimorar o desempenho do dispositivo conversor, maximizando a potência hidropneumática disponível para os casos estudados.

Para executar esse estudo foi realizada a análise de cinco dispositivos que variaram o número de câmaras acopladas, iniciando os estudos com somente uma e terminando com cinco. Todos os estudos trataram de um dispositivo CAO bidimensional.

Os graus de liberdade estudados neste trabalho foram:  $H_n/L_n$  (razão entre altura e largura das câmaras hidropneumáticas),  $H_2$  (altura da parede que divide duas câmaras acopladas) e  $e_2$  (espessura da parede que divide duas câmaras acopladas). Os graus de liberdade associados ao duto da turbina foram mantidos constantes, i.e.:  $H_n/l_j$  (razão entre altura e largura do duto da turbina) e  $H_{depth}$  (profundidade de submersão) possuem os valores de 3 m e 9,86 m, respectivamente. Foram avaliados os seguintes parâmetros do conversor: pressão, potência hidropneumática e vazão mássica.

Para a modelagem computacional foi utilizado o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) que é aplicado para representar a interação entre a água e o ar. A solução numérica é desenvolvida com o código de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), Ansys Fluent, baseado no Método de Volumes Finitos.

Um estudo de verificação e validação do modelo numérico também foi realizado. Leva-se em conta a incidência de ondas regulares em escala real com períodos de 7,5s e comprimento de onda incidente igual a 65,4 m.

Ao todo foram analisadas 77 configurações geométricas para se determinar qual apresenta um maior valor para o indicador de performance. Para os casos com câmaras acopladas foram considerados os valores totais dos indicadores de desempenho, isto é, somou-se os valores de cada câmara individualmente para compor o valor total.

Dentre todos os casos analisados buscou-se a geometria que apresentasse a maior potência hidropneumática disponível e, através dos dados da onda utilizada, buscar uma

recomendação teórica. Em relação à geometria, todos os resultados ótimos ficaram dentro do mesmo intervalo do grau de liberdade, isto é,  $0,25 < Hn/Ln < 0,50$ . Em função disso, podemos, também, determinar um intervalo teórico  $16(H/\lambda) < Hn/Ln < 32(H/\lambda)$ .

Quando se estuda somente a variação da parede que divide as câmaras acopladas e a espessura das mesmas, temos dois valores que apresentam a máxima conversão, estes valores são:  $H_2 = 4,1335$  m e  $e_2 = 2,215$  m. Como nos casos anteriores, também podemos associar os valores dos graus de liberdade a recomendações teóricas, i.e.:  $H_2 \approx (\lambda / 15)$  e  $e_2 \approx (11/5) H$ .

Os valores de geometria associados aos mais altos graus dos indicadores de performance foram determinados por:  $Hn/Ln = 0,2613$  ( $Hn = 4,1335$  m e  $Ln = 15,8219$  m) tendo uma potência de  $[P_{hyd}]_{máx} = 30,8$  kW,  $\dot{m} = 82,1$  kg/s e  $P = 8820,8$  Pa. Já o caso de mais baixo desempenho apresentou  $Hn/Ln = 0,2613$  ( $Hn = 4,1335$  m e  $Ln = 15,8219$  m) tendo uma potência de  $[P_{hyd}]_{máx} = 2,4$  kW,  $\dot{m} = 16,17$  kg/s e  $P = 695,8$  Pa.

Portanto, nota-se que o arranjo das geometrias empregando o método Design Construtal pode proporcionar a melhora do desempenho do dispositivo em que se emprega o método, assim obtendo uma recomendação teórica para uma possível construção dos dispositivos estudados, uma vez que o problema em questão trata de dispositivos em escala real. Além disso, as dimensões do dispositivo são relacionadas com o clima de ondas, para que o presente modelo computacional e o método Design Construtal possam ser empregados para fornecer informações teóricas na construção do protótipo CAO e, assim, aproveitar a máxima potência da energia das ondas, em qualquer local com um clima de ondas apropriado.

## 7.1 Proposta de Continuidade

Esta tese não abrange todas as possibilidades de estudos em relação a dispositivos com câmaras hidropneumáticas acopladas. Portanto, como forma de continuidade do trabalho desenvolvido até este momento, são propostos os seguintes estudos:

1. Realizar um estudo com mais câmaras acopladas até determinar o ponto onde ocorre um decréscimo da potência hidropneumática disponível e assim verificar o caso com maior conversão energética disponível e número de câmaras acopladas.
2. Reavaliar os graus de liberdade bidimensionais, mas com espectros de ondas: Pierson – Moskowitz e JONSWAP.

3. Realizar o estudo tridimensional de um dispositivo CAO, variando os graus de liberdade da câmara hidropneumática e da chaminé através de uma onda regular e espectro de ondas.
4. Comparar todos os resultados obtidos com ondas regulares e espectro de ondas para determinar a metodologia que mais converte potência hidropneumática.
5. Realizar um estudo tridimensional de um dispositivo CAO com dois dutos de turbina.
6. Utilizar também como restrição no estudo bidimensional a área da parede entre os dispositivos dada por  $A_p = H_2 e e_2$ .
7. Outro estudo bidimensional seria fixar a área a ser ocupada pelos dispositivos. Nesse caso, possivelmente, o dispositivo com uma câmara teria melhor desempenho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arslan, O. “Technoeconomic analysis of electricity generation from wind energy in Kutahya”, Turkey. **Energy**, v. 35, n. 1, p. 120-131, 2010.

Asif, M., & Muneer, T. (2007). Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 11(7), 1388-1413.

Astariz, S.; Iglesias, G. “The economics of wave energy: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**”, v. 45, p. 397-408, 2015.

Barbosa, D., Santos, E. D., Santos, A. L.G., Souza, J. A. “Overtopping device numerical study: Openfoam solution verification and evaluation of curved ramps performances”. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 131, p. 411-423, 2019.

Barreiro, T. G.; Gil, L. Energia das ondas marítimas: tecnologias e a experiência portuguesa, **Anais do Clube Militar Naval**, v. 138, p. 403-422, 2008.

Barreiro, T. Estudo da interacção de uma onda monocromática com um conversor de energia. Portugal. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.

Bejan, A, “Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume”, **Int. J. Heat Mass Transfer**, vol. 40, pp. 799–816, 1996.

Bejan, A., Shape and Structure, From Engineering to Nature. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.

Bejan, A., Lorente, S., Design with Constructal Theory. Wiley, Hoboken 2008.

Bejan, A., Zane J., Design in Nature. Doubleday, USA, 2012.

Bejan, A., Lorente, S. “Constructal Law of Design and Evolution: Physics, Biology, Technology, and Society”. *Journal of Applied Physics*. Vol. 113, pp. 151301-1 –151301-20, 2013.

Bieupoude, P., Azoumah, Y., Neveu, P., "Constructal Design of T-Shaped Water Distribution Networks". In *Constructal Law and the Unifying the Principle of Design* - Rocha, L. A. O., Lorent, S., Bejan, A. (Editors), Springer, New York, USA, 2013.

Biserni, C., Rocha, L.A.O., Stanescu, G., Lorenzini, E., “Constructal H-shaped Cavities According to Bejan’s Theory” *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol 50, pp.2132-38, 2007.

Blazek, J., “**Computational fluid dynamics: Principles and Applications**”, Elsevier, Reino Unido, 440 p, 2001.

Borgman, L. E., Chappellear, J. E. The Use of the Stokes-Struik approximation for waves of finite height. Proceedings 6<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference, p. 252-281, 1958.

Borthwick, A. “Marine renewable energy seascape”. **Engineering**, v. 2, n. 1, p. 69-78, 2016.

Bortoli, A. L., “**Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional**”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 136p, 2000.

Bouali, B., Larbi, S. “Contribution to the geometry optimization of an oscillating water column wave energy converter”. **Energy procedia**, v. 36, p. 565-573, 2013.

Cappiotti, L., Simonetti, I., Penchev, V., Penchev, P. “Laboratory test on an original wave energy converter combining oscillating water column and overtopping devices. Advanced in Renewable Energies Offshore. Londres. 2019.

Carneiro, M. L., “**Desenvolvimento de dispositivos de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaio de estruturas oceânicas**”, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 116 p., 2007.

CEM – Coastal Engineering Manual. U. S. Army Corps of Engineers, Eashington, D. C., 2002.

Chakrabarti, S. K., “**Handbook of offshore engineering**”, vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 661 p., 2005.

Chiavazzo, E., Isaia, M., Mammola, S., Lepore, E., Ventola, L., Pugno, N., Asinari, P., “Do spiders know thermodynamics?”. Constructal Law & Second Law Conference, Parma, Itália, 2015.

Clément, A., Wave energy in Europe: current status and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, p. 405-431, 2002.

Conde, J. M. P., Gato, L. M. C. Numerical Study of the air-flow in an Oscillating Water Column Wave Energy Converter. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 2637-2644, 2008.

Coppe, <<http://www.coppe.ufrj.br/>>; acessado: 13/07/2021.

Costa, A., Santos, E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., Gomes, M. N. “Simulação numérica de um espectro de ondas do tipo Pierson-Moskowitz”. VII SEMENGO – Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. Rio Grande, pp. 258-266. 2016.

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

Czech, B., & Bauer, P. Wave energy converter concepts: Design challenges and classification. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 6(2), 4-16. 2012.

Davyt D. **Análise Numérica de um Dispositivo de Extração de Energia das Ondas do Tipo Coluna de Água Oscilante Através de um Modelo Baseado nas Equações de Navier-Stokes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, Brasil, 2012.

De Brito, M. G. Simulação Numérica de Tomadas de Água. Lisboa, Portugal, 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010.

Dean, R. G., Dalrymple, R. A., “**Water wave mechanics for engineers and scientists**”, vol. 2, World Scientific, Singapura, 353 p., 1991.

Deus, M. J., Santos, E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., Gomes, M. G. “Análise numérica da profundidade de submersão de um dispositivo coluna de água oscilante submetido a incidência de um espectro de ondas do tipo pierson-moskowitz. VII SEMENGO. Rio Grande. 2018.

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

Drew, B., Plummer, A. R., & Sahinkaya, M. N.. A review of wave energy converter technology. 2009.

Duarte, C. R., “**Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leito de jorro**”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 196 p, 2006.

Dumont, G. B., Lima, Y. T. B., Gomes, M. N., Rocha, L.A.O., Dos Santos, E., Isoldi, L.A., “Geometric and Numerical Analysis of the Semicircular Transition Region Between the Hydropneumatic Chamber and the Chimney of an Oscillating Water Column Device Using Constructal Design”. 16<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT 2016), Vitória, ES, Brazil, 2016.

Dutra, R. F., Hirt, T. A. S., Zinani, F. S. F., Rocha, L. A. O. “Constructal design of an arterial diverting graft”. Proceeding of Constructal Law & Second Law Conference. Porto Alegre/RS. 2019

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



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

Espinel, M. F., Gomes, M das N, Rocha, L.A.O., Dos Santos, E., Isoldi, L.A., “Modelagem Computacional e Otimização da Conversão da Energia com Constructal Design de um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante”. XXXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE2014), Fortaleza, CE, Brazil, 2014b.

Espinel, M. F., Estudo Numérico Bidimensional com Aplicação de Constructal Design para a Otimização da Geometria e da Profundidade de Submersão de um Dispositivo Conversor das Ondas do Mar do Tipo Coluna de Água Oscilante, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Estefen, G. **Energia Renovável dos Oceanos**. Relatório IPCC & Atividades no Brasil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE UFRJ), 2012.

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

Ferziger, J. H., Peric, M., “**Computational Methods for Fluid Dynamics**”, Springer, Berlin, 423 p., 1997.

Fluent Inc., *FLUENT 17.0 Theory Guide*, 2016.

Fortuna, A. O. “**Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos – Conceitos Básicos e Aplicações**”, Edusp, São Paulo: Edusp, 426p, 2000.

Fox, R. W., McDonald, A. T., Protchard, P. J., “Introduction to Fluid Mechanics”, 6. ed., John Wiley & Sons, Estados Unidos, 802 p., 2004.

Fujita, R., Pelc, R. “Renewable energy from the ocean”. **Marine Policy**, v. 26, n. 6, p. 471-479, 2002

Gomes, M. das N., Olinto, C. R., Rocha, L. A. O., Souza, J. A., Isoldi, L. A., “Computational Modeling of a Regular Wave Tank”. Engenharia Térmica, Vol. 8, pp. 44-50, 2009.

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

Gomes, M. N., Santos, E. D. Dos, Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., “Análise de malhas para geração numérica de ondas em tanques”. In Proceedings VII Congresso nacional de Engenharia Mecânica (COBEM 2012), São Luiz, 2012a.

Gomes, M. N., Nascimento C. D., Bonafini, B. L., Dos Santos, E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., “Two-Dimensional Geometric Optimization of an Oscillating Water Column Converter in Laboratory Scale”. *ReTerm*, Vol. 11, pp. 30-36, 2012b.

Gomes, M. N., Dos Santos, E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., Two-Dimensional Geometric Optimization of an Oscillating Water Column Converter of Real Scale. 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), Ribeirão Preto, SP, Brazil, 2013a.

Gomes, M. N., Waess, K. R., Santos, E. D. Dos, Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., “Modelagem Computacional e Otimização Geométrica 2d com Constructal Design de um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante em Escala Real – Comparação Onshore e Offshore”. In *Proceedings of the XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, Pirenópolis, Goiás, Brasil, 2013b.

Gomes, M. das N. ***Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante***. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

Gomes, M. N., Bonafini, B. L., Cassel, L. F., Isoldi, L. A., Dos Santos, E. D., Rocha, L. A. Otimização Geométrica de um Dispositivo Conversor de Energia das Ondas do Mar do tipo Coluna de Água Oscilante na Forma Trapezoidal. XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering - CILAMCE, Rio de Janeiro, 2015.

Gomes, M. N., Deus, M. J., Santos, E. D., Isoldi, L. A., & Rocha, L. A. O.. The Choice of Geometric Constraints Value Applied in the Constructal Design for Oscillating Water Column Device. In *Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2017)*, Florianópolis. 2017.

Gomes, M. N., Lima, Y. T. B., Rocha, L. A. O., Santos, E. D., Isoldi, L. A. “Investigação numérica da descontinuidade geométrica entre a entrada e a saída de um conversor de energia das ondas do mar do tipo coluna de água oscilante”. VIII SEMENGO. Rio Grande, 2018.

Gomes, M. N., Oleinik, P. H., Marques, W. C., Isoldi, L. A., Santos, E. D., Rocha, L. A. O. “Constructal design for numerical evaluation of a rectangular shape oscillating water column devices subject to a jonswap wave spectrum”. *Proceeding of Constructal law & Second Law Conference*. Porto Alegre/RS. 2019

Gomes, M. D. N., Salvador, H., Magno, F., Rodrigues, A. A., Santos, E. D., Isoldi, L. A., & Rocha, L. A. O., Constructal Design Applied to Geometric Shapes Analysis of Wave Energy Converters. In: **Defect and Diffusion Forum**. Trans Tech Publications, Vol. 407, pp. 147-160, 2021

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

Grimmler, J., A. M. “**Conversor de energia das ondas em energia elétrica com dispositivo de coluna de água oscilante: simulação numérica e estudo geométrico**”. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Universidade Federal do Rio Grande, 2013.

Guimarães, R. C., Oleinik, P. H., de Paula Kirinus, E., Lopes, B. V., Trombetta, T. B., & Marques, W. C. “An overview of the Brazilian continental shelf wave energy potential”. *Regional Studies in Marine Science*, 25, 100446. 2019.

Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., Meerburg, A. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft 8-12*. (1973).

Heyer, M. “The constructal law, neurobiology and art”. Proceeding of Constructal law & Second Law Conference. Porto Alegre/RS. 2019.

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

Holthuijsen, L. H. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge Univ. 2007.

Horko, M. CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy converter. Austrália. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência), Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Western, 2007.

Hughes, S. A. *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. V. 7, World Scientific, Singapura, 550 p., 1993.

Iahnke, S. L. P. **Energia das Ondas: Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Universidade Federal de Rio Grande, 2010.

International Energy Agency IEA. <http://www.iea.org/topics/renewables/>, 2018.

Isoldi, L.A., Real, M.V., Correia, A.L.G., Vaz, J., Dos Santos, E.D., Rocha, L.A.O., “Flow of Stresses: Constructal Design of Perforated Plates Subjected to Tension or Buckling” In *Constructal Law and the Unifying the Principle of Design* - Rocha, L. A. O., Lorent, S., Bejan, A. (Editors), Springer, New York, USA, 2013.

Kempener, R.; Neumann, F. “Salinity gradient energy—technology brief”. **IRENA Ocean Energy Technology**, v. 4, 2014

Khaligh, A., & Onar, O. C. *Energy harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems*. CRC press. 2010.

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

Khare, V., Nema, S., & Baredar, P. “Solar–wind hybrid renewable energy system: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 23-33. 2016.

Khatib, H. IEA world energy outlook 2011—A comment. **Energy policy**, v. 48, p. 737-743, 2012.

Lagoun, M. S., Benalia, A., Benbouzid, M. H.. Ocean wave converters: State of the art and current status. In *2010 IEEE International Energy Conference* (pp. 636-641). IEEE. 2010.

Letzow, M., Lorenzini, G., Barbosa, D. V. E., Hübner, R. G., Rocha, L. A. O., Gomes, M. N., Isoldi, L. A., Dos Santos, E. D., “Numerical Analysis of the Influence of Geometry on a Large Scale Onshore Oscillating Water Column Device with Associated Seabed Ramp”, *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, Vol. 15, No. 6, pp. 873 – 884, 2020.

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

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

Lima, Y.T.B; Rocha, L.A.O; Isoldi, L.A.; Santos, E.D.; Gomes, M.N.,. “Investigação Numérica e Geométrica da Região de Transição Trapezoidal entre a Câmara Hidropneumática e a Chaminé de um Dispositivo Conversor de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante”. *Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, ABMEC, Brasília, DF, Brazil, 2016a.

Lima, Y.T.B; Rocha, L.A.O; Isoldi, L.A.; Santos, E.D.; Gomes, M.N.,. “Análise Numérica com Método Design Construtal da Região de Transição no Formato Trapezoidal Entre a Câmara Hidropneumática e a Chaminé de um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante”. *VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*, Rio Grande, RS, Brasil, 2016b.

Lima, Y.T.B; Rocha, L.A.O; Isoldi, L.A.; Santos, E.D.; Gomes, M.N.,. “Análise Numérica e Geométrica com Design Construtal da Região de Transição para um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante (CAO)”. *Anais da 7ª Conferência Sul em Modelagem Computacional (MCSUL)*, Rio Grande, RS, Brasil, 2016c.

Lima, Y. T. B., Rocha, L. A. O., Gomes, M. D. N., & Dos Santos, E. D. Aplicação do método design construtal na avaliação numérica da potência hidropneumática de um

dispositivo conversor de energia das ondas do mar do tipo coluna de água oscilante com região de transição trapezoidal. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 6(3), 2017.

Lima, Y. T. B., Gomes, M. N., Cardozo, C. F., Isoldi, L. A., Santos, E. D., Rocha, L. A. O. “Análise da variação geométrica de três graus de liberdade através do método design construtal para um dispositivo coluna de água oscilante com câmara hidropneumática dupla”. VIII SEMENGO. Rio Grande, 2018a.

Lima, Y. T. B., Rocha, L. A. O., Gomes, M. N., Santos, E. D., Isoldi, L. A. “Dispositivos coluna de água oscilante acoplados com volumes de entrada distintos: um estudo numérico da geometria usando design construtal”. XXI Encontro Nacional de Modelagem Computacional. Búzios, RJ. 2018b

Lima, Y. T. B., Gomes, M. N., Isoldi, L. A., Santos, E. D., Rocha, L. A. O. “The influence of four coupled devices in hydropneumatic power and geometrical analysis through constructal design”. Constructal Law & Second Law Conference. Porto Alegre. 2019.

Lima, Y. T. B., Gomes, M. N., Isoldi, L. A., Santos, E. D., Rocha, L. A. O., Analysis of Geometric Variation of Three Degrees of Freedom through the Constructal Design Method for a Oscillating Water Column Device with Double Hydropneumatic Chamber. In: **Defect and Diffusion Forum**. Trans Tech Publications, Vol. 396, pp. 22-31. 2019B

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

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

Liu, Z., Hyun, B., Hong, K., “Application of numerical wave tank to OWC air chamber for wave energy conversion”. International Offshore and Polar Engineering Conference, 2008a.

Liu, Z., Hyun, B., Hong, K., “Numerical Study of air chamber for oscillating water column wave energy convertor”. *China Ocean Eng.*, Vol. 25, 169-178, 2011.

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

Lorenzini, G., Correa, R. L., Santos, E. D., Rocha, L. A. O. “Constructal design of complex assemblies of fins”. *Journal of Heat Transfer*. Vol. 133, pp. 081902-1-081902-7. 2013.

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

Luo, Y. “Nonlinear 2D analysis of the efficiency of fixed oscillating water column wave energy converters”. **Renewable energy**, v. 64, p. 255-265, 2014.

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

Machado, B. N., **Estudo Numérico Tridimensional de um Dispositivo de Galgamento para Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica Aplicando o Método Constructal Design**, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

Magagna, D., & Uihlein, A. Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives. *International Journal of Marine Energy*, 11, 84-104. 2015.

Maliska, C. R., *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*, LTC-Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, Brasil, p. 453, 2004.

Marjani, A. E. et al., “3D unsteady flow simulation in an OWC wave converter plant”. In Proceedings of the International Conference on Renewable Energy and Power Quality, Majorca, Spain, 2006.

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

Martins, J. C., Goulart, M. M., Gomes, M. N., Souza, J. A., Rocha, L. A. O., Isoldi, L. A., Santos, E. D. “Geometric evaluation of the main operational principle of an overtopping wave energy converter by means of Constructal Design”. *Renewable Energy*, Vol. 118, pp 727 – 741, 2017.

Mavriplis, D. J.,. Unstructured Grid Techniques. *Annual Reviews Fluid Mechanics* , Vol. 29, pp: 473-514, 1997.

McCormick, M. E. *Ocean Engineering Wave Mechanics*. Canada: John Wiley & Sons Inc., 173 p., 1973.

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

Mofor, L., Goldsmith, J., & Jones, F. Ocean energy: Technology readiness, patents, deployment status and outlook. *Abu Dhabi*. 2014.

Mork, G., Barstow, S., Kabuth, A., & Pontes, M. T. (2010, January). Assessing the global wave energy potential. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (Vol. 49118, pp. 447-454).

Nazarpour, D. & Enferad, E.. Ocean's Renewable Power and Review of Technologies: Case Study Waves. In *New Developments in Renewable Energy*. IntechOpen. 2013.

Ning, D. et al. “An experimental investigation of hydrodynamics of a fixed OWC Wave Energy Converter”. **Applied energy**, v. 168, p. 636-648, 2016.

Ochi, M. K., Hubble, E. N. Six-parameter wave spectra. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(15). 1976.

Oliveira, L., Santos, I. F. S., Schimidt, N. L., Filho, G. L. T., Camacho, R. G. R., Barros, R. M., “Economic feasibility study of ocean wave electricity generation in Brazil”, **Renewable Energy**, vol 178, pp.1279 – 1290, 2021.

Pacheco, F., “Energias renováveis, breves conceitos. Conjuntura e Planejamentos”. SEI, Salvador, Brasil, n. 149, pp. 4-11. 2006.

Park, J.; Kim, M.; Mitaya, H. Fully non-linear free surface simulations by a 3D viscous numerical wave tank, *International Journal for Numerical Methods in Fluid*, vol 29, 685-703, 1999.

Patankar, S. V., Spalding, D. B.,”A calculation procedure for heat mass and momentum transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows”, **International Journal of heat and mass transfer**, vol 15, pp.1787-1806, 1972.

Patankar, S, V., “Numerical heat transfer and fluid flow”, McGraw-Hill, Estados Unidos, 1980.

Pelc, R., & Fujita, R. M.. Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, 26(6), 471-479. 2002.

Perić, R., & Abdel-Maksoud, M. Reliable damping of free-surface waves in numerical simulations. *Ship Technology Research*, 63(1), 1-13, 2016.

Pierson, W. J., Moskowitz, L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii. *Journal of geophysical research*, 69(24), 5181-5190. 1964.

Plamer, C. B., **Modelagem Computacional e Método Constructal Design Aplicados a um Conversor de Energia das Ondas do Mar do Tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) Analisando a Influência em seu Desempenho da Variação da Razão entre o Volume de Entrada e o Volume Total da Câmara Hidropneumática**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Rio Grande, 2016.

Razera, A. L., Dos Santos, E. D., Isoldi, L. A., Errera, M. R., Gunes, U., Rocha, L. A. O., “World constructal network of scientific publications, co-authorship and citations”. *Proceedings of Constructal law & Second Law Conference*. Porto Alegre/RS. 2019.

Raghunathan, S. The Wells air turbine for wave energy conversion. **Progress in Aerospace Sciences**, Elsevier, v. 31, p. 335-386, 1995.

Ramalhais, R. S. **Estudo Numérico de um Dispositivo de Conversão de Energia das Ondas do Tipo Coluna de Água Oscilante (CAO)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), FCT, Lisboa, 2011.

Rocha, L. A. O., Lorente, S., Bejan, A., *Constructal Law and the Unifying the Principle of Design*. Springer, New York, USA, 2013.

Rodrigues, L. “Modelagem computacional da propagação de espectro de ondas em tanques”. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional). Universidade Federal do Rio Grande. 2018.

Rodrigues, L., Santos, E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., Gomes, M. N. Análise da discretização temporal para a simulação numérica de um espectro de ondas do tipo Pierson–Moskowitz. **Revista Interdisciplinar De Pesquisa Em Engenharia**, v. 5, n. 1, p. 108-120, 2019.

Santika, W. G., Urmee, T., Simsek, Y., Bahri, P. A., & Anisuzzaman, M. (2020). An assessment of energy policy impacts on achieving Sustainable Development Goal 7 in Indonesia. *Energy for Sustainable Development*, 59, 33-48

Santos, K. G., “Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD com malhas tridimensionais”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 110 p, 2008.

Santos, E. D., Machado, B. N., Zanella, M. M., Gomes, M. N., Souza, J. A, Isoldi, L.A., Rocha, L. A., “Numerical Study of the Effect of the Relative Depth on the Overtopping Wave Energy Converters According to Constructal Design”, *Defect and Diffusion Forum*, vol. 348, pp. 232-244, 2014.

Save Pico Powerplant, <[www.save-pico-powerplant.org](http://www.save-pico-powerplant.org)>; acessado: 28/07/2015.

Seibt, F. M., Análise Numérica do Princípio de Funcionamento do Conversor de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Placa Submersa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), FURG, Rio Grande, 2014.

Seibt, F. M., Isoldi, L. A., Santos, E. D., Rocha, L. A. O. “Study of the effect of the relative height on the efficiency of a submerged horizontal plates type wave energy converter applying constructal design”. *Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil, 2017.

Shahbaz, M., Raghutla, C., Chittedi, K. R., Jiao, Z., & Vo, X. V. (2020). The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from the renewable energy country attractive index. *Energy*, 207, 118162.



Shayesteh, E., Yu, J., & Hilber, P. (2018). Maintenance optimization of power systems with renewable energy sources integrated. *Energy*, 149, 577-586.

Skjelbreia, L.; Hendrickson, J. Fifth Order Gravity Wave Theory, Proceedings 7th Conference Coastal Engineering, v.1, p. 184-196, 1961.

Sorensen, M. S. Basic Coastal Engineering. USA: Springer, 324 p, 2006.

Srinivasan, Salazar, A.J., Saito. K., Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. *Applied Mathematical Modeling*, vol. 35, n. 8, pp. 3710-3730, 2011.

Stokes, G. G., On the Theory of Oscillatory Waves. **Transactions of the Cambridge Philodophical Society**, v. 8, p. 441-455, 1847.

Teixeira, P. R. F., Davyt, D. P., Didier, E., Ramalhais, R., “Numerical simulation of an oscillating water column device using a code based on Navier-Stokes equation”. *Energy*, Vol. 61, pp. 513-530. 2013.

Thorpe, T. W., Wave Energy, In: 2004 Survey of Energy Resources. Elsevier Science, p. 401 – 417, 2004.

Tolmasquim, A. “Energia Renovável Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica”, Interciência (ed.), Rio de Janeiro, Brasil. 2016.

Tractebel, <[www.tractebelenergia.com.br](http://www.tractebelenergia.com.br)>; acessado: 28/07/2015.

Twidell, J., & Weir, T. *Renewable energy resources*. Routledge. 2015.

U, S, ARMY – Costal Engineering Research Center. Shore Protection Manual. Vol I, Books for Business, New York – Hong Kong, 445p., 1973.

Veigas, M., López, M., & Iglesias, G.. Assessing the optimal location for a shoreline wave energy converter. *Applied energy*, 132, 404-411. 2014.

Versteeg, H.K., Malalasekera, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Longman Scientific and Technical, 2007.

Watterson, J. K., & Raghunathan, S. (1996, August). Investigation of Wells turbine performance using 3-D CFD. In *IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference* (Vol. 3, pp. 1777-1782). IEEE.

Wavegen, <<http://www.pico-owc.netq>>; acessado: 28/07/2015.

Waveplane, <http://www.waveplane.com/>; acessado: 15/04/2019.

Zwart, P.; Godin, P.; PeManrose, J.; Rhee, S. Ship Hull Simulations with a Coupled Solution Algorithm, Proceedings of the 10 th International Symposium on Practical Designs of Ships and Others Floating Structures, Houston, Texas. 2007.

## APÊNDICE A – Trabalhos publicados

<i>Título</i>	<i>Evento/Periódico</i>	<i>Autores</i>	<i>Ano</i>
Geometric Analysis Through the Constructal Design of a Sea Wave Energy Converter With Several Coupled Hydropneumatic Chambers Considering the Oscillating Water Column Operating Principle	Applied Sciences	Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Mateus das Neves Gomes, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos, Giulio Lorenzini, Luiz Alberto Oliveira Rocha	2021
Investigação Numérica da Descontinuidade Geométrica entre a Entrada e a Saída de um Conversor de Energia das Ondas do Mar do Tipo Coluna de Água Oscilante.	Scientia Plena	Mateus das Neves Gomes, Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos	2019
Analysis of Geometric Variation of Three Degrees of Freedom Through the Constructal Design Method for a Oscillating Water Column Device with Double Hydropneumatic Chamber.	DDF (Defect and Diffusion Forum)	Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Camila Fernandes Cardozo Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos	2019
The influence of four devices coupled in hydropneumatic power and geometrical analysis through constructal design.	CLC (Constructal Law & Second Law Conference)	Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos	2019

<i>Título</i>	<i>Evento</i>	<i>Autores</i>	<i>Ano</i>
Investigação Numérica da Descontinuidade Geométrica entre a Entrada e a Saída de um Conversor de Energia das Ondas do Mar do Tipo Coluna de Água Oscilante.	VIII MCSul	Mateus das Neves Gomes, Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos	2018
Análise da Variação Geométrica de Três Graus de Liberdade Através do Método Design Construtal para um Dispositivo Coluna de Água Oscilante com Câmara Hidropneumática Dupla.	VIII SEMENGO	Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Camila Fernandes Cardozo Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos	2018
Dispositivos Coluna de Água Oscilante acoplados com Volumes de Entrada Distintos: Um Estudo Numérico da Geometria Usando Design Construtal.	XXI ENMC (Encontro Nacional de Modelagem Ccomputacional	Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos	2018
Numerical Evaluation of Hydropneumatic Power for Two Oscillating Water Column (OWC) Devices Coupled Using Constructal Design.	CILAMCE	Yuri Theodoro Barbosa de Lima, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Liércio André Isoldi, Elizaldo Domingues dos Santos	2017

## APÊNDICE B – Geometrias dos Dispositivos Estudados

Tabela B.1 – Variação geométrica de dispositivos com diversas câmaras acopladas.

Casos	$H_n/L_n$	$H_n$ [m]	$H_j$ [m]	$L_n$ [m]	$l_j$ [m]
1	0,0153	1,0000	9,1698	65,4000	3,0566
2	0,0229	1,2247	9,1698	53,3989	3,0566
3	0,0344	1,5000	9,1698	43,6000	3,0566
4	0,0516	1,8371	9,1698	35,5993	3,0566
5	0,0774	2,2500	9,1698	29,0667	3,0566
6	0,1161	2,7557	9,1698	23,7328	3,0566
7	0,1742	3,3750	9,1698	19,3778	3,0566
8	0,2613	4,1335	9,1698	15,8219	3,0566
9	0,3919	5,0625	9,1698	12,9185	3,0566
10	0,5878	6,2003	9,1698	10,5479	3,0566
11	0,8817	7,5938	9,1698	8,6123	3,0566

Tabela B.2 – Variação geométrica para o grau de liberdade  $H_2$ .

Casos	$H_1/L_1; H_3/L_2$	$H_2$ [m]	$H_7; H_8$ [m]	$L_1; L_2$ [m]	$l_1; l_2$ [m]
1	0,2613	0,0000	9,1698	15,8219	3,0566
2	0,2613	0,2419	9,1698	15,8219	3,0566
3	0,2613	0,3629	9,1698	15,8219	3,0566
4	0,2613	0,5443	9,1698	15,8219	3,0566
5	0,2613	0,8165	9,1698	15,8219	3,0566
6	0,2613	1,2247	9,1698	15,8219	3,0566
7	0,2613	1,8371	9,1698	15,8219	3,0566
8	0,2613	2,7557	9,1698	15,8219	3,0566
9	0,2613	4,1335	9,1698	15,8219	3,0566
10	0,2613	6,2003	9,1698	15,8219	3,0566
11	0,2613	9,3004	9,1698	15,8219	3,0566
12	0,2613	11,3906	9,1698	15,8219	3,0566

Tabela B.3 – Variação geométrica para o grau de liberdade  $e_2$ .

Casos	$H_1/L_1; H_3/L_2$	$e_2$ [m]	$H_2$ [m]	$H_7; H_8$ [m]	$L_1; L_2$ [m]	$l_1; l_2$ [m]
1	0,2613	0,1000	4,1335	9,1698	15,8219	3,0566
2	0,2613	0,3164	4,1335	9,1698	15,8219	3,0566
3	0,2613	0,9493	4,1335	9,1698	15,8219	3,0566
4	0,2613	1,2658	4,1335	9,1698	15,8219	3,0566
5	0,2613	1,5822	4,1335	9,1698	15,8219	3,0566
6	0,2613	1,8986	4,1335	9,1698	15,8219	3,0566
7	0,2613	2,2151	4,1335	9,1698	15,8219	3,0566
8	0,2613	2,5315	4,1335	9,1698	15,8219	3,0566
9	0,2613	2,8479	4,1335	9,1698	15,8219	3,0566
10	0,2613	3,7973	4,1335	9,1698	15,8219	3,0566

## APÊNDICE C – Resultados dos Dispositivos Estudados

Tabela C.1 – Resultados para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para o caso do dispositivo com uma câmara hidropneumática

Casos	$\dot{m}$ [kg/s]	P [Pa]	$P_{hid}$ [W]
1	6,2208	454,6154	257,9707
2	6,6454	472,7349	294,1129
3	7,5277	481,9799	372,7548
4	8,1897	489,8294	444,1604
5	8,7356	496,6090	528,7573
6	10,0908	529,4936	777,9216
7	13,8446	613,0487	1552,6008
8	16,1728	695,8339	2416,1572
9	13,8151	607,5629	1632,9111
10	11,9792	583,5690	1226,3325
11	11,4891	561,8559	1072,5522

Tabela C.2 – Resultados para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para o caso do dispositivo com duas câmaras acopladas.

Casos	$\dot{m}$ [kg/s]	P [Pa]	$P_{hid}$ [W]
1	11,4151	916,6425	446,7987
2	12,6658	941,1129	538,9617
3	13,8403	954,8314	776,8867
4	15,3957	972,2721	774,0575
5	16,4366	979,3336	924,7664
6	18,1354	1012,8776	1258,8074
7	23,7273	1188,2690	2438,0266
8	30,8126	1343,0331	4514,1351
9	27,5155	1226,3507	3249,5579
10	23,7265	1143,8375	2328,2011
11	23,1478	1360,4905	2933,3049

Tabela C.3 – Resultado para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para o grau de liberdade  $H_2$ .

Casos	$\dot{m}$ [kg/s]	P [Pa]	$P_{hid}$ [W]
1	24,0974	1207,7221	2337,7161
2	23,9530	1126,6398	2183,0063
3	23,9550	1170,6609	2300,1710
4	23,9727	1144,9967	2221,5882
5	23,9886	1137,1482	2131,0882
6	24,0323	1146,4939	2221,6753
7	24,2546	1133,9165	2273,7120
8	24,9026	1273,3069	2700,6009
9	30,9388	1534,0371	4955,6609
10	31,4660	1443,7784	4705,0249
11	28,8054	1478,7764	4747,8250
12	24,7595	1370,1912	4138,4101

Tabela C.4 – Resultado para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para o grau de liberdade  $e_2$ .

Casos	$\dot{m}$ [kg/s]	P [Pa]	$P_{hid}$ [W]
1	30,9699	1430,4914	4818,4809
2	31,3047	1433,3757	4835,1196
3	32,3025	1493,8901	5185,6949
4	32,7402	1511,7070	5354,5288
5	33,2067	1600,8451	5591,8327
6	33,2490	1515,0638	5472,7664
7	33,4869	1606,0433	5716,2086
8	33,4778	1538,7709	5542,8716
9	33,7265	1575,3614	5620,1803
10	30,8993	1539,1986	4929,5915



Tabela C.5 – Resultados para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para o caso do dispositivo com três câmaras acopladas.

Casos	$\dot{m}$ [kg/s]	P [Pa]	$P_{hid}$ [W]
1	11,5937	1723,3085	1141,7772
2	14,7283	1737,5331	1250,2007
3	19,3163	1934,4853	1980,7913
4	17,8545	1874,7647	1694,5357
5	24,6480	2282,0962	3121,7802
6	25,8796	1762,7390	2462,4017
7	38,1498	2027,3170	5137,1401
8	52,3397	3148,0842	13165,9807
9	44,3255	2246,0330	6816,0836
10	35,6565	1929,2132	4063,6424
11	31,0778	1847,3183	3178,1668

Tabela C.6 – Resultados para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para o caso do dispositivo com quatro câmaras acopladas.

Casos	$\dot{m}$ [kg/s]	P [Pa]	$P_{hid}$ [W]
1	12,5807	2108,1508	1022,7653
2	16,4202	2253,6755	1493,6081
3	23,8917	1874,7366	1095,4542
4	23,8311	1861,0767	1046,6126
5	32,9110	2071,8912	2179,5189
6	35,7577	2148,0890	2810,4781
7	54,2236	2731,6327	7521,6808
8	64,6503	3177,1144	12847,0572
9	57,4092	3052,0617	8647,4466
10	47,3036	2658,9063	5590,4226
11	42,0427	2644,8938	4868,4314

Tabela C.7 – Resultados para vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para o caso do dispositivo com cinco câmaras acopladas.

Casos	$\dot{m}$ [kg/s]	P [Pa]	$P_{hid}$ [W]
1	16,4658	2191,0142	416,7942
2	22,2433	2259,7285	896,1300
3	28,0633	2378,7092	1341,7517
4	29,6668	2558,5239	1776,1438
5	38,0522	4857,0251	6750,6147
6	41,9347	3332,7051	4703,5118
7	61,0432	6784,9656	17010,7276
8	82,1106	8820,8559	30815,7217
9	68,1899	9049,5421	24617,2238
10	55,3329	6694,0390	14426,9605
11	49,7656	6474,0304	12517,5821