

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

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

Por

Cândila Beatriz Plamer

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Modelagem Computacional

Rio Grande, março de 2016.

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

Por

Cândila Beatriz Plamer

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional
(PPGMC), da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Modelagem Computacional.

Área de concentração: Modelagem de Fluidos Geofísicos e Fenômenos de Transporte.

Orientador: Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes

Co-orientador: Prof. Dr. Liércio André Isoldi

Examinadores da banca:

Prof. Dr. Eduardo Costa Couto UFPEL

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos FURG

Prof. Dr. Wiliam Correa Marques FURG

Prof. Dr. Jeferson Avila Souza
Coordenador do PPGMC.

Rio Grande, março de 2016.

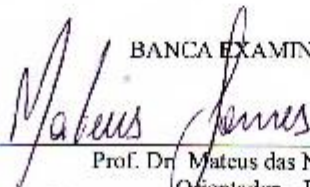
CÂNDILA BEATRIZ PLAMER

"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 volume de entrada e o volume total da câmara hidropneumática "

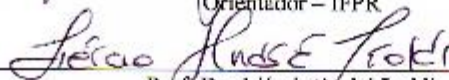
Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de concentração: Modelagem Computacional.

Aprovada em

BANCA EXAMINADORA



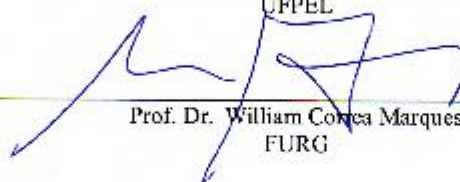
Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes
Orientador – IFPR



Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Co-orientador – FURG



Prof. Dr. Eduardo Costa Couto
UFPEL



Prof. Dr. William Correa Marques
FURG



Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
FURG

Rio Grande - RS
2016



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

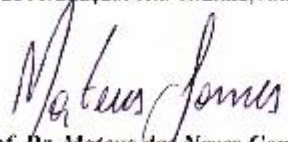
Av. Itália km 8 Campos Novos - CEP 96201-900 - Rio Grande/RS
E-mail: ppgmc@furg.br - Tel: (51) 3293 5955

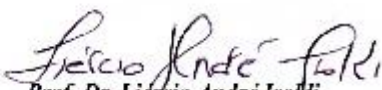


ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA Nº 03/2016

Ao vigésimo-quarto dia do mês de março, no Mini-Auditório da Escola de Engenharia, da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, realizou-se a terceira sessão de defesa de dissertação do ano de dois mil e dezesseis do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional. A mestranda **CÂNDILA BEATRIZ PLAMER** apresentou e defendeu a dissertação "**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 volume de entrada e o volume total da câmara hidropneumática**" como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional. A sessão foi aberta às nove horas pelo Prof. Mateus das Neves Gomes, do IFPR, orientador da dissertação e presidente da Comissão de Avaliação. A referida Comissão esteve integrada, além do presidente e orientador, pelo Prof. Liércio André Isoldi, da FURG co-orientador, pelo Prof. Elizaldo Domingues dos Santos, da FURG, pelo Prof. Eduardo Costa Couto, da UFPEL e pelo Prof. William Correa Marques, da FURG. Após cada integrante da Banca ter arguido a mestranda, e esta ter tido a oportunidade de responder a cada um, a Comissão reuniu-se para deliberar sobre o conceito a ser atribuído ao trabalho. A Comissão de Avaliação considerou a candidata **APROVADA**..... neste requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional. Por fim, o presidente publicou e encerrou a sessão da qual eu, Jeferson Avila Souza, na qualidade de Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, lavrei a presente ata que vai assinada por todos os membros da Comissão de Avaliação. Rio Grande, vinte e quatro de março de 2016.


Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes
Orientador


Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Co-orientador


Prof. Dr. William Correa Marques
Membro interno


Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Membro interno


Prof. Dr. Eduardo Costa Couto
Membro externo


Prof. Dr. Jeferson Avila Souza
Coordenador do Programa de Pós-graduação
em Modelagem Computacional

“Os mestres sábios, aqueles que ensinaram muitas pessoas a fazer o que é certo, brilharão como as estrelas do céu, com um brilho que nunca se apagará Dn. 12.3 (NTLH)”.

“Para ter sabedoria é preciso primeiro pagar o seu preço. Use tudo o que você tem para conseguir a compreensão. Ame a sabedoria, e ela o tornará importante; abrace-a e você será respeitado Pv. 4.7-8 (NTLH)”.

ORAÇÃO DE AGRADECIMENTO

SENHOR meu DEUS, quero aqui tentar expressar palavras de agradecimento a Ti.

Agradeço pelo dom da vida, e por me sustentares nas horas difíceis.

Agradeço por minha família, por meu filho Andrew Lews, por minha mãe Edi, meu pai Ilmar, meus irmãos André e Simone e por meus sobrinhos Ana Carolina e Nicolas.

Agradeço por me dar amigos verdadeiros e sinceros.

Agradeço por meus mestres, que em todas as fases de minha vida com sabedoria demonstraram carinho e dedicação na transmissão de conhecimentos.

Agradeço por meu orientador Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes, um exemplo profissional a ser seguido, pelo comprometimento na orientação deste trabalho, incentivo, compreensão e paciência.

Agradeço por meu co-orientador Prof. Dr. Liércio André Isoldi, por suas contribuições e sugestões para a concretização deste trabalho.

Agradeço pelos membros da banca, professores, Eduardo Costa Couto, Elizaldo Domingues dos Santos e William Correa Marques, pelo tempo dispensado e sugestões apresentadas a esta dissertação.

Agradeço pelo Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande pela oportunidade, pelo apoio e suporte prestado e a CAPES pelo financiamento dos estudos.

Agradeço pela oportunidade de concluir este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho trata de simular numericamente o princípio de funcionamento do conversor do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO), considerando uma onda regular em escala real. O objetivo é avaliar a influência da razão entre o volume de entrada da câmara hidropneumática (V_E) e o volume total da câmara (V_T) no desempenho de um conversor do tipo CAO. São analisados nove valores diferentes para a relação V_E/V_T . Através do Design Construtal é analisada a geometria que conduz ao melhor desempenho, buscando maximizar a conversão da energia das ondas regulares em energia elétrica, sendo a potência disponível, considerada a função objetivo do problema. Foi estudado o grau de liberdade razão entre a altura da câmara hidropneumática (H_1) e o comprimento da câmara (L). O domínio computacional é representado por um tanque de ondas, com o dispositivo CAO acoplado. O FLUENT foi empregado para a solução numérica das equações, baseada no Método dos Volumes Finitos (MVF). A construção da geometria e a geração da malha foram realizadas no GAMBIT. Na interação entre as fases ar e água foi aplicado o método *Volume of Fluid* (VOF). Os resultados obtidos sugerem que o desempenho do dispositivo CAO, é melhor quando o comprimento de entrada da câmara (L) é aproximadamente o comprimento da onda incidente (λ) dividido por 2,25 ($L = \lambda/2,25$); e a altura do dispositivo CAO (H_1) é cerca de 2,25 vezes a altura da onda (H), $H_1 = 2,25H$. Foi observado que ao alterar a relação entre os volumes de entrada e total do dispositivo CAO (V_E/V_T), a pressão aumenta e a vazão mássica não é influenciada pela variação dessa relação. Disso, conclui-se que, o que contribui na maximização da vazão mássica é a relação (H_1/L). E a pressão é influenciada pela razão V_E/V_T . A potência é uma composição do gradiente de pressão e da vazão mássica.

Palavras-chave: Coluna de Água Oscilante, Energia das Ondas regulares, Modelagem Computacional, *Volume of Fluid* (VOF), Design Construtal.

ABSTRACT

This work comes to numerically simulate the inverter working principle of the type Oscillating Water Column (OWC), considering a regular wave at full scale. The objective is to evaluate the influence of the ratio between the input volume of the hydropneumatic chamber (V_E) and the total volume of the chamber (V_T) on the performance of a OWC type converter. Nine different values for V_E / V_T ratio are analyzed. Through Design Constructal analyzes the geometry leading to better performance in order to maximize the conversion of the energy of regular waves into electrical energy, the power being available, considered the objective function of the problem. . He studied the degree of freedom ratio between the height of the hydropneumatic chamber (H_1) and the length of the chamber (L). The computational domain is represented by a wave tank, coupled with the OWC device. The FLUENT was used for the numerical solution of equations, based on the Finite Volume Method (MVF). The construction of geometry and meshing were performed in GAMBIT. In the interaction between the air and water phases was applied the method Volume of Fluid (VOF). The results suggest that OWC device performance is best when the input chamber length (L) is approximately the length of the incident wave (λ) divided by 2.25 ($L = \lambda / 2.25$); and the height of the OWC device (H_1) is about 2.25 times the wave height (H) $H_1 = 2.25H$. It was observed that by changing the relationship between the input volumes and total OWC device (V_E / V_T), the pressure increases and the mass flow is not influenced by variation of this relationship. From this, it follows that, which helps in maximizing the mass flow rate is the ratio (H_1/L). And the pressure is influenced by V_E/V_T . The power is a pressure gradient composition and mass flow.

Keywords: Oscillating Water Column, Power of Regular Waves, Computational modeling, Volume of Fluid (VOF), Constructal Design.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação	2
1.2	Justificativa	3
1.3	Estado da arte sobre dispositivos para conversão da energia das ondas regulares em energia elétrica.....	4
1.4	Objetivos.....	12
1.4.1	Objetivo geral.....	12
1.4.2	Objetivos específicos.....	13
1.5	Organização do trabalho	13
2	ENERGIA DAS ONDAS REGULARES E SUAS TECNOLOGIAS	15
2.1	Energia dos oceanos	17
2.2	Formação das ondas oceânicas	17
2.3	Transformação de energia das ondas em energia elétrica	19
2.4	Dispositivo Coluna de Água Oscilante (CAO).....	21
3	DESIGN CONSTRUTAL	25
3.1	Teoria Construtal	25
3.2	Aplicação do método Design Construtal em um conversor do tipo CAO.....	26
4	MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA.....	30
4.1	Elementos básicos de uma onda	31
4.2	Condições de contorno	33
4.3	Modelo <i>Volume of Fluid</i> (VOF)	34
4.4	Domínio computacional.....	37
4.5	Geração da malha	37
4.6	Modelagem numérica	39
4.7	Softwares GAMBIT E FLUENT.....	41
4.8	Métodos numéricos empregados	42
4.8.1	Método dos volumes finitos	42
4.8.2	Métodos de solução	43
4.8.3	Resolução de equações aplicando a discretização.....	44

4.8.3.1	<i>Upwind</i> de primeira ordem	44
4.8.4	O método <i>Geo-Reconstruction</i>	44
4.8.5	Acoplamento pressão-velocidade	46
4.8.5.1	O método SIMPLE	46
4.8.6	O avanço no tempo	47
5	VERIFICAÇÃO DO MODELO	48
5.1	Variáveis de interesse	48
5.1	Verificação do modelo computacional	50
6	RESULTADOS	55
6.1	Influência da razão entre o volume de entrada da câmara hidropneumática e o volume total do dispositivo CAO	55
7	CONCLUSÃO	74
8	REFERÊNCIAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Representação do domínio computacional com transição trapezoidal (Lima et al. 2015).....	11
Figura 1.2- Representação do domínio computacional com transição semicircular (Lima et al. 2015).....	11
Figura 1.3 - Representação do domínio computacional no formato trapezoidal (Gomes et al. 2015).....	12
Figura 2.1 - Tecnologias de conversores de energia das ondas (Adaptado de Goulart, 2014).....	16
Figura 2.2 - Os princípios de funcionamento dos conversores de energia das ondas (Adaptado de Callaway, 2007).....	16
Figura 2.3 - Condições necessárias para a formação de ondas do tipo swell (Trujillo e Thurman, 2011).....	18
Figura 2.4 - Distribuição da potência média da energia das ondas no globo terrestre em kW/m (<i>Centre for Renewable Energy Sources</i> , 2006).	21
Figura 2.5 - Dispositivo Coluna de Água Oscilante (Adaptado de Ghosh e Praelas, 2010).....	22
Figura 2.6 - Central da Ilha de Pico – Portugal (Cruz e Sarmiento, 2004).....	23
Figura 2.7 - Projeto da Câmara CAO do LIMPET (Wavegen, 2002).	24
Figura 3.1- Representação esquemática do domínio computacional 2D (Gomes, 2014).....	27
Figura 4.1- Esquema das etapas de simulação numérica de um conversor de energia das ondas regulares em energia elétrica (Adaptado de Gomes 2014).....	30
Figura 4.2 - Elementos da onda (Carneiro, 2007).	31
Figura 4.3 – Discretização do domínio (malha utilizada no presente trabalho).	38
Figura 4.4 - Malha definida por número de volumes por região.	39
Figura 4.5 - Interface do software GAMBIT com uma malha a ser exportada e vários ícones de comando indicados.	41
Figura 4.6 - Interface software FLUENT	42
Figura 4.7 - (a) Interface Real e (b) Interface Geo-Reconstruction. (Adaptado de Fluent 6.3 2006).....	45
Figura 5.1 – Representação do domínio computacional com as sondas de medição (Adaptado Gomes, 2014).	48

Figura 5.2 - Elevação da superfície livre para a sonda A em $x = 37,6$ m com passo de tempo $T/500$	52
Figura 5.3 - Elevação da superfície livre para a sonda B em $x = 73,2$ m com passo de tempo $T/500$	54
Figura 6.1 - Esquema representativo das variações geométricas testadas.....	56
Figura 6.2 - Potência Hidropneumática para todos os casos de V_E/V_T	58
Figura 6.3 - Potência Hidropneumática para todos os casos de V_E/V_T	59
Figura 6.4 - Potência Hidropneumática máxima em cada relação de V_E/V_T	60
Figura 6.5 - Valores mínimos para potência hidropneumática em $H_1/L = 0,0266$	61
Figura 6.6 - Valores médios (RMS) máximos e mínimos da potência hidropneumática.....	63
Figura 6.7 - Distribuição da velocidade na compressão e descompressão para $(H_1/L)_0 = 0,1346$ (caso ótimo).	65
Figura 6.8 - Distribuição da velocidade na compressão e descompressão para $H_1/L = 0,0266$ (pior caso).....	66
Figura 6.9 - Incidência de onda no conversor CAO no $t = 27$ s e $H_1/L = 0,1346$, melhor caso ...	68
Figura 6.10 - Incidência de onda no conversor CAO no $t = 30$ s em $H_1/L = 0,0266$, pior caso...	68
Figura 6.11 - Estudo da vazão mássica em H_1/L para as diferentes relações de V_E/V_T	68
Figura 6.12 - Comparação entre os casos ótimos e piores casos de vazão mássica em todos os casos V_E/V_T	69
Figura 6.13 - Vazão mássica de ar ao longo do tempo de 30 s do pior e melhor caso estudado..	70
Figura 6.14 - H_1/L para pressão em todas as relações de V_E/V_T	71
Figura 6.15 - Comparação entre o pior caso e o caso ótimo para pressão em cada V_E/V_T	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Condições para o mar totalmente desenvolvido para diferentes velocidades de vento e as características resultantes (Adaptado de Trujillo e Thurman, 2011).....	19
Tabela 5.1 Características do tanque de ondas e da câmara CAO.	51
Tabela 6.1 - Dimensões geométricas do dispositivo CAO.....	57
Tabela 6.2 - Comparação entre os resultados de vazão mássica e potência para cada relação V_E/V_T	62
Tabela 6.3 - Valores máximos e mínimos para o campo de velocidade do pior e melhor caso...	63
Tabela 6.4 - Pressão para os casos ótimos e os piores casos de cada V_E/V_T	73

LISTA DE ABREVIATURAS

CAO	Coluna de Água Oscilante
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacionais (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
EDP	Equação diferencial Parcial
IST	Instituto Superior Técnico
MVF	Método dos Volumes Finitos
<i>RMS</i>	<i>Root Mean Square</i>
<i>SIMPLE</i>	<i>Semi-Implicit Linked Equations</i>
<i>UDF</i>	<i>User Defined Function</i>
<i>VOF</i>	<i>Volume of Fluid</i>
<i>WFD</i>	<i>Wave Focusing Devices</i>

LISTA DE SIMBOLOS

A_i	Área de cada volume [m^2]
a	Amplitude da onda [m]
b	Variável da média RMS
C	Celeridade [m/s]
C_T	Comprimento do tanque de ondas [m]
E	Erro numérico
E_C	Energia cinética [J]
E_P	Energia potencial [J]
E_T	Energia total [J]
g	Aceleração gravitacional [m/s^2]
h	Profundidade de ondas bem definidas [m]
H	Altura da onda [m]
H_T	Altura do tanque de ondas [m]
H_1	Altura da câmara CAO [m]
H_2	Altura da chaminé da câmara CAO [m]
H_3	Profundidade de submersão da câmara CAO [m]
k	Número de onda [m^{-1}]
L	Comprimento da câmara CAO [m]
L_1	Largura da câmara CAO [m]
l	Diâmetro da chaminé de saída do dispositivo CAO [m]
$\dot{m}$	Vazão mássica [kg/s]
$\dot{m}_{qp}$	Transferência de massa da fase q para a fase p [kg/s]
$\dot{m}_{pq}$	Transferência de massa da fase p para a fase q [kg/s]
n	Número de volumes
P	Pressão [Pa]
P_d	Pressão dinâmica [Pa]
p_e	Pressão estática [Pa]
p_t	Pressão total [Pa]

$\hat{p}$	Pressão estimada [Pa]
$\hat{\hat{p}}$	Pressão corrigida [Pa]
P_{hid}	Potência hidropneumática [W]
r	Raio da região de transição semicircular [m]
S	Distância fixa entre o dispositivo e o fundo do reservatório [m]
$S_{\alpha q}$	Termo fonte da equação da continuidade
T	Período da onda [s]
t	Tempo [s]
u	Componente da velocidade na direção x [m/s]
Ur	Numero de Ursell [adimensional]
v_{ar}	Velocidade do ar [m/s]
V_E	Volume de entrada da câmara do dispositivo CAO [m ³]
V_C	Volume da chaminé do dispositivo CAO [m ³]
V_T	Volume total do dispositivo CAO [m ³]
y	Posição espacial direção vertical [m]
ω	Frequência da onda [Hz]
w	Componente da velocidade na direção z [m/s]
$\bar{X}$	Média aritmética RMS
x	Posição espacial na direção horizontal [m]
x'	Valor exato obtido na solução analítica
z	Variação da posição entre a superfície livre da água e o fundo do mar [m]

LETRAS GREGAS

α	Fração volumétrica
β	Ângulo da base do trapézio
$\alpha_{\text{água}}$	Fração volumétrica completa de água
α_{ar}	Fração volumétrica completa de ar
ε	Eficiência [%]
η	Elevação da superfície livre [m]
θ	Ângulo da superfície livre com a respectiva direção horizontal
λ	Comprimento da onda incidente [m]
μ	Viscosidade [kg/ms]
ρ	Massa específica do fluido [kg/m ³]
ϕ_i	Campo variável
ω	Frequência circular da onda [1/m]

Sub-índices

E_R	Erro relativo
x_n	Valor obtido pela solução numérica
$()_{máx}$	Máximo
$()_o$	Ótimo
$()_{o,o}$	Otimizado duas vezes

1 INTRODUÇÃO

O potencial energético dos oceanos está distribuído sob diferentes formas, das quais a energia das ondas se destaca por concentrar a maior parte deste recurso. A crescente demanda por produção de energia elétrica e a necessidade de preservação dos recursos naturais, tem impedido o desenvolvimento de tecnologias de conversão de baixo impacto ambiental (Cruz e Sarmiento, 2004).

Os oceanos cobrem mais de 70% da superfície da Terra, e as ondas de água são consideradas como fontes ilimitadas de energia renovável. O uso de combustíveis fósseis pode causar desafios indesejáveis, tais como, o aquecimento global e as mudanças climáticas na natureza. As vantagens de energia renovável incluem: baixo custo operacional, respeito pelo ambiente, procedimentos simples de manutenção, além de ser não poluente a natureza (Mahnamfar e Altunkaynak, 2015).

Para realizar a transformação de energia das ondas regulares em energia elétrica, existem diversos tipos de conversores com diferentes classificações. Os dispositivos podem ser classificados quanto ao seu local de instalação: dispositivos costeiros (*onshore*), em regiões com profundidades de até 20 m, e que são geralmente presos ao fundo; dispositivos próximos à costa (*nearshore*), situados em regiões com profundidades entre 20 e 50 m, podem ser presos ao fundo ou flutuantes; dispositivos afastados da costa (*offshore*), situados em regiões com profundidades maiores que 50 m, são geralmente flutuantes. A classificação dos conversores de energia das ondas quanto ao seu princípio de funcionamento pode ser: Coluna de Água Oscilante (CAO), Galgamento e Corpos Oscilantes (Cruz e Sarmiento, 2004).

Entre as diferentes tecnologias de conversão de energia das ondas regulares em energia elétrica, a que tem mais se destacado, em número de projetos, é a baseada no princípio CAO. Sendo assim, o presente trabalho apresenta um estudo numérico do princípio de funcionamento do dispositivo CAO. Para isso, é utilizado um modelo computacional bidimensional desenvolvido no software FLUENT, que é baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF), empregando o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), e que permite gerar ondas regulares em escala real que incidem sobre o dispositivo CAO. Para a

discretização do domínio computacional (geração da malha), que é composto pelo conversor CAO inserido em um tanque de ondas, foi utilizado o software GAMBIT.

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a influência da razão entre o volume de entrada da câmara hidropneumática e o volume total (V_E/V_T) no desempenho do dispositivo CAO. Para essa relação são analisados nove diferentes valores, e para cada valor da relação V_E/V_T , são testados dez valores diferentes para o grau de liberdade H_1/L , que é definido pela razão entre a altura (H_1) e o comprimento da câmara hidropneumática (L).

Através do emprego do Design Construtal busca-se definir a geometria ótima, isto é, a que conduz a maior potência hidropneumática para o dispositivo conversor de energia das ondas regulares em energia elétrica do tipo CAO.

1.1 Motivação

Considerando a necessidade global de obtenção de energia, e de que há metodologias com maior e outras com menor capacidade de transformação, muitas soluções são possíveis. Dessa forma, é possível propor combinações de soluções que melhor podem responder às demandas energéticas e as particularidades de cada região (Ngô, 2010).

Todas as fontes de energia têm suas vantagens e desvantagens, em termos de impactos ambientais e de custos. Por esse motivo, não há uma única solução idealizada. A melhor fonte de energia poderá ser a combinação de mais de um tipo, adequando-se aos recursos da região. Existe uma tendência das fontes de energia permanecer provindas das queimas de combustíveis fósseis, especialmente o petróleo. Atualmente, os combustíveis fósseis representam quase 90% da energia consumida em nível comercial e, em curto prazo, nada pode substituí-los quantitativamente ou economicamente (Echarri, 2009).

Possuindo um grande potencial energético ainda não explorado, os oceanos representam o maior de todos os recursos naturais, podendo contribuir de forma significativa para as necessidades crescentes de energia em nível mundial (Cruz e Sarmiento, 2004).

1.2 Justificativa

O mundo precisa de energia limpa e com baixo custo que permita o crescimento econômico sem prejudicar o meio ambiente. Nesta busca por fontes alternativas de energia, o Brasil apresenta um diferencial em relação a outros países, pois a sua biodiversidade, permite a transformação de energia por vários meios. Estas fontes alternativas de energia podem e devem ser utilizadas de forma sustentável, de maneira tal que resulte em um mínimo impacto ao meio ambiente. O desenvolvimento tecnológico tem permitido que, aos poucos, elas possam ser aproveitadas, quer como combustível alternativo quer na produção de calor e de eletricidade (Pacheco, 2006).

As fontes não-renováveis são finitas e esgotam-se. Muitos países já buscam soluções que primam pelos métodos de geração de recursos energéticos renováveis, por serem de baixo impacto ambiental (desenvolvimento sustentável). O mundo precisará de mais eletricidade para atender às novas necessidades, assim, será necessário melhor aproveitamento de energia, eficiência de conversão e transmissão, ou seja, uma melhor gestão dos sistemas de energia. (Ngô, 2010).

No planeta, encontram-se diversos tipos de fontes de energia. Que podem ser classificadas em dois grupos: renováveis e não renováveis. Por exemplo, a energia eólica (obtida através dos ventos) faz parte das fontes de energia renováveis. Por outro lado, os combustíveis fósseis (derivados do petróleo e do carvão mineral) são classificados como não renováveis (Echarri, 2009).

As fontes de energia renováveis, conhecidas como fontes alternativas de energia, verdes ou limpas, se renovam ilimitadamente de forma natural, não consomem um recurso finito como um combustível fóssil ou uma substância radioativa e, além disso, geralmente causam menos impactos ambientais negativos (Echarri, 2009).

A ampliação das fontes alternativas de energia seria uma condição necessária, ainda que não seja a única, para reduzir os impactos ambientais globais verificados nas últimas décadas, conforme tem sido discutido na totalidade dos eventos internacionais sobre o tema (Darzé, 2002).

Na atualidade o mundo vive um crescimento das fontes de transformação renováveis no setor de energia elétrica. A principal causa dos maciços investimentos em fontes

alternativas de energia é a necessidade de se garantir a segurança do suprimento sujeito às restrições impostas pela necessidade de se reduzir o aquecimento global (Dantas, 2009).

As fontes não renováveis de energia dependem dos recursos existentes no planeta, que são limitados e se extinguem com a sua utilização. E sendo esgotadas essas reservas que são finitas, as mesmas não podem ser regeneradas. As fontes não renováveis dividem-se em combustíveis fósseis e energia nuclear. Os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás) têm sido os grandes protagonistas do impulso industrial desde a invenção da máquina a vapor. Já a energia nuclear tem importante repercussão ambiental, uma vez que a indústria nuclear produz resíduos radioativos muito perigosos que duram milhares de anos, cujo armazenamento definitivo gera graves problemas ambientais (Echarri, 2009).

As matrizes energéticas, em predominância, fazem uso acentuado de combustíveis fósseis ou minerais, ou seja, não renováveis, como o petróleo, carvão, gás natural e urânio para produção de energia nuclear (Barbieri, 2007). Esse tipo de padrão de produção e consumo de energia tem gerado, ao longo da história, uma série de efeitos ambientais, como a emissão de poluentes locais e gases de efeitos estufa, colocando em risco a sustentabilidade ou suprimento de longo prazo do planeta (Goldemberg e Lucon, 2007).

1.3 Estado da arte sobre dispositivos para conversão da energia das ondas regulares em energia elétrica

Na busca de uma melhor geometria, aquela que conduz a maior potência hidropneumática para o dispositivo conversor de energia das ondas regulares em energia elétrica, aplica-se o Design Construtal .

A seguir são apresentados alguns estudos encontrados na literatura, sobre dispositivos para obtenção de energia das ondas regulares.

Em Ram et al. (2010), foi realizado um estudo sobre um canal de onda 2-D de um dispositivo fixo do tipo CAO. Para obter o máximo de energia cinética na seção da turbina a área da câmara de ar deve ser mínima. A turbina não foi instalada no dispositivo. Os experimentos foram realizados variando a profundidade da água e a frequência da onda. Foi verificado que as velocidades do ar na seção da turbina durante o movimento do fluxo de baixo para cima do nível de água na CAO, são sempre maiores do que durante o movimento

de cima para baixo. Enquanto o fluxo de ar era forte a maior parte do tempo, velocidades do ar muito baixas foram registradas. Durante a transição entre os fluxos dos níveis de água de baixo para cima e de cima para baixo, foi indicado a necessidade de um regulador de fluxo de ar antes da turbina para obter uma taxa de fluxo constante de ar. O fluxo bem dirigido é o mais adequado para turbina Savonius de seção transversal e retangular na câmara.

Em Machado et al. (2011) foi realizado um estudo numérico referente à otimização geométrica de um dispositivo de galgamento, considerando Design Construtal. A estrutura foi submetida a duas restrições: o volume total do tanque e a fração de volume ocupada pelo dispositivo. A razão entre o volume da rampa do dispositivo e o volume total do tanque foi mantida constante. Além disso, o problema apresentou outros parâmetros fixos de concepção, como a razão entre a altura e o comprimento de onda, também conhecida como a inclinação da onda. O objetivo foi maximizar a vazão mássica de água que passou pela rampa. Através do resultado desse estudo, foi obtida a inclinação da rampa que melhor aproveitou a energia da onda incidente. Os resultados mostraram que existe uma proporção intermediária ideal que maximiza a vazão mássica que passou pelo reservatório (objetivo). O galgamento não ocorreu para as relações extremas, comprovando a aplicabilidade do Design Construtal para a análise geométrica de problemas de conversão de energia das ondas regulares em energia elétrica através desse dispositivo.

Em Lopes et al. (2011), foi empregado o Design Construtal para a análise geométrica de um sistema de conversão de energia das ondas regulares em energia elétrica do tipo CAO, variando o grau de liberdade definido pela razão entre o comprimento do diâmetro da chaminé (l) e o comprimento da câmara CAO (L). Neste estudo foi adotada uma onda com características de laboratório. Foram mantidos constantes tanto o comprimento da câmara CAO (L) como a altura da câmara (H_l) e o diâmetro de saída da chaminé (l) foi variado, possibilitando a variação do grau de liberdade l/L . O resultado principal indica que a razão ótima foi obtida para $(l/L)_o = 0,6$. O objetivo principal foi maximizar a vazão mássica de ar na chaminé de saída do dispositivo CAO, sendo uma condição específica para este estudo.

Em Patel et al. (2012), foi estudado o efeito do ajuste da CAO usando bloqueio do duto da turbina para diferentes condições de onda. Foi investigado o comportamento e o desempenho do dispositivo CAO, empregando uma turbina Savonius que foi testada através da variação da abertura de saída do dispositivo CAO (0%, 25%, 50%, 75% e 100%). O

dispositivo CAO foi testado na profundidade de água de 0,29 m a frequências de 0,8; 0,9 e 1,0 Hz, enquanto as aberturas de saída são variadas. A pressão estática, a pressão dinâmica, a velocidade de rotação da turbina Savonius e a potência são apresentadas como resultados. O dispositivo CAO com abertura de saída de 25% apresentou maior desempenho em termos de velocidade de rotação, em comparação a abertura de saída dos demais dispositivos analisados. Isto prova a eficiência da CAO através do controle do fluxo na conduta de turbina.

Em Machado et al. (2012), foi realizado um estudo numérico buscando a otimização geométrica de um conversor de energia das ondas do tipo galgamento, para uma profundidade relativa $h/\lambda = 0,62$. Foi empregado Design Construtal para a geometria da rampa (relação entre a altura da rampa e comprimento: H_1/L_1). Ainda foi realizada a comparação da geometria ótima obtida aqui para $h/\lambda = 0,62$, com resultados anteriores da literatura $h/\lambda = 0,5$. O domínio computacional foi gerado no software GAMBIT e as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e a equação para o transporte de fração volumétrica foram resolvidas no código de CFD baseado no MVF, FLUENT. O modelo multifásico VOF foi aplicado para a solução da interface ar e água. Para a profundidade relativa de $h/\lambda = 0,62$, os resultados mostram uma dependência da massa de água que incide no reservatório para a geometria da rampa (razão de H_1/L_1), o que está de acordo com os estudos anteriores da literatura para profundidade relativa de $h/\lambda = 0,5$. No entanto, não há nenhuma forma universal que conduz ao melhor desempenho para várias ondas bem definidas. Por exemplo, para $h/\lambda = 0,5$ a forma otimizada para a rampa foi obtido para $(H_1/L_1)_o = 0,6$, enquanto que para $h/\lambda = 0,62$ este valor foi de $(H_1/L_1)_o = 0,4$.

Em Grimmer (2013), foi estudado um dispositivo do tipo CAO. Nesse estudo foram analisadas diferentes geometrias empregando um modelo computacional 2D e um 3D. Foram utilizados os softwares GAMBIT, na construção do domínio computacional, e FLUENT, que resolve as equações governantes através do MVF. Foi observado que a configuração geométrica da câmara hidropneumática influencia na absorção da energia das ondas e na vazão mássica de ar que sai pela chaminé do conversor CAO. Definido o grau de liberdade para determinar a razão entre o comprimento e a largura (Lx/Ly) da câmara hidropneumática, os resultados indicaram que a forma geométrica da câmara influencia na transformação da energia das ondas em energia elétrica. As geometrias das câmaras analisadas que apresentaram maior área da face de incidência das ondas (sendo altura constante)

apresentaram o maior desempenho do conversor CAO. A Teoria Construtal contribuiu na definição da melhor geometria nos casos estudados de dispositivos do tipo CAO.

Em Dos Santos et al. (2013), baseado nos estudos de Gomes (2010) e Lopes (2012), foi empregado Design Construtal, para otimização geométrica de um sistema de conversão de energia das ondas regulares em energia elétrica do tipo CAO. Foi variado o grau de liberdade l/L , razão entre o comprimento do diâmetro da chaminé (l) e o comprimento da câmara CAO (L), respectivamente. A onda adotada é de características de laboratório. O comprimento da câmara CAO (L) e a altura da câmara CAO (H_1), foi mantido constante e o diâmetro de saída da chaminé (l) foi variado. Assim variando o grau de liberdade l/L . O resultado indica que a razão ótima obtida foi $(l/L)_o = 0,6$. O objetivo foi maximizar o fluxo de massa de ar na chaminé de saída do dispositivo CAO.

Além disso, Dos Santos et al. (2013) realizou um estudo numérico referente à otimização geométrica de um dispositivo de galgamento *offshore* e em escala de laboratório empregando Design Construtal. A ideia básica foi semelhante ao estudo realizado em Iahnke (2010) e Machado (2012), contudo Dos Santos et al. (2013), estudou o volume total e a fração de volume da rampa foram definidas como restrições. A razão entre o volume da rampa do dispositivo e o volume total do tanque foi mantida constante. O problema apresentou outros parâmetros fixos referentes ao tipo de onda empregado, como por exemplo, a razão entre a altura e o comprimento de onda (declividade da onda), a relação entre a profundidade e comprimento de onda (profundidade relativa) e a relação entre a altura da onda e a profundidade (altura relativa da onda). Os resultados mostraram que havia uma razão ótima intermediária de $(H_1/L_1)_o = 0,6$, que maximizou a quantidade de massa que entrou no reservatório (objetivo). Além disso, o galgamento não ocorreu para as relações extremas. Para o caso estudado também foi observada uma razão ótima local para $H_1/L_1 = 1,0$.

Posteriormente Dos Santos et al. (2014), realizou um estudo numérico para determinar a otimização geométrica de um Conversor de Energia das Ondas, do tipo galgamento. O estudo foi realizado para algumas profundidades relativas: $h/\lambda = 0,3$; $0,5$ e $0,62$ empregando o método Design Construtal. O objetivo foi avaliar a influencia da profundidade relativa sobre a da geometria da rampa (relação entre a altura e o comprimento da rampa: H_1/L_1), e investigar a razão que conduz a uma maior quantidade de água ao reservatório. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e a equação para o transporte de fração

volumétrica foram resolvidas pelo MVF. O modelo multifásico VOF foi aplicado para a solução da interface ar e água. Os resultados indicaram que a forma ótima $(H_1/L_1)_o$ tem uma dependência da profundidade relativa, isto é, não há uma geometria universal que conduza ao melhor desempenho de um dispositivo de galgamento para diversas condições de ondas.

No trabalho de Letzow (2014), foi investigado através do método Design Construtal a influência da geometria de um dispositivo CAO onshore em escala real, e de uma rampa triangular localizada abaixo desse dispositivo. O uso dessa rampa tem o propósito de maximizar a potência na região da turbina do dispositivo. Considerando a área interna da câmara constante, variando sua largura e a altura, a área da rampa é mantida constante com uma inclinação variável ao fundo do dispositivo. Foram analisados os seguintes graus de liberdade: H_1/L_1 (razão entre altura e comprimento da câmara do dispositivo CAO), H_2/L_2 (razão entre a altura e o comprimento da rampa ao fundo do dispositivo) e H_3 (profundidade de submersão). Foi notado que os graus de liberdade (H_1/L_1 e H_2/L_2) tiveram influência sobre a potência disponível no dispositivo. A geometria ótima global foi obtida para $H_3 = 2,5$ m, $(H_1/L_1)_o = 0,4$ e $(H_2/L_2)_{o,o} = 0,8$ e a potência $P_{hid} = 331,57$ W. O uso do Design Construtal permitiu aumentar expressivamente o desempenho fluidodinâmico do dispositivo.

No trabalho de Gomes (2014), foi realizado um estudo numérico de análise e otimização geométrica através do Design Construtal, com a finalidade de um melhor aproveitamento na conversão de energia das ondas regulares em energia elétrica, de um dispositivo do tipo CAO. A metodologia Design Construtal, foi aplicada no estudo de dispositivos CAO em escala de laboratório e real. Para a onda em escala de laboratório foi variado os graus de liberdade H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara CAO), H_3 (profundidade de submersão do dispositivo CAO) e H_2/l (razão entre altura e comprimento da chaminé de saída da câmara CAO) é mantida constante. Para a onda de espectro real foi variado H_1/L , H_3 e H_2/l é mantida constante. Ainda foi variado o T (período), λ (comprimento de onda) e V_E/V_T (razão entre o volume de entrada e volume total do dispositivo CAO), mas é fixo para cada período. Para a solução numérica foi empregado o código comercial de dinâmica dos fluidos computacionais, FLUENT, baseado no MVF. No software GAMBIT foi construída a geometria e realizada a geração da malha. O domínio computacional é representado por um tanque de ondas com o dispositivo CAO acoplado. Os resultados obtidos para a onda em escala de laboratório mostram que é possível estabelecer uma razão de H_1/L

ótimos, conhecendo se uma onda bem definida, ou seja, o recomendável é que a razão seja igual a quatro vezes a altura da onda dividida pelo comprimento da onda incidente. Essas mesmas relações são satisfeitas para cada um dos períodos de onda analisados do espectro real.

Mahnamfar e Altunkaynak (2015) analisaram um dispositivo CAO e investigaram diferentes valores para altura da onda e período da onda. Neste estudo, 20 conjuntos experimentais foram realizados para um gerador do tipo pistão, os resultados experimentais mostraram que a geometria da câmara CAO, profundidade da água, e os parâmetros de onda são os fatores mais importantes em termos de alcançar potência máxima de onda para captação de energia.

Em Lara (2015), foi realizado estudo numérico bidimensional utilizando o método Design Construtal, para aperfeiçoar a performance de um dispositivo do tipo CAO, para obter a potência hidropneumática máxima. Foram estudadas as dimensões do dispositivo, sua profundidade de submersão para um comprimento de onda e período definidos. Três graus de liberdade são variados H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara do dispositivo CAO), H_2/L (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) e H_3 (profundidade de submersão do dispositivo CAO). Sendo restrições à área da câmara A_1 , e a área total do dispositivo CAO A_2 constantes. É observado que através do emprego do Design Construtal, é possível obter uma geometria de melhor ajuste no desempenho do dispositivo. A malha é gerada no software ANSYS ICEM, o código de dinâmica dos fluidos computacional ANSYS FLUENT é empregado na solução numérica a qual é baseada no MVF. Na interação das fases água-ar é usado o modelo multifásico VOF. Os resultados indicam que a potência hidropneumática máxima é de 190 W para razões de H_1/L , H_2/L e H_3 iguais a 0,135; 6,0 e 9,5 m respectivamente. E o menor valor obtido na potência hidropneumática é aproximadamente 11 W, o que mostra a utilidade do método Construtal para fornecer uma relação entre a onda bem definida de um lugar determinado e as dimensões ótimas do dispositivo CAO.

Em Goulart et al. (2015), foi realizado um estudo numérico e avaliado as geometrias que conduzem a um melhor desempenho fluidodinâmico de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real. Para tal análise foi utilizado o método Design Construtal. Foi considerado duas distâncias fixas entre o dispositivo e o fundo do reservatório $S = 5,0$ m e $S = 6,0$ m, e avaliado o grau de liberdade H_1/L_1 (razão entre a altura e comprimento da rampa) e

uma restrição geométrica (área ocupada pela rampa no tanque de ondas simulado). Em todos os casos estudados foi empregado altura da onda $H = 1,0$ m, comprimento da onda incidente $\lambda = 65,4$ m e período $T = 7,5$ s. O Método VOF foi empregado para o tratamento para interação entre as fases água e ar. No software FLUENT foi obtida a solução numérica das equações de conservação de massa e quantidade de movimento, através do MVF. Os resultados mostram que a quantidade de água máxima ao longo do tempo que entrou no reservatório, foi obtida para as menores razões de H_1/L_1 e que os piores desempenhos ocorreram para as maiores razões de H_1/L_1 . A mudança da submersão S pode melhorar a quantidade de água até cinco vezes para a mesma geometria da rampa.

Em Oh et al. (2015), foi analisado fatores que afetam a taxa de conversão de energia na CAO incluindo o volume de ar na câmara de ar, a pressão e o período da onda. Neste estudo, alterações na eficiência de absorção de energia na CAO foram medidas de acordo com a relação da área entre o descarregador de ar e da câmara de ar, bem como a base no comprimento da câmara de ar. As simulações são realizadas com diferentes parâmetros de design, como onda interna, pressão do ar e energia, de acordo com mudanças nas ondas externas. Além disso, o período da onda é modificado de acordo com o ambiente do mar em que o sistema CAO está instalado. Variações no período afetam a eficiência de conversão de energia. Portanto, as alterações na eficiência de absorção de energia, devido ao período da onda são simuladas no presente estudo para conceber um sistema de CAO com elevada eficiência de absorção, tendo em vista a característica de períodos de ondas na Coreia.

Em Lima et al. (2015), foi estudado dois tipos de forma geométrica trapezoidal Fig. 1.1 e semicircular Fig. 1.2 na região de transição entre a câmara CAO e a chaminé de um dispositivo conversor de energia das ondas regulares em energia elétrica do tipo CAO. Foi utilizado o método Design Construtal. O principal objetivo foi a obtenção de uma recomendação teórica sobre os valores do grau de liberdade α (ângulo formado pela parede da câmara CAO e a parede da chaminé da câmara CAO) e de r (raio da região de transição semicircular) que permitem obter valores de potência hidrodinâmica mais elevados para um dispositivo CAO, quando sujeito a incidência de ondas regulares e em escala real, sendo o período $T = 5$ s e o comprimento de onda $\lambda = 37,60$ m. Os resultados mostram que aumentando o ângulo α aumentam os valores para vazão mássica e pressão, consequentemente os valores da potência hidropneumática e a eficiência são mais elevados.

Quando $\alpha = 10^\circ$ a eficiência é igual à $\varepsilon = 32,83\%$ ao passo que quando $\alpha = 70^\circ$ a eficiência é igual à $\varepsilon = 41,46\%$. Para o caso de transição semicircular o aumento do r também produziu o aumento vazão mássica e da pressão. Um aumento de 0,50 m no raio ocasionou um aumento de cerca de 25% na eficiência. A aplicabilidade do método Design Construtal para a otimização geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas foi evidenciada, uma vez que os resultados indicam um melhor desempenho do dispositivo.

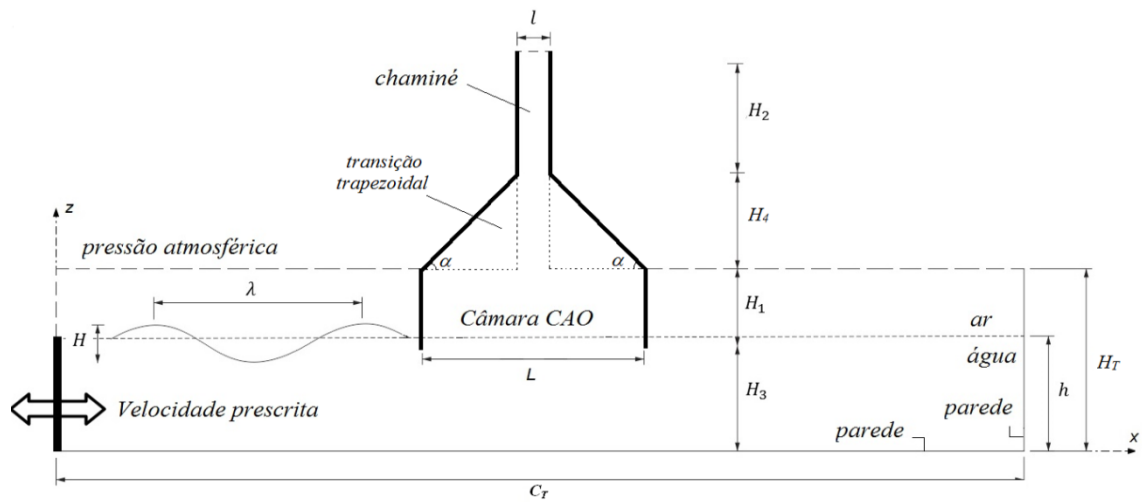


Figura 1.1 - Representação do domínio computacional com transição trapezoidal (Lima et al. 2015).

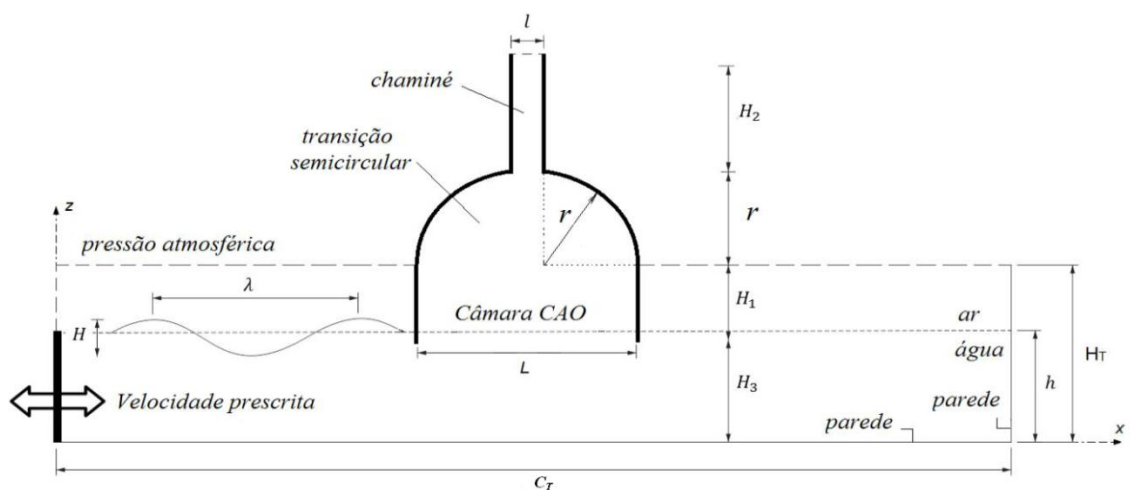


Figura 1.2- Representação do domínio computacional com transição semicircular (Lima et al. 2015).

Em Gomes et al. (2015), foi realizado um estudo numérico bidimensional sobre uma geometria na forma trapezoidal Fig. 1.3 de um dispositivo conversor de energia das ondas regulares em energia elétrica, cujo princípio de funcionamento é o CAO. Foi empregado Design Construtal na análise do grau de liberdade β , (ângulo formado pela parede frontal do dispositivo CAO com a superfície livre – ângulo da base do trapézio), o grau de liberdade H_2/l (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) é mantido constante. Na solução numérica foi empregado o código de dinâmica dos fluidos computacionais FLUENT, baseado no MVF e o modelo multifásico VOF é aplicado no tratamento ar-água. Os resultados mostram que o valor máximo *Root Mean Square* (RMS) para a potência hidropneumática para o caso de uma câmara CAO (considerando a restrição elíptica) é para $\beta_o = 30^\circ$ e a geometria ótima é $(H_1/L)_o = 0,24$. A aplicabilidade do Design Construtal ficou evidente para um melhor desempenho do dispositivo CAO.

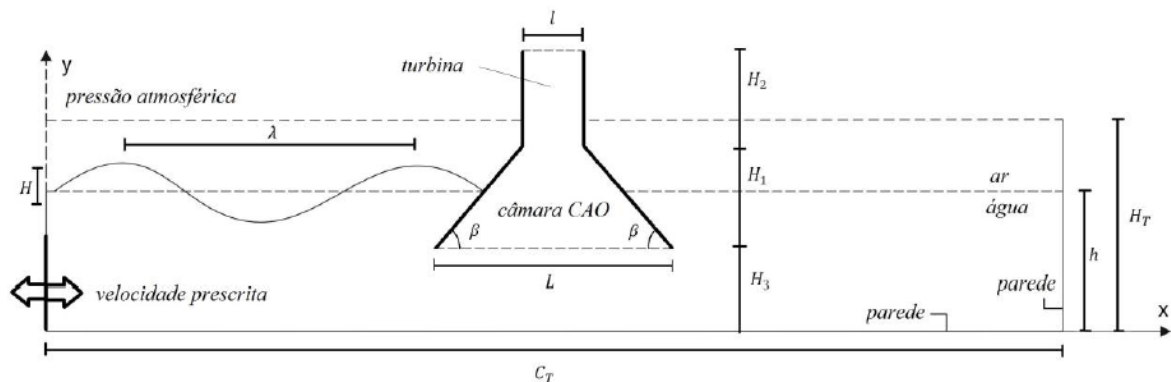


Figura 1.3 - Representação do domínio computacional no formato trapezoidal (Gomes et al. 2015)

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é através da modelagem computacional atrelada ao método Design Construtal simular numericamente o princípio de funcionamento do conversor tipo CAO, permitindo avaliar a influência da relação entre o volume de entrada da

câmara hidropneumática (V_E) e o volume total do dispositivo CAO (V_T), visando maximizar a conversão de energia das ondas regulares em energia elétrica.

1.4.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral dessa proposta, os seguintes objetivos específicos são considerados:

- Simular numericamente o princípio de funcionamento do conversor tipo CAO, considerando uma onda regular em escala real;
- Aplicar o método Design Construtal, para avaliar a influência da geometria do dispositivo CAO em seu desempenho, e através do método de busca exaustiva identificar o caso ótimo.
- Avaliar a influência da relação entre o volume de entrada da câmara hidropneumática (V_E) e o volume total do dispositivo CAO (V_T), V_E/V_T ; no desempenho do dispositivo CAO;
- Avaliar diferentes valores para o grau de liberdade H_1/L , (razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática), e avaliar o efeito dessa razão sobre a potência disponível do dispositivo ao longo do tempo para $H_3 = 9,5$ m;

1.5 Organização do trabalho

O trabalho está organizado em 8 capítulos:

Capítulo 1: Introdução.

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre as fontes de energia, o estado da arte, bem como os objetivos: geral e específicos.

Capítulo 2: Energia das ondas regulares e suas tecnologias.

O capítulo consiste em uma revisão bibliográfica sobre transformação de energia das ondas, energia oceânica e formação de ondas, o princípio básico de funcionamento do

dispositivo CAO e ainda aborda a classificação dos sistemas de conversão de energia das ondas, e o princípio de funcionamento.

Capítulo 3: Design Construtal.

Este capítulo aborda tópicos referentes à teoria Construtal, que fundamenta a metodologia Design Construtal. E trata da aplicação do método Design Construtal em um conversor do tipo CAO.

Capítulo 4: Modelo matemático e numérico.

Neste capítulo é apresentada a modelagem matemática e numérica do problema, os principais elementos de uma onda, e as equações utilizadas para a geração da onda, as etapas da simulação numérica, o MVF, o modelo VOF e os métodos numéricos empregados para a resolução das equações de conservação envolvidas no problema.

Capítulo 5: Verificação do modelo.

Este capítulo aborda as variáveis de interesse (sondas de medição) do problema, e as expressões para o cálculo de potência hidropneumática. E a verificação da geração da onda.

Capítulo 6: Resultados.

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta pesquisa.

Capítulo 7: Conclusão.

Apresenta a conclusão do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 8: Referências.

Apresenta as referências bibliográficas utilizadas nesse trabalho.

2 ENERGIA DAS ONDAS REGULARES E SUAS TECNOLOGIAS

Existe uma variedade de tecnologias de conversão de energia das ondas regulares, em energia elétrica. O que diferencia os dispositivos é: i) a profundidade de água no local; ii) sua localização e iii) o método de transformação de energia. Os dispositivos podem ser classificados de acordo com o seu princípio de funcionamento, como (Cruz e Sarmento, 2004):

- Coluna de Água Oscilante (CAO): trata-se de uma estrutura parcialmente submersa, em que a passagem das cristas e cavas das ondas provoca, respectivamente, aumento e diminuição do nível da água em seu interior. Consequentemente, há uma compressão e uma descompressão do ar que se encontra dentro desse compartimento. Esse ar passa por uma turbina que aciona um gerador, produzindo a eletricidade. Em relação à turbina, é recomendável que a mesma possua a propriedade de manter o sentido de rotação independente do sentido do escoamento, como é o caso das turbinas do tipo Wells.

- Corpos Oscilantes (Oscillating Devices): podendo ser de absorção pontual (*point absorbers*) ou progressivos (*surging devices*): são dispositivos em que a passagem da onda provoca oscilações, sendo a energia extraída desse movimento. Na absorção pontual, o flutuador se move verticalmente ou em torno de um eixo relativamente a uma estrutura fixa ao fundo. Enquanto nos progressivos, os componentes se movem relativamente sobre sua própria estrutura quando a onda passa. Os corpos submersos podem aproveitar o movimento da translação ou rotação da estrutura. O movimento oscilatório do conversor impulsiona sistemas hidráulicos que acionam um gerador, produzindo então eletricidade.

- Galgamento (Overtopping Devices): as ondas que passam pela estrutura fixa são encaminhadas, através de rampas, para um reservatório que se encontra em um nível acima do mar. A água armazenada retorna ao oceano após passar por turbinas, semelhantes às utilizadas em hidrelétricas de baixa queda, acionando um gerador e assim produzindo energia elétrica.

Na Figura 2.1, é possível observar esquematicamente, a classificação dos conversores de energia das ondas regulares, conforme o princípio físico de funcionamento.

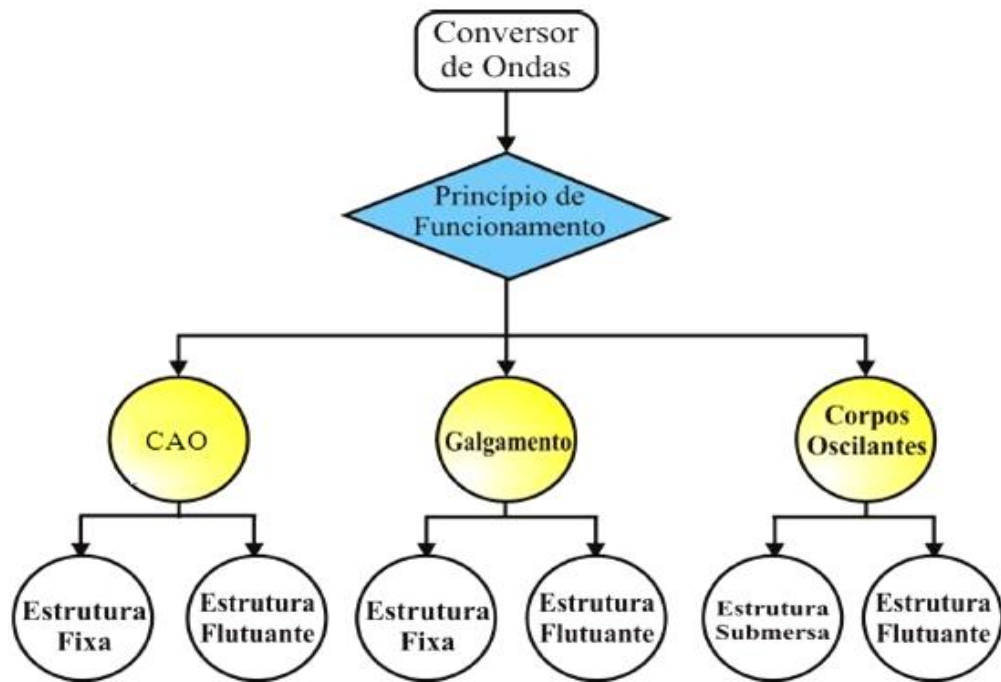


Figura 2.1 - Tecnologias de conversores de energia das ondas (Adaptado de Goulart, 2014).

Os princípios de funcionamento dos conversores de energia das ondas estão representados na Fig. 2.2. No entanto, estas classificações não consideram todas as possibilidades existentes de converter a energia das ondas em energia elétrica. O conversor do tipo placa submersa, por exemplo, é outro princípio de funcionamento que pode ser usado, e que não está incluído nas classificações apresentadas.

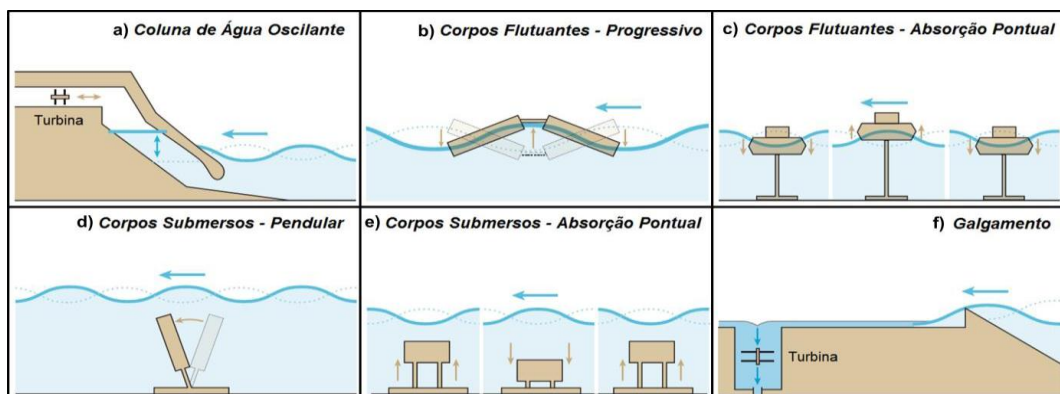


Figura 2.2 - Os princípios de funcionamento dos conversores de energia das ondas (Adaptado de Callaway, 2007).

2.1 Energia dos oceanos

A crise do petróleo em 1973 desencadeou mudanças significativas no cenário das fontes alternativas de energia, dentre elas o interesse na exploração em larga escala da energia das ondas regulares (Falcão, 2010).

O mar pode ser fonte de energia elétrica, a partir de ondas, correntes de maré, ventos, gradientes horizontais de salinidade e gradientes verticais de temperatura. O mais estável e previsível dos processos oceanográficos com potencial para extração de energia elétrica é a circulação diária das marés (Souza, 2011).

A energia disponível nos oceanos pode ter origens diferentes, o que origina diferentes classificações. As mais relevantes são sem dúvida: a energia das marés, fruto da interação dos campos gravíticos da lua e do sol, a energia térmica dos oceanos, consequência direta da radiação solar incidente, a energia das correntes marítimas, cuja origem está nos gradientes de temperatura e salinidade e na ação das marés e, finalmente, a energia das ondas, que resulta do efeito do vento na superfície do oceano (Pontes, 2001).

As tecnologias de energia oceânica, com exceção de barragens de maré, ainda estão em estágio pré-comercial de desenvolvimento, seja na fase de pesquisa e desenvolvimento, ou no desenvolvimento de protótipos e estágio de demonstração (Lewis et al., 2011).

2.2 Formação das ondas oceânicas

Nos oceanos as ondas superficiais são geradas pela interação dos ventos com a superfície. Ao soprarem paralelos à superfície, os ventos transferem energia cinética para o mar e uma parte desta energia acaba por gerar as ondas. A quantidade de energia transferida do vento para a superfície do mar vai depender: i) da intensidade do vento; ii) do tempo de atuação deste vento e iii) da pista, ou seja, da área sobre a qual está atuando a tempestade, como mostra a Fig. 2.3. Sendo assim, quanto maior a velocidade, o tempo e a pista, maior será a onda resultante. No entanto, para cada situação existem dimensões máximas que a onda pode atingir, ou seja, as ondas não crescem indefinidamente (Trujillo e Thurman, 2011). A esta situação dá-se o nome de estado de mar totalmente desenvolvido, vide Tab. 2.1.

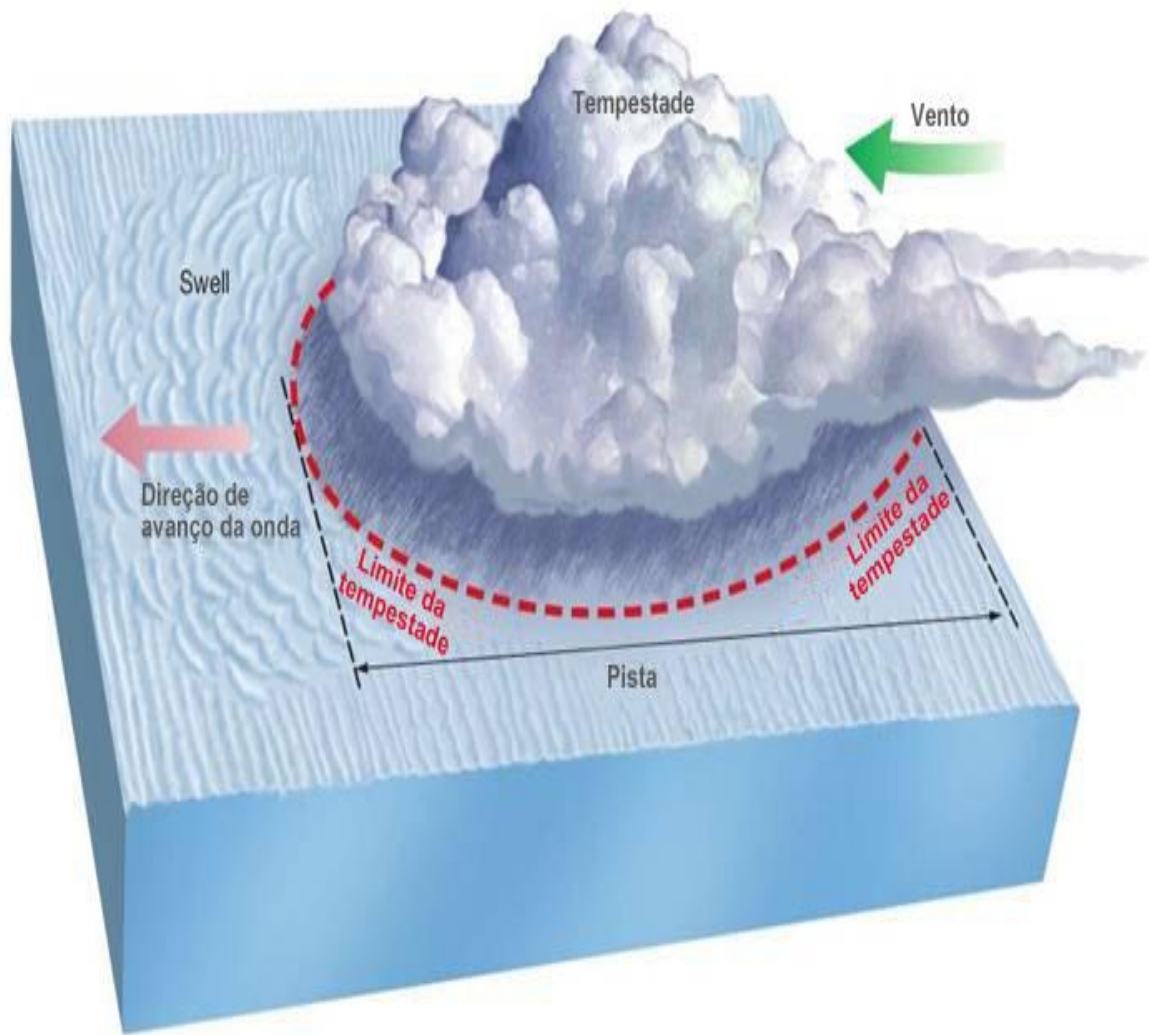


Figura 2.3 - Condições necessárias para a formação de ondas do tipo swell (Trujillo e Thurman, 2011).

De fato, as ondas não passam de energia solar concentrada, já que são geradas pelo movimento dos ventos que, por sua vez, são gerados pelo aquecimento desigual da superfície terrestre. A maior parte das ondas é gerada em regiões de tempestade, onde os ventos em geral são mais fortes e a superfície do mar se torna caótica. Depois de geradas as ondas se propagam até encontrar um local de dissipação de energia, como uma praia (Fleming, 2012).

Tabela 2.1 - Condições para o mar totalmente desenvolvido para diferentes velocidades de vento e as características resultantes (Adaptado de Trujillo e Thurman, 2011).

Estas condições...			Produzem estas ondas...		
Velocidade Vento (km/h)	Pista (km)	Duração Em h	Altura média (m)	Comprimento de onda médio (m)	Período médio (s)
20	24	2,8	0,3	10,6	3,2
30	77	7,0	0,9	22,2	4,6
40	176	11,5	1,8	39,7	6,2
50	380	18,5	3,2	61,8	7,7
60	660	27,5	5,1	89,2	9,1
70	1093	37,5	7,4	121,4	10,8
80	1682	37,5	10,3	158,6	12,4
90	2446	65,2	13,9	201,6	13,9

2.3 Transformação de energia das ondas em energia elétrica

A energia total em uma onda, conforme Dean e Dalrymple (1991) é a combinação da energia potencial, devido ao deslocamento vertical da superfície da água, com a energia cinética, devido ao movimento oscilatório da onda, e é expressa por:

$$E_T = E_c + E_p = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (2.1)$$

sendo ρ a massa específica da água do mar (kg/m^3), g aceleração gravitacional (m/s^2), H a altura da onda (m), E_c a energia cinética (J) e E_p a energia potencial (J).

A ideia de converter a energia das ondas dos oceanos em formas úteis de energia é antiga, tendo sido registrada a primeira patente em 1799 (Girard e Son, França), embora o seu estudo e desenvolvimento só se tenha feito de modo mais intensivo após a subida dos preços do petróleo em 1973 (*Centre for Renewable Energy Sources*, 2002). Vários programas de

pesquisa com apoio governamental e privado começaram principalmente, na Dinamarca, Irlanda, Noruega, Portugal, Suécia e Reino Unido com o objetivo de desenvolver tecnologia de conversão de energia das ondas, viável a nível industrial, a médio e longo prazo.

A Europa, devido a sua situação geográfica, encontra-se numa situação privilegiada, possuindo elevados níveis energéticos na sua costa oeste, encontrando-se níveis mais elevados apenas na zona sul da América do Sul e nos Antípodas. A potência total prevista para o nordeste atlântico e Mar do norte é de 290 GW e 30 GW para o mediterrâneo (*Centre for Renewable Energy Sources*, 2002).

Observando-se o globo terrestre, é notável que a água recobre em torno de 70% da superfície do Planeta. O total estimado do recurso energético oriundo das ondas é em torno de aproximadamente 2 TW equivalendo ao consumo médio mundial de energia elétrica se essa fosse convertida em sua plenitude (Cruz e Sarmiento, 2004).

Apesar de Portugal não apresentar níveis energéticos tão elevados como outros países europeus mais a norte, possui, no entanto níveis energéticos bem superiores aos dos países com costa mediterrânica, considerando-se que possui um recurso médio-alto em termos mundiais (*Wave Energy Center*, 2004).

Uma característica importante das ondas marinhas, como fonte de energia para o homem, é a sua alta densidade energética, mais alta que qualquer outra fonte de energia renovável (*Centre for Renewable Energy Sources*, 2002), elevada disponibilidade, e vastos recursos. Contudo apresenta alguns inconvenientes, como uma enorme variação da energia disponível, ambiente agressivo, e dificuldade de acesso (Danielsson, 2006).

A distribuição da potência média da energia das ondas pelas diversas regiões do planeta está apresentada na Fig. 2.4. Os locais de maior potência média intersectam no hemisfério Norte, a costa do Canadá, Estados Unidos da América e a costa oeste da Europa, bem como, no hemisfério Sul, a costa sul da América do Sul e a Austrália (*Centre for Renewable Energy Sources*, 2006).

As ondas que quebram em uma praia podem viajar centenas ou até milhares de quilômetros desde sua região de formação. Entre todas as ondas oceânicas, as geradas pelos ventos são as que possuem maior concentração de energia (CA-OE, 2006).

A agitação do mar é causada principalmente pela ação das ondas gravitacionais, das marés, dos ventos, das tempestades e do deslocamento de gelo e terra (Carneiro, 2007).

A energia das ondas tem recebido maior atenção devido a sua grande concentração de energia, expressa geralmente em potência por metro de frente de onda. Regiões com boas médias anuais, como a costa sul da América do Sul, apresentam valores entre 20 e 70 kW/m (Falcão, 2010).

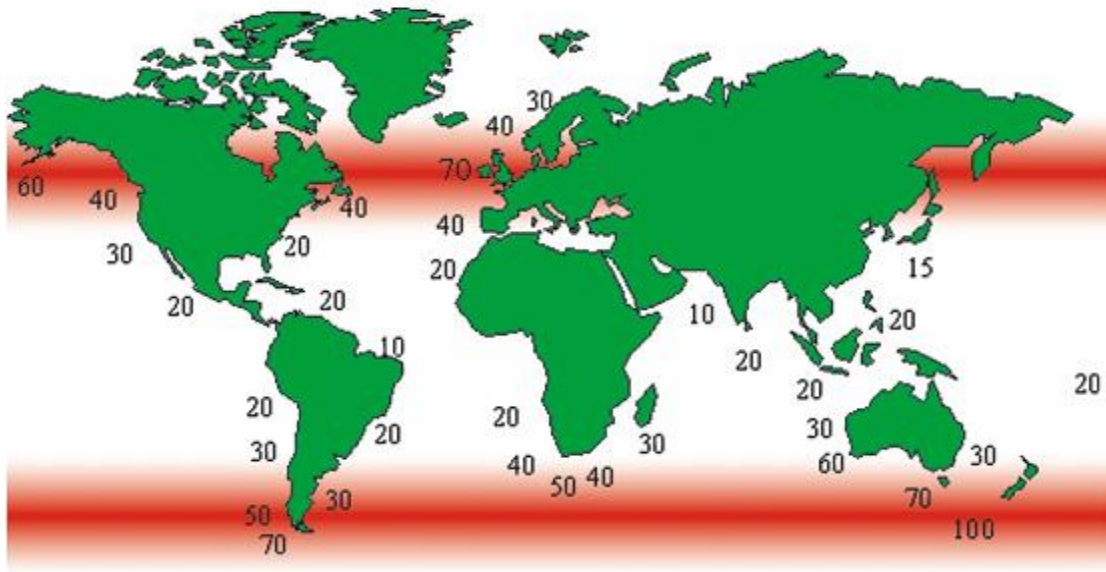


Figura 2.4 - Distribuição da potência média da energia das ondas no globo terrestre em kW/m (*Centre for Renewable Energy Sources*, 2006).

2.4 Dispositivo Coluna de Água Oscilante (CAO)

O princípio básico de funcionamento do dispositivo de CAO, conforme Falcão (2010) se dá através do ar, que é comprimido ou expandido no interior de uma câmara hidropneumática (de concreto ou aço), parcialmente submersa, na qual há uma abertura sob a superfície livre da água. O ar fica situado acima da superfície livre da água. As ondas incidentes fazem oscilar a superfície livre da água no interior da câmara, comprimindo e expandindo o ar. Quando a crista de uma onda incide no dispositivo, o movimento das ondas pressiona o ar que se encontra no interior do dispositivo, que é forçado a passar por uma chaminé acionando uma turbina (do tipo Wells ou de impulso), como consequência direta do

aumento de pressão na câmara de ar. Quando a cava da onda incide no dispositivo as ondas retornam sugando o ar que passa novamente na turbina, mas no sentido inverso, dada a pressão inferior no interior da câmara de ar.

As turbinas do tipo Wells são preferencialmente utilizadas, pois apresentam capacidade de conservar o seu sentido de rotação, independente do sentido do fluxo do ar. O grupo turbina/gerador é o responsável pela produção de energia elétrica. A Fig. 2.5 ilustra um dispositivo do tipo CAO.

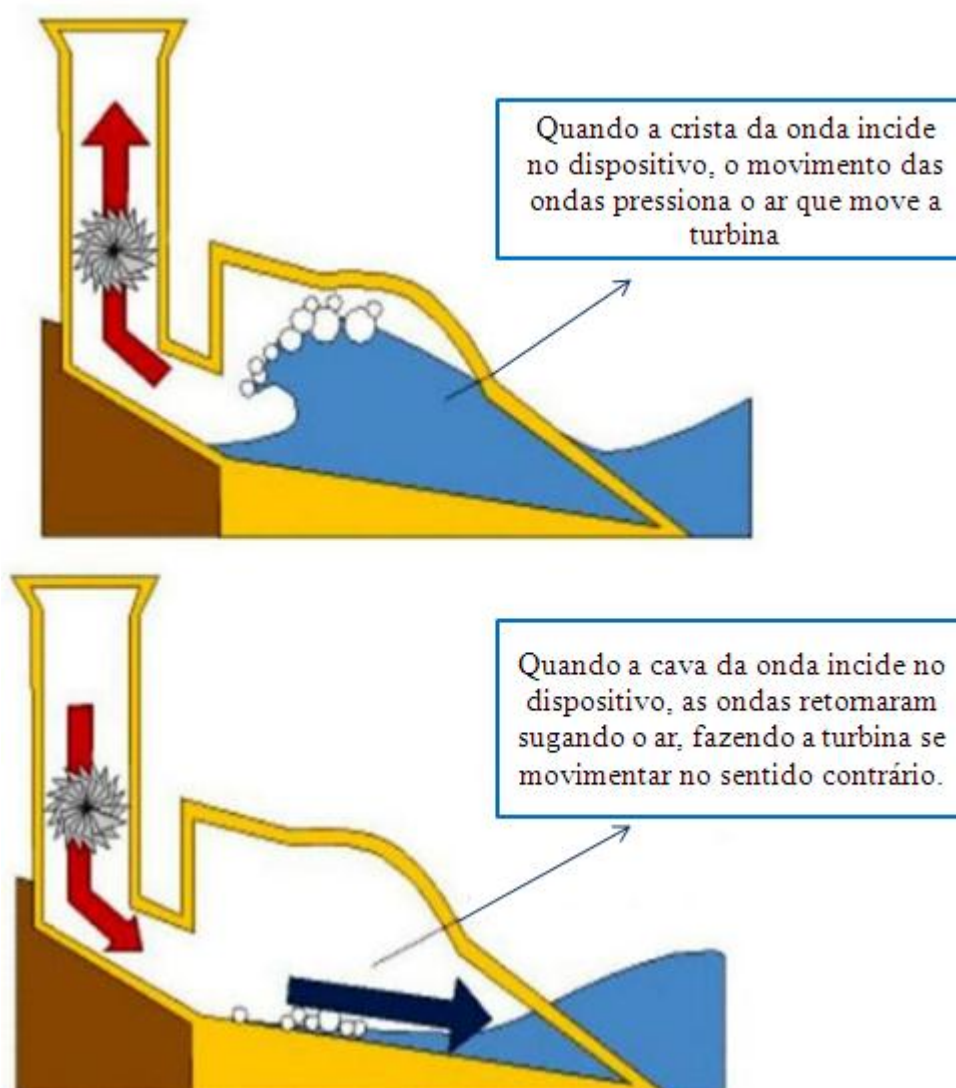


Figura 2.5 - Dispositivo Coluna de Água Oscilante (Adaptado de Ghosh e Prelas, 2010).

A câmara CAO é o dispositivo mais avançado em quantidade e duração de protótipos testados no mar, há inclusive algumas centrais de piloto instaladas. O mecanismo CAO, pode ser representado por quatro componentes principais: câmara hidropneumática, chaminé, turbina e gerador. Com relação as suas dimensões as mesmas estão apropriadamente para o tipo de onda local (Conde e Gato, 2008; Gomes, 2014).

Os conversores CAO comuns são construídos diretamente na linha costeira, a Central Piloto Européia da Ilha do Pico (Fig. 2.6) está localizada na ilha do Pico em Açores, Portugal, e tem capacidade instalada de 400 kW de potência. Foi construída entre 1995 e 1999 por uma equipe europeia coordenada pelo Instituto Superior Técnico (IST), de Portugal, e obteve a colaboração de duas universidades estrangeiras: *Queen's University of Belfast*, do Reino Unido e *University College Cork*, da Irlanda (Sarmiento et al., 2003).

A central está equipada com uma turbina Wells, com uma velocidade de rotação variável, acoplada diretamente a um gerador para a produção de eletricidade e duas válvulas. Uma válvula de guilhotina, localizada na entrada que liga a câmara ao exterior, cuja finalidade é isolar a turbina durante os períodos de parada; e uma válvula de alívio de atuação rápida, que tem por finalidade controlar o valor máximo da pressão no interior da câmara (Falcão, 2000).



Figura 2.6 - Central da Ilha de Pico – Portugal (Cruz e Sarmiento, 2004).

Outro projeto do dispositivo CAO é a Central do LIMPET na ilha deIslai (Escócia), (Fig. 2.7). Construída no período de 1998 a 2000, em Islay, foi idealizada a partir de um protótipo de 75 kW que já funcionava na ilha. LIMPET é a primeira central que foi explorada comercialmente no mundo, tem capacidade de 500 kW e fornece energia elétrica para quatrocentas famílias da região. Depois de realizado um levantamento das potencialidades locais, identificou-se a costa norte da Escócia, a costa ocidental de algumas das ilhas escocesas, juntamente com a costa norte da Cornualha e Devon como as áreas mais promissoras para a instalação de uma central de energia das ondas (Wavegen, 2002).

A câmara hidropneumática é composta por três compartimentos, com dimensões 6 m x 6 m cada, e 40° de inclinação na parede frontal. Conta com dois conjuntos, gerador - turbina Wells, com capacidade de 250 kW cada (Heath, 2001).



Figura 2.7 - Projeto da Câmara CAO do LIMPET (Wavegen, 2002).

3 DESIGN CONSTRUTAL

3.1 Teoria Construtal

Os estudos sobre os princípios da Teoria Construtal começaram a ser desenvolvidos por Adrian Bejan. A lei na qual se baseiam os princípios da Teoria Construtal (Lei Construtal), diz que: para um sistema de fluxo de dimensões finitas persistir no tempo, sua configuração deve evoluir no tempo de forma a facilitar o acesso das correntes que fluem através do sistema (Bejan e Zane, 2012).

De acordo com a Lei Construtal um sistema vivo, sistema animado e inanimado, possui duas características universais: ele flui (é um sistema em desequilíbrio termodinâmico), se transforma livremente para configurações que permitem que todas as suas correntes escoem mais facilmente ao longo do tempo. A vida e a evolução são fenômenos físicos e pertencem à física (Bejan 1997; Basak 2011).

O método denominado Design Construtal, recentemente tem sido empregado para explicar muitos fenômenos na natureza, classificados como *Design in Nature*. Esse método tem sido largamente aplicado na área de engenharia para melhoria de desempenho de sistemas. Está fundamentado no conceito da Lei Construtal. O foco do Design Construtal é a geometria, onde a engenharia apresenta o mesmo objetivo da natureza: a otimização de sistemas de fluxo sujeito a restrições de forma e estrutura (Bejan 2000).

O método utilizado na aplicação da Lei Construtal é denominado Design Construtal. O Design Construtal é um método que relacionando graus de liberdade, restrições e função objetivo, busca avaliar a influência da geometria no desempenho de um determinado sistema (Bejan e Zane, 2012). Se um método de busca exaustiva for associado ao método Design Construtal, todas as geometrias possíveis serão testadas e então será possível determinar a geometria ótima que maximiza o desempenho do sistema.

A Lei Construtal mostra qual é a tendência da natureza e com isso permite obter uma melhor condição de fluxo. Usando essa lei é possível projetar processos de forma orgânica e dinâmica para obter melhores ou mais eficientes resultados (Bejan e Zane, 2012).

O campo da Lei Construtal iniciou-se a partir da constatação de que o design é um fenômeno físico universal. Ela une o animado com o inanimado através de uma ampla gama de escalas, do design em árvores, dos flocos de neve ao design animal e o design em árvores da bacia de um rio, como o Amazonas (Bejan e Lorente, 2013).

A teoria Construtal tem duas vertentes principais: sendo que uma se aplica a Lei Construtal para antever e explicar a ocorrência de configurações naturais com fluxo (sejam animadas e inanimadas). A outra vertente usa a Lei Construtal como um princípio físico da engenharia (Bejan e Lorente, 2006). De acordo com Rocha e Biserni (2005), a teoria Construtal faz uma relação entre as geometrias da engenharia com as naturais, originando uma função objetivo. No caso desse trabalho o objetivo é obter o melhor desempenho da potência hidropneumática no interior da câmara CAO. Esse princípio é utilizado na engenharia para obter otimização de geometrias, onde os sistemas possuem um objetivo e são sujeitos a restrições, como a perda de carga, atrito, etc.

3.2 Aplicação do método Design Construtal em um conversor do tipo CAO

A proposta deste trabalho é, através de uma abordagem numérica, analisar o efeito da influência da relação V_E/V_T (Volume de entrada da câmara hidropneumática V_E e o Volume total do dispositivo V_T) no desempenho de um dispositivo CAO considerando uma onda em escala real. É possível observar na Fig. 3.1, a geometria de um dispositivo do tipo CAO que será submetida à incidência de ondas regulares em um tanque.

Sendo na Fig. 3.1 H a altura da onda (m), λ o comprimento da onda incidente (m), L o comprimento da câmara CAO (m), H_1 a altura da câmara (m), l o diâmetro da chaminé (m), H_2 altura da chaminé (m), H_3 a profundidade de submersão (m), h a profundidade (m), C_T o comprimento do tanque (m) e H_T a altura do tanque (m).

Avaliando a influência da relação entre o volume de entrada da câmara hidropneumática (V_E) e o volume total (V_T), buscando maximizar a potência hidropneumática no conversor tipo CAO, é empregado o método Design Construtal aliado ao método de busca exaustiva para a definição da geometria ótima, aquela que apresenta o melhor desempenho, ou seja, a que converter mais energia das ondas em energia elétrica.

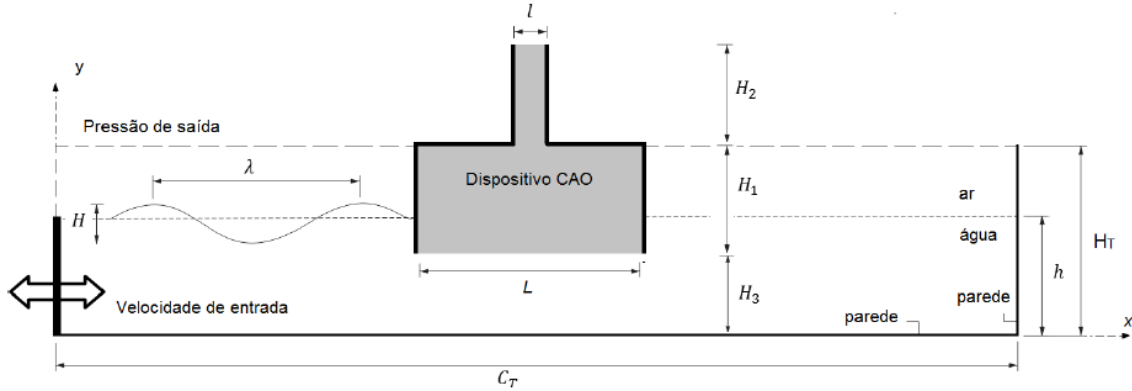


Figura 3.1- Representação esquemática do domínio computacional 2D (Gomes, 2014).

Nesse estudo é analisado o grau de liberdade de H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática). As relações: $H_2/l = 3,0$ (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) e $H_3 = 9,5$ m (profundidade de submersão do conversor CAO) são mantidas constantes. O volume de entrada da câmara hidropneumática do dispositivo CAO é mantido constante $V_E = 37,60 \text{ m}^3$, enquanto o volume total (V_T) é variado, sendo V_E/V_T a restrição geométrica do problema. Consequentemente, para que essa variação de V_T ocorra, é necessário que o volume da chaminé (V_C) varie. Os volumes V_E , V_C e V_T , são definidos por:

$$V_E = H_1 L L_1 \quad (3.1)$$

$$V_C = H_2 l L_1 \quad (3.2)$$

$$V_T = V_E + V_C = V_E + H_2 l L_1 \quad (3.3)$$

A bidimensionalidade é uma condição de escoamento, de modo que a dimensão L_1 (largura da câmara CAO) é mantida constante e igual a um.

A partir da Eq. (3.1), variando o grau de liberdade H_1/L é possível obter equações que determinam as dimensões para o comprimento (L) e para a altura (H_1) da câmara hidropneumática, respectivamente:

$$L = \left[\frac{V_E}{\left(\frac{H_1}{L}\right) L_1} \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

$$H_1 = L \left(\frac{H_1}{L} \right) \quad (3.5)$$

E, a partir da Eq. (3.3), considerando o grau de liberdade H_2/l , é possível obter as equações que determinam as dimensões para o diâmetro (l) e a altura (H_2) da chaminé da câmara hidropneumática, respectivamente:

$$l = \left[\frac{V_T - V_E}{\left(\frac{H_2}{l}\right) L_1} \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

$$H_2 = l \left(\frac{H_2}{l} \right) \quad (3.7)$$

Visando sempre levar em conta uma onda bem definida para a variação da geometria do dispositivo CAO, como critério para a definição da restrição do volume de entrada da câmara hidropneumática (V_E), considera-se a situação inicial em que o comprimento da câmara hidropneumática (L) é igual ao comprimento da onda incidente (λ) e que a altura da câmara hidropneumática (H_1) é igual à altura da onda incidente (H) e $L_1 = 1$, com isso a Eq. (3.1) pode ser reescrita como:

$$V_E = H \lambda 1 \quad (3.8)$$

Até então, como em Gomes (2014), por exemplo, para determinar a restrição do volume da chaminé (V_C) era definido que:

$$\frac{V_E}{V_T} = 0,7 \quad (3.9)$$

Deste modo, neste trabalho serão testados diferentes valores para a relação V_E/V_T , dando continuidade ao estudo apresentado em Gomes (2014) que estudou seis valores para a profundidade de submersão: $H_3 = 9,0$ m, $H_3 = 9,25$ m, $H_3 = 9,50$ m, $H_3 = 9,75$ m, $H_3 = 10,0$ m, e $H_3 = 10,25$ m para uma onda de $T = 5$ s, $\lambda = 37,60$ m e $H = 1,00$ m. Gomes obteve no seu estudo para profundidade de submersão ótima $H_3 = 9,50$ m, valor este, que será considerado fixo no presente trabalho.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA

Neste capítulo são apresentados aspectos relacionados à modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas regulares em energia elétrica. A Fig. 4.1 apresenta um esquema em que é possível observar o caminho percorrido até a conclusão de uma simulação numérica em energia das ondas regulares.

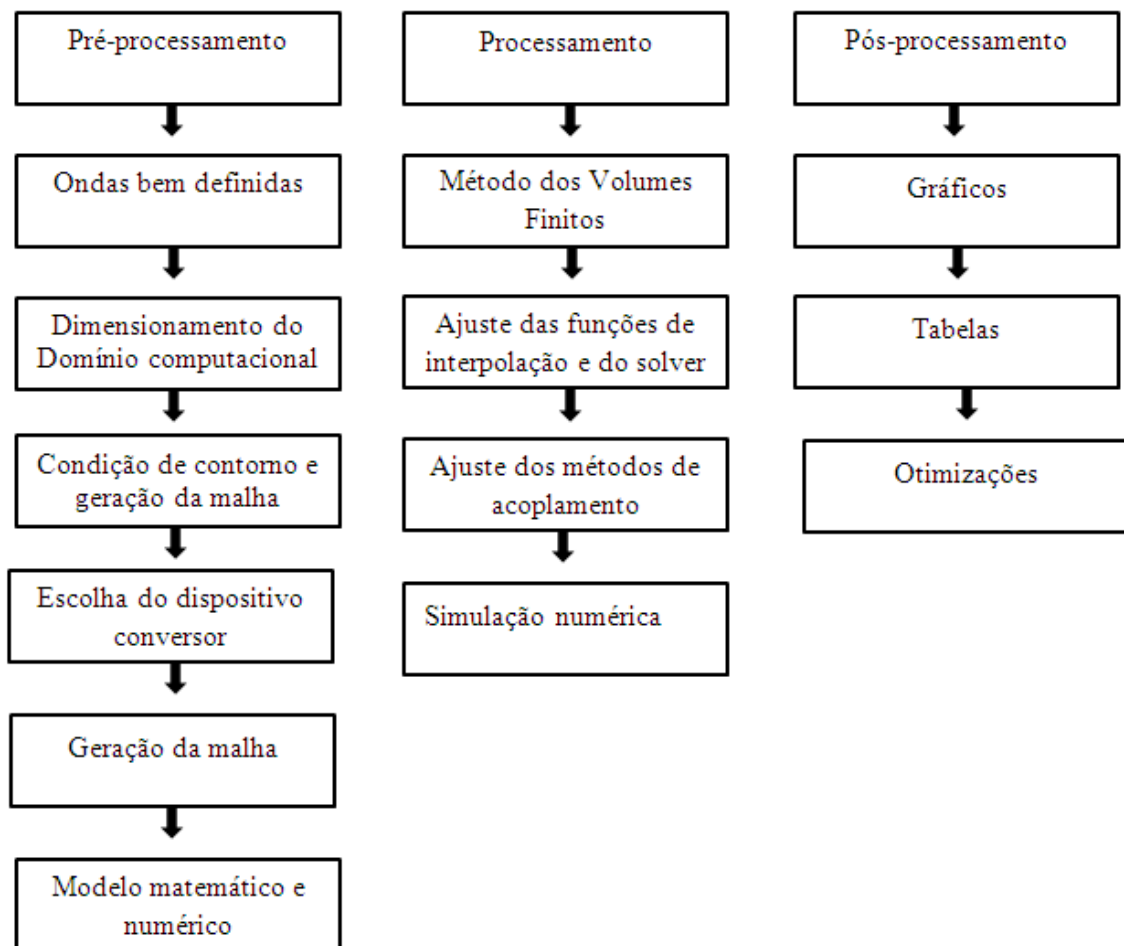


Figura 4.1- Esquema das etapas de simulação numérica de um conversor de energia das ondas regulares em energia elétrica (Adaptado de Gomes 2014).

4.1 Elementos básicos de uma onda

Os elementos básicos de uma onda podem ser observados na Fig. 4.2.

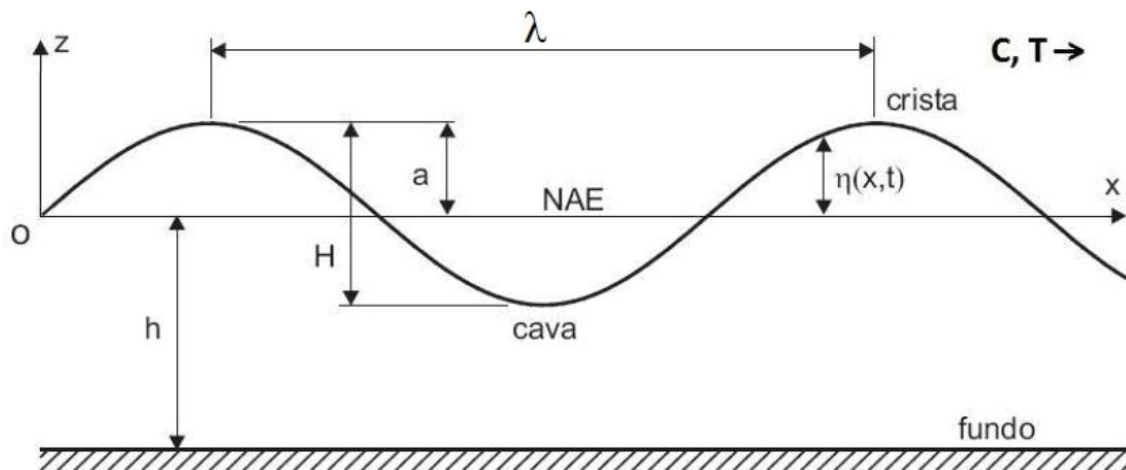


Figura 4.2 - Elementos da onda (Carneiro, 2007).

Ainda de acordo com a Fig. 4.2, os principais elementos de uma onda são (Carneiro, 2007):

NAE: Nível estático (ou nível médio) da água.

Crista: Ponto mais alto atingido pela superfície livre da água (elevação) comparado com o plano do nível médio da água.

Cava: Ponto mais baixo atingido pela superfície livre da água relativo ao plano do nível médio da água.

Comprimento de onda (λ): É a distância horizontal entre duas cristas sucessivas.

Período da onda (T): É o intervalo de tempo entre a passagem de cristas sucessivas em relação a um ponto fixo. A onda desenvolve nesse tempo, um determinado período, um ciclo completo.

Profundidade local (h): Afastamento do fundo do mar até o nível médio da água.

Altura da onda (H): Distância entre cavas e cristas sucessivas.

Celeridade (C): É a velocidade com que o perfil da onda viaja ou se propaga. É comumente referido como a velocidade da onda ou velocidade de fase.

Amplitude (a): Distância entre a crista e a superfície livre da água ou a distância entre a cava e a superfície livre da água.

Elevação da Superfície Livre (η): representa a distância instantânea da superfície livre ao plano médio do nível da água.

Diversas teorias de ondas foram desenvolvidas, as quais podem ser aplicadas para diferentes casos, dependendo das condições ambientais. Os principais fatores que devem ser levados em consideração para a determinação da teoria a ser aplicada são a altura da onda (H), o comprimento da onda (λ) e a profundidade da água (h) (Carneiro, 2007).

A abordagem mais elementar da teoria de ondas superficiais de gravidade é conhecida como teoria linear ou teoria de pequena amplitude. Essa teoria é válida quando a declividade, a profundidade relativa e a altura de onda relativa são pequenas, portanto, ondas de pequena amplitude e pequeno comprimento em grandes profundidades (Dean e Dalrymple, 1991).

Teorias não lineares conseguem obter uma representação mais próxima das ondas reais, permitindo a análise de ondas mais altas em profundidades mais rasas. 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-harmônicas, 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).

Conforme Dean e Dalrymple (1991), a solução de Stokes é válida quando $k.h < 1$ e $H/\lambda \leq 1$, sendo $k = 2\pi/\lambda$ o número de onda. Quanto à profundidade, $h/\lambda > 0,5$ caracteriza águas profundas. Em termos do número de Ursell o limite de aplicação é $UR < 26$, o número de Ursell pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$UR = \lambda^2 H/h^3 \quad (4.1)$$

Considerando as características da onda empregada nesse trabalho ($T = 5$ s, $H = 1,0$ m, $\lambda = 37,6$ m e $h = 10,00$ m), a mesma possui uma melhor descrição através da teoria de Stokes de segunda ordem. No entanto, foi feita uma simplificação devido ao fato dos termos de segunda ordem não influenciarem significativamente a solução. Em função disso, e pela

maior simplicidade de aplicação e facilidade de convergência, neste estudo considerou-se a teoria linear para definir a onda empregada nas presentes simulações.

4.2 Condições de contorno

Em relação ao gerador de ondas (extremidade esquerda do tanque de ondas – Fig. 3.1), a condição de contorno empregada no presente trabalho é fundamentada na metodologia função empregada em Gomes et al. (2009a), que consiste em aplicar na região do gerador de ondas uma variação da velocidade de entrada (*velocity inlet*) através de uma função definida pelo usuário, UDF - Anexo 1, no FLUENT.

Na parte superior da superfície lateral esquerda e na superfície superior do tanque é aplicada a condição de contorno de pressão atmosférica. E nas superfícies inferior e lateral direita, é imposta uma condição de não deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula. A condição de contorno empregada na parede da câmara hidropneumática é a velocidade nula. Considera-se que o fluido está em repouso para as condições iniciais.

Na simulação numérica de uma onda regular em escala real, é estabelecida uma condição de contorno de velocidade prescrita na extremidade esquerda do tanque, fazendo com que a água que estava em repouso no tanque seja movimentada através dessa velocidade, constituindo assim a geração das ondas. Essa metodologia foi desenvolvida por Horko (2007) e usada por Gomes (2010), e consiste em atualizar as velocidades da onda de acordo com as equações analíticas da velocidade.

As equações utilizadas da teoria de ondas de Stokes de 2ª ordem, nas direções x e z , são representadas, respectivamente, por:

$$u = a g k \frac{\cosh(kz + kh)}{w \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + a^2 w k \frac{\cosh 2k (h + z)}{\sinh^4 (kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (4.2)$$

$$w = agk \frac{\sinh(kh + zk)}{w \sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) + a^2 wk \frac{\sinh 2k(h + z)}{\cos^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (4.3)$$

onde k representa o número de onda, que é dado por:

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

sendo λ o comprimento de onda incidente, e ω a frequência da onda que pode ser calculada por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (4.5)$$

sendo T o período da onda e a a amplitude da onda, definida como:

$$a = \frac{H}{2} \quad (4.6)$$

sendo H a altura da onda.

4.3 Modelo *Volume of Fluid* (VOF)

Nesse trabalho é utilizado o modelo *Volume of Fluid* (VOF) (Hirt e Nichols, 1981). O modelo VOF vem sendo amplamente empregado para a simulação numérica de dispositivos conversores de energia das ondas regulares em energia elétrica. Exemplos de sua aplicação podem ser encontrados nos seguintes trabalhos: Horko (2007), Liu et al. (2008a), Liu et al. (2008b), Gomes et al. (2009), Gomes (2010), Ramalhais (2011), Liu et al. (2011), Gomes et al. (2012b), Grimmmler (2013), Gomes (2014).

A análise consiste em encontrar a solução de um escoamento de uma mistura ar-água. Por isso, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica são resolvidas com o Método dos Volumes Finitos (MVF). Mais especificamente usando o software FLUENT (Fluent 6.3, 2006)

Escrevendo a equação do movimento para um fluido Newtoniano com o escoamento incompressível para as direções x e z , respectivamente:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x \quad (4.7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + F_z \quad (4.8)$$

onde ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3), t é o tempo (s), u e w são as componentes da velocidade do escoamento nas direções x e z , respectivamente, em $[m/s]$, P é a pressão (Pa), μ é a viscosidade (kg/ms), F_x é a força de campo na direção x , F_z é a força de campo na direção z , $\frac{\partial P}{\partial x}$ e $\frac{\partial P}{\partial z}$ são gradientes de pressão nas direções x e z respectivamente (Fox et al., 2010).

Para o escoamento da mistura de ar e água e para avaliar a sua interação com o dispositivo, é empregado o método *Volume of Fluid* (VOF). O VOF é um modelo multifásico usado para escoamentos de fluido com duas ou mais fases. Neste modelo, as fases são imiscíveis, ou seja, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra fase (Ling et al., 2001; Lv et al., 2011). Uma variável é introduzida para cada fase que for acrescentada ao modelo, no método VOF, a fração de volume α_q é usada para representar as duas fases do volume de controle. Logo, é indispensável que a soma de todas as fases em cada célula seja ininterruptamente um ($0 \leq \alpha_q \leq 1$). Portanto se há no fluido uma mistura de água e ar, uma fase é a complementação da outra, isto é, $\alpha_{\text{água}} = 1 - \alpha_{\text{ar}}$. Se $\alpha_{\text{ar}} = 0$, o volume de controle está vazio de ar e cheio de água, isto é, $\alpha_{\text{água}} = 1$ (Ling et al., 2001; Lv et al., 2011, Gomes, 2010).

De acordo com Fluent 6.3 (2006), considerando o valor local de α_q , as propriedades serão identificadas dentro do domínio de cada célula, a localização entre as fases é, então, definida pela solução da equação da continuidade para a fração de uma ou mais fases.

A equação para a fase q é:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (4.9)$$

sendo $\dot{m}_{qp}$ passagem de massa da fase q para a fase p e $\dot{m}_{pq}$ é a passagem de massa da fase p para a fase q . Logo como não ocorre a passagem de massa entre o ar e a água, $\dot{m}_{qp}$ e $\dot{m}_{pq}$ são nulos. O termo fonte S_{α_q} é zero, mas é possível empregar uma fonte de massa constante ou definida pelo usuário para cada fase. Assim:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_{\text{água}}) + \nabla \cdot (\alpha_{\text{água}} \vec{v}) = 0 \quad (4.10)$$

A equação volumétrica, Eq. (4.10), não será resolvida para a fase primária (ar), a fração de volume da fase primária deve ser computada com base na seguinte restrição:

$$\alpha_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} = 1 \quad (4.11)$$

Uma única equação da conservação da massa é resolvida pelo método VOF conforme Eq. (4.10), semelhantemente a equação da quantidade de movimento é resolvida para ambos fluidos (conforme Eqs. (4.7) e (4.8)). Logo, as velocidades nas direções x e z serão as mesmas para os dois fluidos em cada célula computacional (Fluent 6.3, 2006). A equação da conservação da mistura também é resolvida.

4.4 Domínio computacional

A partir das características da onda bem definida: período da onda (T), altura da onda (H), e profundidade da superfície livre (h) é possível determinar o comprimento do tanque (C_T) e a altura do tanque de ondas (H_T) apresentado na Fig. 3.1. Não existe uma regra geral que estabeleça as dimensões do tanque de ondas, porém algumas questões devem ser consideradas. 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 (Gomes 2014).

De acordo com Gomes et al. (2009a) é possível definir que o comprimento do tanque deva ser cinco vezes maior que o comprimento da onda. Assim garante-se a simulação numérica da onda, sem efeitos de refração por um tempo razoável de propagação e sem aumentar desnecessariamente o tamanho do domínio computacional e, por consequência, a malha, fator que influencia diretamente no esforço computacional. E para a altura do tanque é necessário considerar a profundidade mais a altura da onda. Conforme Gomes et al. (2009a) a altura do tanque deve ser a profundidade mais três vezes a altura da onda. Assim de acordo com as características da onda a ser gerada, é possível determinar as dimensões do domínio computacional.

4.5 Geração da malha

O número de elementos (volumes) da malha determina a qualidade das soluções em CFD. O tempo de simulação e o esforço computacional também dependem do refinamento da malha, visto que uma malha de boa qualidade pode tornar os códigos de CFD mais robustos, quando bem construída independente do solver de fluxo utilizado. Sendo assim a etapa de geração da malha tem se tornado a etapa mais importante e que demanda mais tempo na análise de CFD (Santos, 2008).

Para os casos analisados neste trabalho, a discretização do domínio computacional foi feita com o software GAMBIT. O GAMBIT, é um gerador de malhas de modelos para CFD e outras aplicações científicas. É capaz de tornar mais simples e intuitivas as etapas de construção, discretização (geração da malha) e definição dos tipos de regiões do modelo,

sendo suficientemente versátil para tratar uma ampla variedade de modelos (FLUENT, 2006). Informações complementares sobre geração da malha são encontradas em Gomes (2014).

A discretização aplicada neste trabalho é de uma malha estruturada disposta em quadriláteros 2D (Fig. 4.3), utilizada em regiões específicas de forma a explorar com maior exatidão de solução a região estudada, sendo a região de interesse junto ao dispositivo CAO.

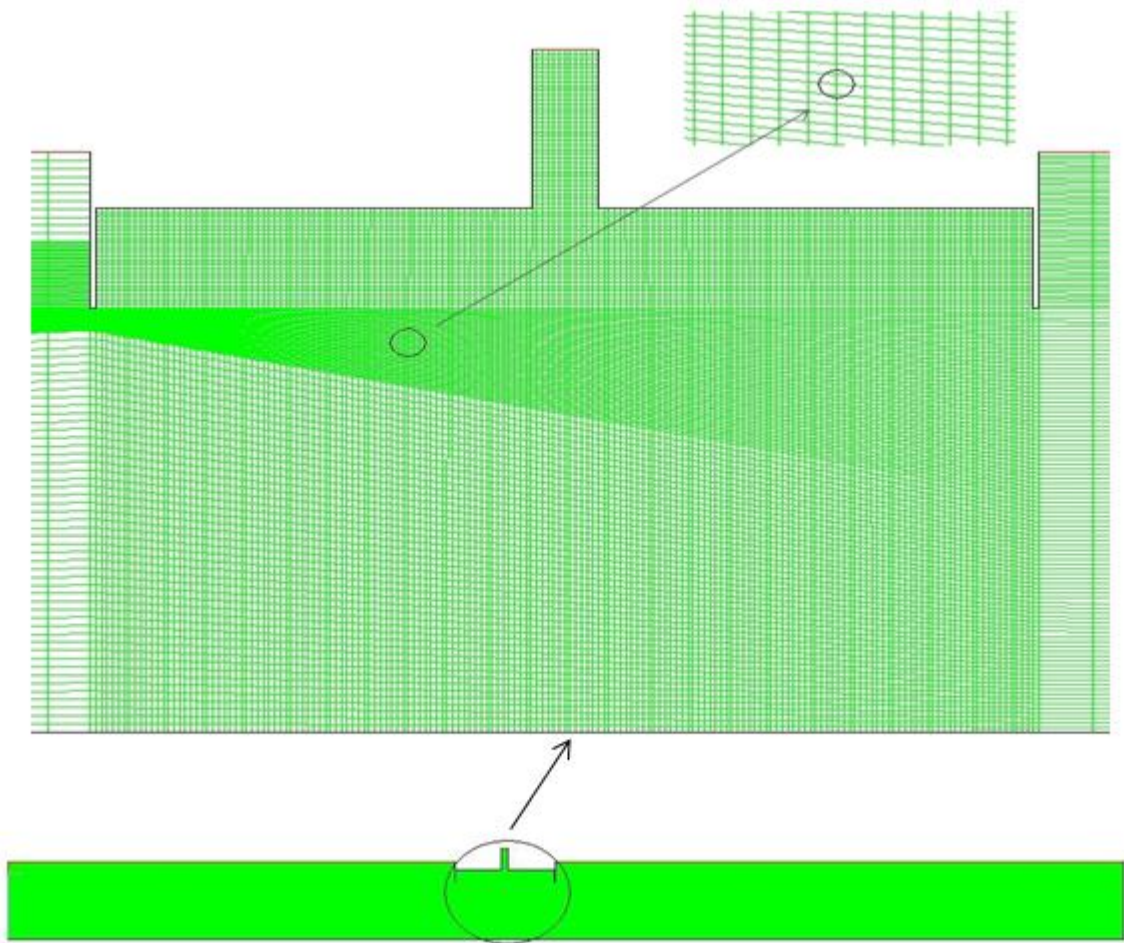


Figura 4.3 – Discretização do domínio (malha utilizada no presente trabalho).

Na geração da malha é possível estabelecer o número de volumes por determinada região, conforme a Fig. 4.4. Nas regiões 1 e 3 o número de volumes é 14.000 para cada região, a região 2 é composta por 15.130 volumes e a região 4 que fica junto ao dispositivo CAO contém 4.284 volumes. O tempo médio para cada simulação foi de aproximadamente duas horas e quarenta e cinco minutos.

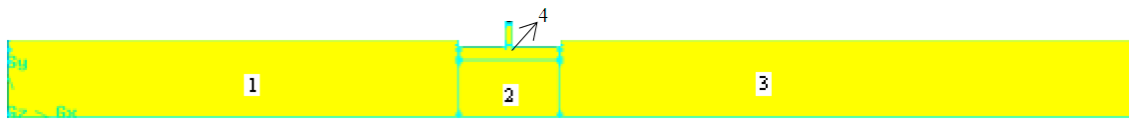


Figura 4.4 - Malha definida por número de volumes por região.

4.6 Modelagem numérica

A modelagem numérica é um conjunto de técnicas poderosas para a análise de processos e sistemas complexos. Permite o estudo da análise e avaliação de situações, ou casos, que não seria possível na vida real. Em um mundo crescente de competitividade, tem sido uma metodologia indispensável para a tomada de decisão em diversas áreas (Shannon, 1998).

Três tipos de métodos podem ser empregados na solução de um problema de engenharia: experimentais, analíticos e numéricos. Os métodos experimentais tratam da configuração real, no entanto é de altíssimo custo e muitas vezes não pode ser realizado por questões de segurança ou pela dificuldade de reprodução das condições reais. Os métodos analíticos e numéricos formam a classe dos métodos teóricos, pois objetivam resolver as equações diferenciais que formam o modelo matemático. A diferença entre eles está apenas na complexidade das equações que cada método resolve. Os métodos analíticos normalmente são aplicados a geometrias simples e a condições de contorno também simples. Os métodos numéricos podem resolver problemas complexos, com condições de contorno geral definidos em geometrias também complexas apresentando resultados com uma rapidez muito grande (Maliska, 2004).

A metodologia empregada nesse trabalho é numérica. A tarefa do método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas, que envolvam a função incógnita. Uma vez que se está resolvendo um sistema algébrico de equações, ao invés de um conjunto de equações diferenciais, a solução passa a ser obtida para um número discreto de pontos ao longo do domínio e não mais em um nível infinitesimal (Maliska, 2004).

O uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos da engenharia e da física é hoje uma realidade, devido ao vertiginoso 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. Além disso, a versatilidade e generalidade dos métodos numéricos para simulação de problemas de engenharia e a relativa simplicidade de aplicação dessas técnicas são outros fatores motivadores para seu uso (Maliska, 2004).

A análise de sistemas conforme Versteeg e Malalasekera (1999), através de simulações computacionais, envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, é conhecida como dinâmica de fluidos computacionais (CFD), e apresenta as seguintes vantagens: redução substancial de tempo e custo em novos projetos, capacidade de estudar sistemas onde análises experimentais são complexas ou impossíveis e nível praticamente ilimitado de detalhamento de resultados.

É bom lembrar que em nada ajuda, do ponto de vista da engenharia ter um excelente método numérico se o modelo matemático (isto é, as equações diferenciais escolhidas) não representa o fenômeno que se quer modelar (Maliska, 2004).

Estudos através da modelagem numérica são normalmente divididos em três etapas, descritas a seguir de acordo com o estudo desenvolvido:

No pré-processamento: é definida a região de interesse (domínio computacional), esse domínio é dividido em uma quantidade determinada de subdomínios (geração da malha), é selecionado o fenômeno físico que será modelado, enquanto se define as propriedades físico-químicas do fluido e se aplica as condições de contorno e iniciais adequadas. É utilizado o software GAMBIT na construção da geometria do caso de estudo e para a geração da malha. Já o software FLUENT é utilizado na definição das condições iniciais e nas condições de contorno (Versteeg e Malalasekera, 1999).

No processamento: existem diversos métodos aplicáveis para a solução numérica de sistemas de equações diferenciais parciais do modelo matemático. A principal diferença entre eles consiste na forma como as variáveis do escoamento são aproximadas com o processo de discretização empregado em cada método (Maliska, 2004; Versteeg e Malalasekera, 1999). O método numérico empregado neste trabalho foi o Método dos Volumes Finitos, através do software FLUENT.

No pós- processamento: os pacotes de CFD dispõem de versáteis ferramentas para a visualização dos resultados (Versteeg e Malalasekera, 1999), tanto qualitativamente, como por exemplo, topologias dos campos de velocidade e de pressão, quanto, quantitativamente como perfis de velocidade, vazão mássica, entre outros. Se houve problemas nas etapas anteriores, o mesmo é identificado, corrigido e a análise é reiniciada. No presente trabalho os softwares FLUENT e Excel, foram usados para a etapa de pós-processamento.

4.7 Softwares GAMBIT E FLUENT

No presente trabalho de conversão de energia das ondas regulares em energia elétrica através do dispositivo tipo CAO, como já foi dito, foram empregados os softwares GAMBIT (pré-processamento) e FLUENT (pré-processamento, processamento e pós-processamento).

O GAMBIT é um software capaz de gerar geometrias e discretizá-las (gerar malhas) em modelos para CFD e outras aplicações científicas. O GAMBIT apresenta comandos simples como pode ser observado na Fig. 4.5 para as etapas de construção, discretização e definição dos tipos de regiões do modelo, sendo suficientemente capaz de tratar uma ampla variedade de modelos (Fluent 6.3, 2006).

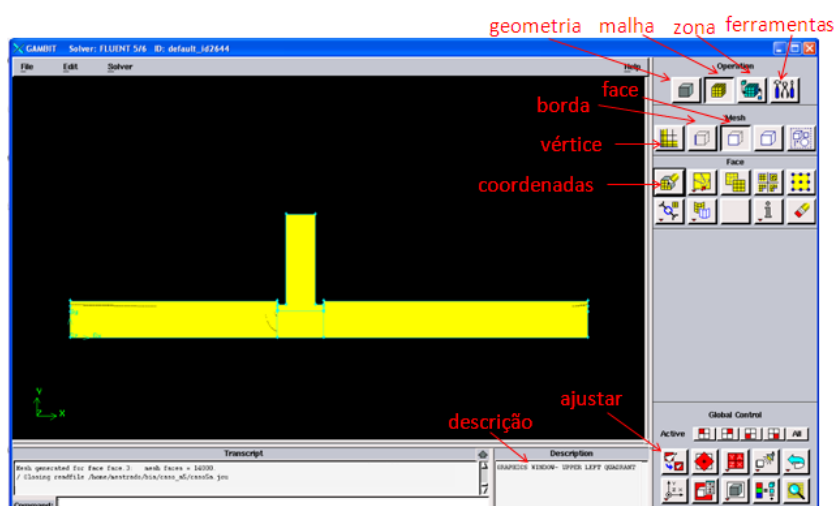


Figura 4.5 - Interface do software GAMBIT com uma malha a ser exportada e vários ícones de comando indicados.

O FLUENT é um software comercial, baseado no MVF, para a modelagem de escoamento de fluidos em geometrias complexas. Apresenta flexibilidade de malha, incluindo a capacidade de resolver problemas de escoamento usando malhas não estruturadas, aplicadas em geometrias complexas com relativa facilidade. Além disso, compatível com malhas do tipo bidimensional (dos tipos triangular e quadrilátera) e tridimensional (dos tipos tetraédrica/hexaédrica/piramidal/híbridas) (Fluent 6.3, 2006). É possível observar na Fig. 4.6, a interface do *software* FLUENT.

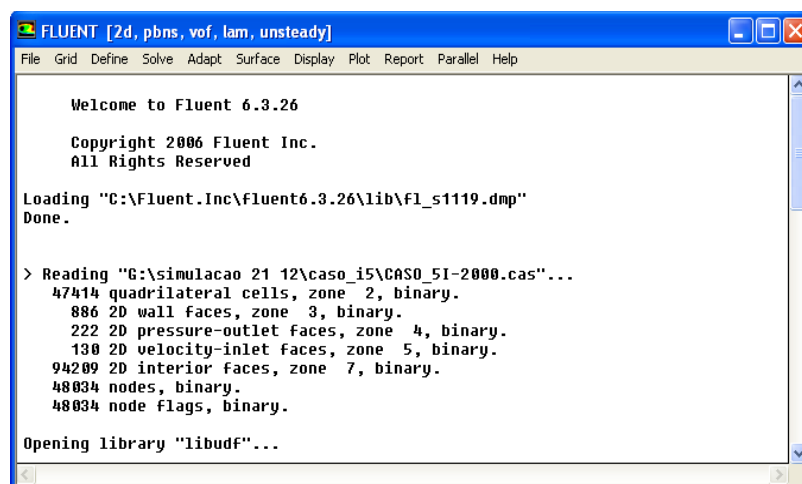


Figura 4.6 - Interface software FLUENT

4.8 Métodos numéricos empregados

4.8.1 Método dos volumes finitos

O Método de Volumes Finitos (MVF) é uma forma de obter uma versão discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP). Diferentemente de outros métodos, ele é fundamentado numa 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 essas fronteiras, da diferença entre os fluxos que entram e os que saem deste volume, o que é conseguido de forma mais geral pela integração das EDPs (Bortoli, 2000; Fortuna, 2000).

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 a quantidade de pontos, mais próximo da solução exata será a solução aproximada (ou numérica). Um método analítico com habilidade de resolver tais equações forneceria a solução em uma forma fechada, e seria possível, então, calcular os valores das variáveis dependentes em nível infinitesimal, isto é, para um número infinito de pontos (Maliska, 2004).

Entre os diferentes métodos numéricos que podem ser empregados para a discretização e solução de equações diferenciais destaca-se o MVF.

Existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas no MVF. A primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, e a segunda é integrar sobre o volume elementar, no espaço e no tempo as equações na forma conservativa. Forma conservativa, ou forma divergente, é aquela 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, portanto ao balanço (Maliska, 2004). Detalhes complementares de como obter as equações aproximadas através do método dos volumes finitos, podem ser obtidos em (Versteeg e Malalasekera, 1999).

4.8.2 Métodos de solução

O FLUENT permite escolher entre dois métodos numéricos na solução das equações, são eles: *solver* segregado e *solver* acoplado. Nos dois métodos o FLUENT integra as equações (da conservação da massa, da quantidade de movimento) geradas pela discretização. O método de solução (*solver*) acoplado resolve todas as incógnitas simultaneamente (para isso cria uma única matriz envolvendo todos os coeficientes), resolvendo todas as equações governantes para todas as variáveis (velocidade, pressão, temperatura e etc) em todos os volumes de controle ao mesmo tempo (ou de maneira simultânea ou acoplada). O método de

solução (*solver*) segregado resolve as equações governantes para uma variável (por exemplo, a velocidade) em todos os volumes de controle um de cada vez (ou sequencialmente), atualizando para isso os coeficientes (Maliska, 2004).

Neste trabalho é usado o *solver* segregado para a solução das equações.

4.8.3 Resolução de equações aplicando a discretização

O FLUENT usa a técnica do volume de controle para converter as equações governantes em equações algébricas que possam ser resolvidas numericamente. Esta técnica consiste em integrar as equações governantes em cada volume de controle, resultando em equações discretas que conservam cada quantidade com base no volume de controle (Duarte, 2006; Fluent 6.3, 2006).

Por definição, o FLUENT armazena os valores discretos do escalar ϕ no centro dos volumes. Através dos esquemas de interpolação é possível obter os valores no centro de cada volume.

O FLUENT permite escolher entre quatro esquemas de interpolação: *Upwind* de primeira ordem, *Upwind* de segunda ordem, *Power Law* e QUICK. Neste trabalho foi utilizado *Upwind* de primeira ordem e que será explicado a seguir.

4.8.3.1 *Upwind* de primeira ordem

Quando este esquema é utilizado, quantidades em todas as faces de volumes são determinadas supondo que o centro do volume para um campo variável representa um valor médio ao longo de todo o volume e mantém as características em todo o volume. Assim, quando é escolhido o esquema *Upwind* de primeira ordem o valor ϕ_f é o mesmo valor de ϕ no volume à montante (Fluent 6.3, 2006).

4.8.4 O método *Geo-Reconstruction*

O método de reconstrução geométrica (*Geo-Reconstruction*) é empregado para a solução do fluxo nas faces dos volumes de controle, cuja interface é representada na Fig. 4.7.

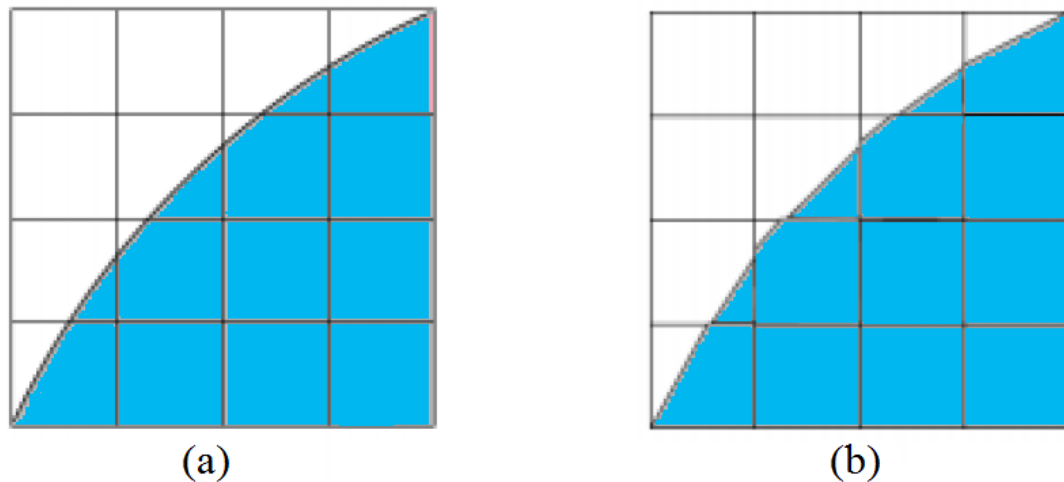


Figura 4.7 - (a) Interface Real e (b) Interface Geo-Reconstruction. (Adaptado de Fluent 6.3 2006).

Esse método de reconstrução geométrica (*Geo-Reconstruction*), de acordo com Fluent 6.3 (2006) representa a interface entre os fluidos através de uma abordagem linear por partes (*piecewise-linear*). 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*.

O modelo é aplicável para as malhas em geral, incluindo aquelas que são não estruturadas, assumindo que a interface entre dois fluidos tem uma inclinação linear dentro de cada célula, e usa esta forma linear para o cálculo da advecção do fluido através das faces do volume (Fluent 6.3, 2006).

No primeiro momento é realizado o cálculo da posição da interface linear relativa ao centro do volume de controle parcialmente cheio, isso baseado na informação sobre a fração volumétrica. No segundo momento é calculada a adição do fluido em cada face usando informações sobre a distribuição de velocidades nas faces. E, no terceiro momento, é calculada a fração de volume em cada célula utilizando os balanços de fluxo calculados na etapa anterior.

4.8.5 Acoplamento pressão-velocidade

A solução segregada das equações de conservação da quantidade de movimento e de massa, para problemas incompressíveis, gera o problema do acoplamento pressão-velocidade. Neste sentido é preciso encontrar um procedimento sequenciado e iterativo (algoritmo) que melhore a estimativa do campo de pressão de modo que o campo de velocidade se aproxime progressivamente da solução que satisfaça a equação da continuidade na forma discretizada (Versteeg e Malalasekera, 1999).

O FLUENT tem implementado os seguintes métodos de acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE, SIMPLEC e PISO. Todos estes métodos utilizam a solução segregada para os sistemas de equações (Fluent 6.3, 2006).

Na simulação realizada para gerar a onda neste trabalho foi empregado o método SIMPLE (*Semi-Implicit Linked Equations*), explicado a seguir.

4.8.5.1 O método SIMPLE

Esse método foi desenvolvido por Patankar e Spalding (1972), é largamente empregado e dá origem a outros métodos. Inicialmente estima-se um campo de pressão p' e obtém-se, através de um campo de equações de conservação da quantidade de movimento, um campo de velocidades que, a priori, não satisfaz a equação da continuidade. Não faz sentido algum alterar, aleatoriamente, o campo de pressão a fim de que, em algum momento, um campo de velocidade satisfaça a equação da continuidade. O procedimento recomendado comumente é estabelecer expressões de correção para as velocidades em função de gradientes de correção de pressão p'' . Quando esta correção de pressão não for mais necessária, estes gradientes de p'' serão nulos e a correção de velocidades será nula. Para a evolução de p'' , utiliza-se a equação da continuidade, onde as equações de correção são introduzidas gerando uma equação para a pressão p'' com termo fonte envolvendo velocidades. O algoritmo SIMPLE usa uma relação de correção entre velocidade e pressão e garante que a conservação de massa seja satisfeita (Maliska, 2004).

4.8.6 O avanço no tempo

No método de resolução segregado, de acordo com Fluent 6.3 (2006), o erro total de discretização do tempo é determinado pela escolha da discretização temporal (por exemplo, primeira ordem e segunda ordem) e também pela forma em que as soluções são avançadas à próxima etapa (esquemas de avanço do tempo). Há duas aproximações para o esquema de avanço do tempo: iterativo e não iterativo. Neste trabalho foi utilizado o esquema de avanço iterativo no tempo onde todas as equações são resolvidas iterativamente, para um determinado passo de tempo, até que os critérios de convergência sejam obtidos. Assim o avanço da solução em passo de tempo exige iterações externas. O número máximo de iterações a cada avanço no tempo empregado neste trabalho foi de 200.

O esquema iterativo do avanço no tempo exige um esforço computacional considerável devido a um grande número de iterações externas executadas em cada passo de tempo (Fluent 6.3, 2006).

5 VERIFICAÇÃO DO MODELO

5.1 Variáveis de interesse

As sondas de medição e suas devidas posições no domínio computacional são definidas e apresentadas na Fig. 5.1. Estando as sondas *A* e *B* a uma distância de 37,60 m e 73,20 m, respectivamente, do gerador de ondas, enquanto que a posição das sondas *E*, *F* e *G* é variável, devido a configuração geométrica da câmara do dispositivo CAO. É medida a elevação da superfície livre da água ao longo do tempo, através de linhas verticais nas sondas (*A*, *B*, *E*, *F* e *G*). Essa medida deve ser feita considerando a opção integral do FLUENT que é calculada numericamente através da seguinte equação:

$$\int \phi dA = \sum_{i=1}^n \phi_i |A_i| \quad (5.1)$$

onde ϕ_i é um campo variável, que representa a quantidade de água em cada volume e A_i é a área de cada volume (que neste caso, por ser uma linha, torna-se o comprimento de cada volume).

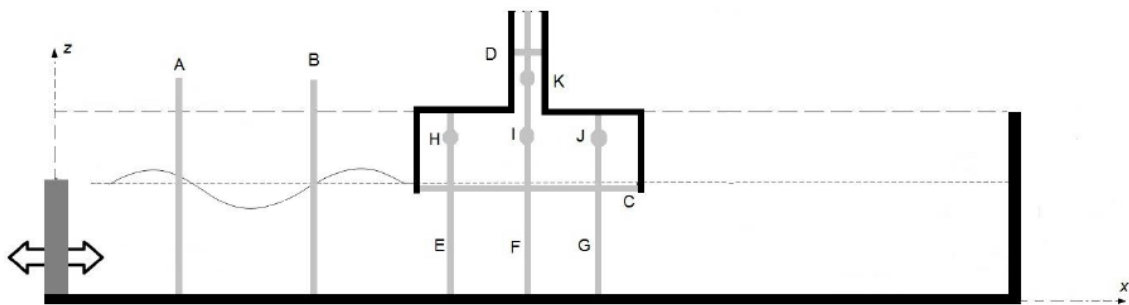


Figura 5.1 – Representação do domínio computacional com as sondas de medição (Adaptado Gomes, 2014).

Já a vazão volumétrica é medida através da sonda *C*, uma linha horizontal, que se encontra na entrada da câmara CAO (ver Fig. 5.1). No centro da chaminé do dispositivo CAO

está localizada a sonda D (ver Fig. 5.1), onde é medida a pressão estática, considerada aqui através da seguinte média ponderada, que já foi utilizada por (Gomes, 2014):

$$\frac{1}{A} \int \phi dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \phi_i |A_i| \quad (5.2)$$

onde considera-se ϕ o campo variável denominado neste caso de pressão estática p_e , A é a área da superfície medida (m^2) e n é o número de volumes.

A pressão estática pode ser calculada através da seguinte expressão (Halliday et al., 2009):

$$p_e = p_t - p_d \quad (5.3)$$

sendo p_t a pressão total (Pa) e p_d a pressão dinâmica (Pa), que pode ser obtida através da expressão (Halliday et al., 2009):

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (5.4)$$

A vazão mássica é calculada numericamente na sonda D , através da equação que já foi utilizada por (Gomes, 2014):

$$\int \rho \vec{v} d\vec{A} = \sum_{i=1}^n \rho_i \vec{v}_i \vec{A}_i \quad (5.5)$$

onde ρ é a massa específica do ar (kg/m^3), v a velocidade na direção y e A é a área da superfície (m^2) que é atravessada pela vazão mássica.

As sondas H , I , J e K são pontos onde é medida a pressão total. Para calcular os valores médios, é empregada a média RMS, muito utilizada para problemas transientes através da equação indicada por Marjani et al. (2006):

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T b^2 dt} \quad (5.6)$$

sendo T o período da onda (s) e b é a variável da média RMS.

Ao longo do presente trabalho foi considerada como função objetivo a potência hidropneumática. Cabe ressaltar que para a análise desta grandeza foi utilizada a média transiente RMS. A potência hidropneumática pode ser calculada através da seguinte expressão, utilizada por Dizadji e Sajadian (2011) e Oliveira et al. (2012),

$$P_{hid} = \left(p_e + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (5.7)$$

sendo que p_e é a pressão estática (Pa) na chaminé do dispositivo CAO, ρ_{ar} é a massa específica do ar (kg/m^3), $\dot{m}$ é a vazão mássica de ar (kg/s) no duto da turbina, A é a área da superfície (m^2) que é atravessada pela vazão mássica de ar, e v_{ar} é a velocidade do ar (m/s) no duto da turbina que pode ser expressa pela seguinte expressão que foi utilizada por (Gomes, 2014):

$$v_{ar} = \frac{\dot{m}}{A\rho_{ar}} \quad (5.8)$$

5.1 Verificação do modelo computacional

Verificação é o processo usado para quantificar o erro numérico. Ele mede o quão bem o modelo matemático é resolvido numericamente. Não tem como objetivo o fenômeno real. É um processo puramente matemático (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Em projetos de pesquisa e desenvolvimento na engenharia esse recurso de verificação é muito utilizado, com a finalidade de ajustar o modelo numérico.

O processo de verificação da simulação numérica da propagação de ondas regulares em tanque de ondas, consiste de comparar, a elevação da superfície livre (η) ao longo do

tempo, isto é, a distância instantânea da superfície livre ao plano médio do nível da água, com a equação analítica para a elevação da superfície livre, dada por (Farina, 2006):

$$\eta = a \cos(kx - \omega t) + \left(\frac{a^2 k \cosh(kh)}{4 \sinh(kh)^3} \right) [(2 + \cosh(2kh))] \cos 2(kx - \omega t) \quad (5.9)$$

sendo a amplitude da onda (m), k número de onda (m^{-1}), x posição espacial (m), ω frequência da onda (s^{-1}), t tempo (s) e h profundidade da onda bem definida (m).

As características da onda em escala real empregada no presente trabalho são: altura da onda $H = 1,00$ m, profundidade da superfície livre $h = 10,00$ m, comprimento da onda $\lambda = 37,60$ m e período da onda $T = 5$ s.

Cabe destacar que as dimensões do tanque de ondas utilizado são as apresentadas na Tab. 5.1.

Tabela 5.1 Características do tanque de ondas e da câmara CAO.

Características	Valores
Comprimento do tanque (C_T)	188,0 m
Altura do tanque (H_T)	13,0 m
Profundidade de submersão (H_3)	9,5 m
H_2/l	3,0
Comprimento da câmara CAO (L)	não é fixo
Comprimento da saída da chaminé (l)	não é fixo
Altura da câmara CAO (H_1)	não é fixo
Altura da chaminé (H_2)	não é fixo

Neste trabalho é utilizada uma malha estruturada disposta em quadriláteros 2D, o teste

de independência de malha não é realizado por seguir uma recomendação da literatura. Em Barreiro (2009) e Gomes et al. (2012a) é apresentado um estudo detalhado a respeito da geração de malhas do tipo *stretched* para a simulação numérica da propagação de ondas regulares em tanques.

A metodologia baseada na técnica de malhas *stretched*, consiste em gerar uma malha mais refinada em determinadas regiões de interesse no domínio computacional, como por exemplo, a superfície livre (Mavripilis, 1997).

Ao definir as dimensões de cada volume da malha dividindo a dimensão da região pelo número de volumes desejado é possível apresentar o número mínimo de volumes por característica da onda, comprimento e altura, de forma a assegurar a acurácia da solução (Gomes, 2012a).

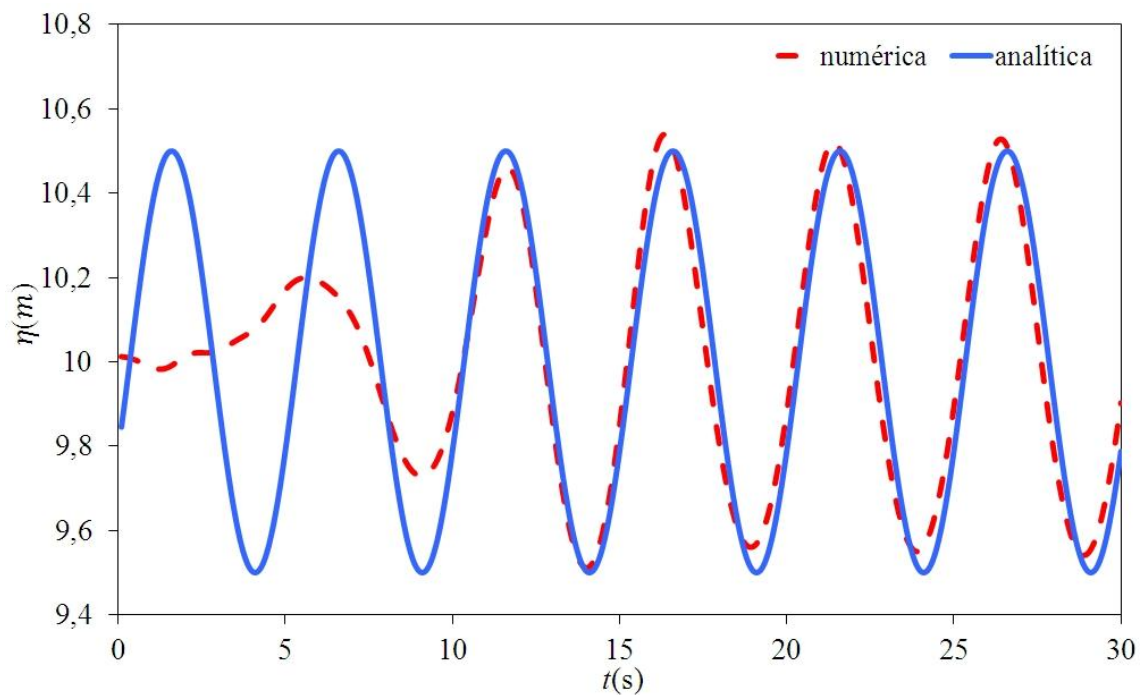


Figura 5.2 - Elevação da superfície livre para a sonda A em $x = 37,6$ m com passo de tempo $T/500$.

É possível observar na Fig. 5.2 a elevação da superfície livre da água para a sonda A (ver Fig. 5.1), que encontra-se na posição $x = 37,60$ m, onde é realizada a comparação entre a solução numérica no tanque de ondas e a solução analítica dada pela Eq. (5.9).

Como é possível observar na Fig. 5.2 a estabilização da geração da onda numérica, ou seja, o intervalo onde a mesma conserva suas características de crista e cava bem definidas, ocorre a partir de $t = 15$ s. Nota-se que entre o intervalo de 0 s e 15 s a onda gerada numericamente não apresenta as características de cava e crista bem definidas, este fato ocorre porque a água, que inicialmente estava em repouso, com o movimento do gerador de ondas passa a fazer com que o fluido (água) saia da inércia.

É possível calcular o erro médio em cada instante de tempo através de uma média aritmética referente ao erro relativo calculado, sempre após o momento em que a geração da onda numérica estabiliza, neste caso entre 15 s e 30 s. Pela comparação das soluções ao longo do tempo obtém-se o erro máximo, isto é, o maior valor encontrado na expressão do erro relativo a partir do momento em que a geração da onda numérica estabiliza. Lembrando que a solução analítica para esses cálculos de erro é considerada como referência. O erro médio obtido é de 0,09% apresentando uma boa conformidade entre os resultados, o erro máximo é de 1,54%. Esta metodologia utilizada para calcular os erros já foi usada, em (Gomes, 2010).

Calcula-se o erro relativo em módulo, isto é, a diferença entre a solução analítica e numérica para a variação da superfície livre através da seguinte expressão (Gomes, 1999):

$$E_R = \left| \frac{x' - x_n}{x_n} \right| \quad (5.10)$$

sendo x' o valor exato (solução analítica) e x_n o valor obtido pela solução numérica.

A comparação da elevação da superfície livre de água para a sonda B (ver Fig. 5.1), na solução analítica e numérica pode ser observado na Fig. 5.3.

A estabilização da geração da onda numérica para a sonda B, ocorre a partir de $t = 23$ s. A sonda B está localizada a uma distância de 73,20 m do gerador de ondas, ou seja, próximo a dois comprimentos de onda (75,20 m), enquanto que a sonda A está a 37,60 m do gerador de ondas, isto é, um comprimento de onda. Isto justifica a sonda B não ter a mesma estabilidade da sonda A. O erro médio calculado na sonda B é de 0,22 % e o erro máximo é de 1,63%.

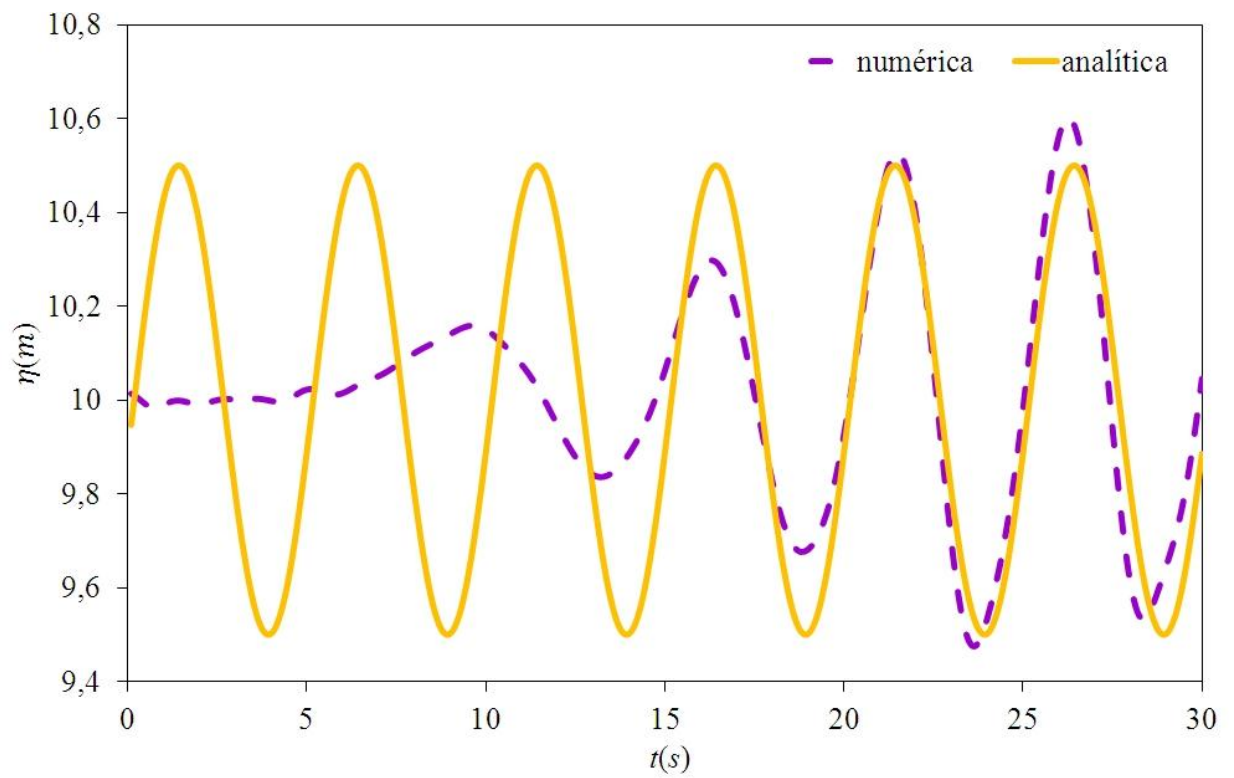


Figura 5.3 - Elevação da superfície livre para a sonda B em $x = 73,2$ m com passo de tempo $T/500$.

6 RESULTADOS

A proposta deste trabalho é aplicar Design Construtal, em um sistema de conversão de energia das ondas regulares em energia elétrica do tipo CAO, de modo, a avaliar a influência da configuração geométrica em sua potência hidropneumática. Além disso, aliando a modelagem computacional e o método de busca exaustiva será testado todas as configurações geométricas possíveis propostas pelo método Design Construtal, permitindo a determinação da geometria ótima que conduz à potência hidropneumática máxima do conversor CAO.

A relação do volume de entrada da câmara hidropneumática do dispositivo do tipo CAO (V_E) pelo volume total do dispositivo do tipo CAO (V_T) são as restrições geométricas do problema. Para a relação V_E/V_T , foram analisados nove diferentes valores. O volume de entrada da câmara hidropneumática V_E permanece constante e o que varia é o volume total do dispositivo CAO, alterando assim a relação V_E/V_T . Cabe destacar que o objetivo é analisar esta influência no desempenho do dispositivo CAO. Ainda é analisado o grau de liberdade H_1/L (razão entre a altura H_1 e o comprimento da câmara hidropneumática L). A relação H_2/l (razão entre a altura H_2 e o comprimento da chaminé l) e H_3 (profundidade de submersão da câmara hidropneumática) foram mantidas constantes.

6.1 Influência da razão entre o volume de entrada da câmara hidropneumática e o volume total do dispositivo CAO

Para uma onda com período $T = 5$ s foi realizado um estudo numérico a fim de encontrar uma geometria ótima, isto é, aquela que conduz a maior potência hidropneumática para o dispositivo conversor de energia das ondas regulares em energia elétrica do tipo CAO.

No presente trabalho foram testados os valores 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 e 0,9 para a relação V_E/V_T , essa relação pode ser calculada considerando as Eqs. 3.1 e 3.3. Para cada uma dessas relações foram consideradas dez diferentes configurações geométricas de H_1/L (foram testados os mesmos valores de H_1/L para todas as relações de V_E/V_T). Assim foram realizadas noventa simulações. A relação H_1/L pode ser calculada considerando as Eqs.

3.4 e 3.5. Na Tab. 6.1, é possível observar as dimensões geométricas e os valores de H_1/L usados nas simulações indicadas na Fig. 6.1.

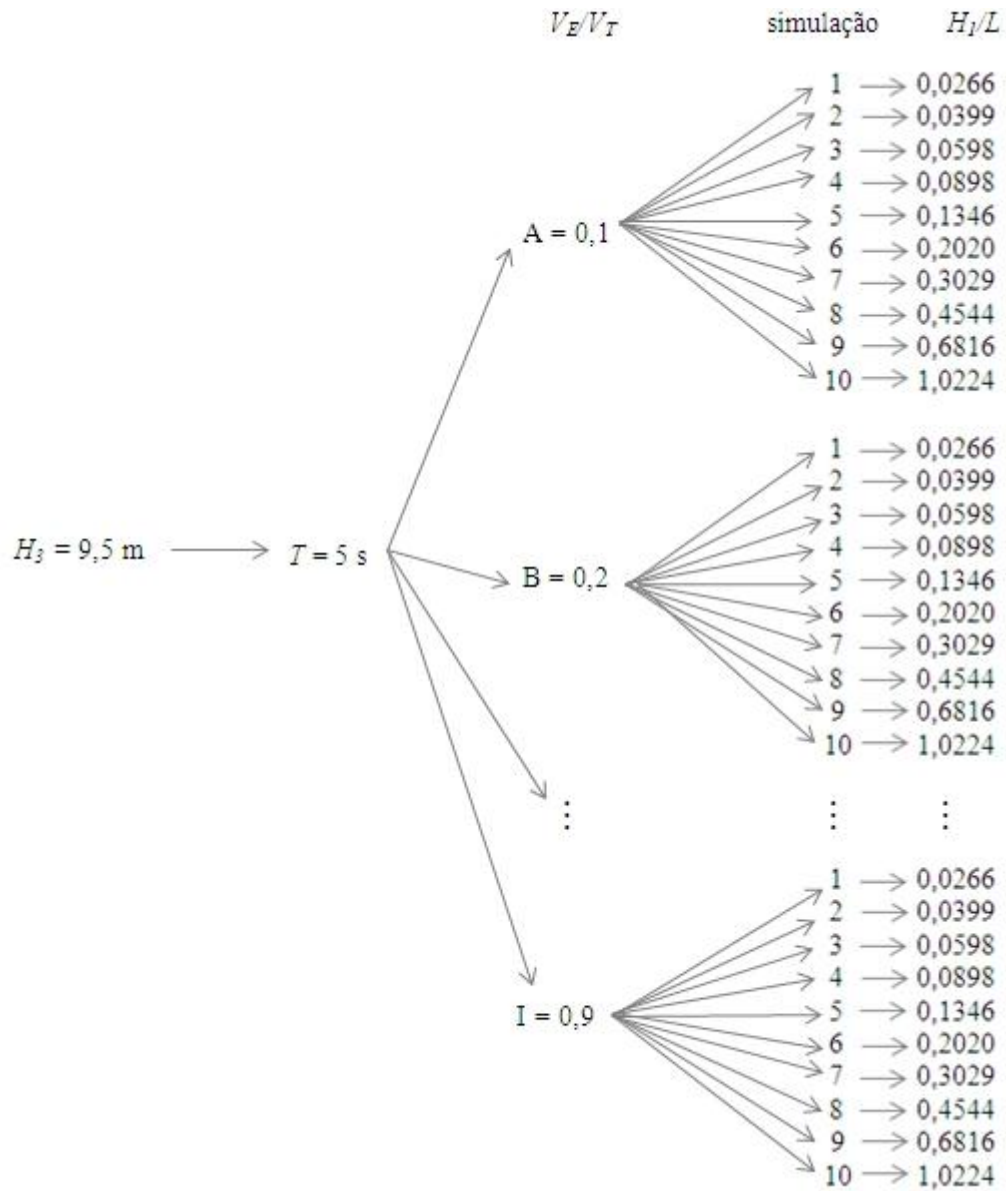


Figura 6.1 - Esquema representativo das variações geométricas testadas.

Os valores de l considerando a Eq. (3.6) e H_2 considerando a Eq. (3.7) são variados para cada relação V_E/V_T , conforme Tab. 6.1. Mas a relação H_2/l é fixa e igual a três.

Tabela 6.1 - Dimensões geométricas do dispositivo CAO.

CASOS (simulação)	H_1/L	L – comprimento da câmara CAO (m)	H_1 – Altura da câmara CAO (m)	CASOS V_E/V_T	l – comprimento da chaminé (m)	H_2 - altura da chaminé (m)
1	0,0266	37,6000	1,0000	A = 0,10	10,6207	31,8622
2	0,0399	30,7003	1,2247	B = 0,20	7,0805	21,2415
3	0,0598	25,0667	1,5000	C = 0,30	5,4078	16,2234
4	0,0898	20,4668	1,8371	D = 0,40	4,3359	13,0077
5	0,1346	16,7111	2,2500	E = 0,50	3,5402	10,6207
6	0,2020	13,6446	2,7557	F = 0,60	2,8906	8,6718
7	0,3029	11,1407	3,3750	G = 0,70	2,3176	6,9529
8	0,4544	9,0964	4,1335	H = 0,80	1,7701	5,3104
9	0,6816	7,4272	5,0625	I = 0,90	1,1801	3,5402
10	1,0224	6,0643	6,2003	J = 1,0	0,0000	0,0000

É possível observar na Fig. 6.2 o comportamento da potência hidropneumática para cada valor da relação H_1/L e para diferentes relações de V_E/V_T . Para cada uma das relações de V_E/V_T é considerado o mesmo grau de liberdade H_1/L em todas as simulações.

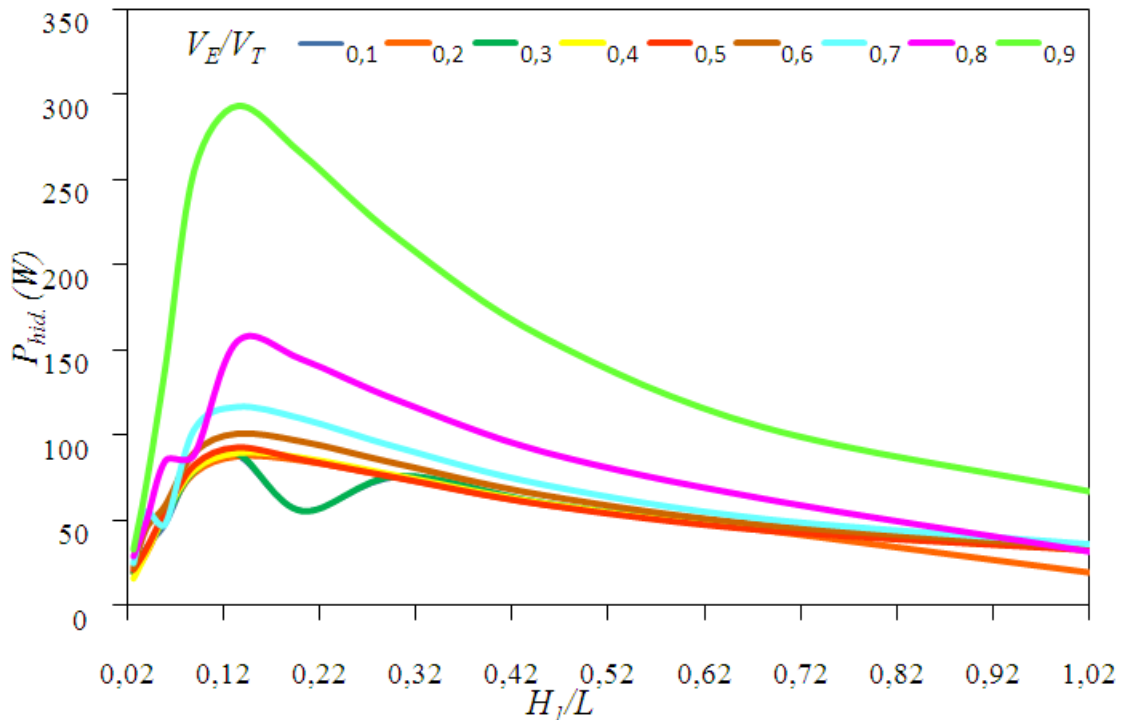


Figura 6.2 -Potência Hidropneumática para todos os casos de V_E/V_T .

Nota-se na Fig. 6.3 que a maior potência hidropneumática $P_{hid} = 293,0870$ W está na relação $V_E/V_T = 0,9$ (caso I) quando $H_1/L = 0,1346$ (na simulação 5, ou seja I5), e a menor potência hidropneumática $P_{hid} = 15,8637$ W para a relação $V_E/V_T = 0,4$ (caso D) quando $H_1/L = 0,0266$ (na simulação 1, ou seja D1).

Comparando o caso I5, a maior potência hidropneumática ($H_1/L = 0,1346$ e $P_{hid} = 293,0870$ W), com o caso D1, a menor potência hidropneumática ($H_1/L = 0,0266$ e $P_{hid} = 15,8637$ W), observa-se que no caso I5, o diâmetro da chaminé mede $l = 1,1801$ m e a altura da chaminé é $H_2 = 3,5402$ m, é possível observar os valores para as dimensões geométricas da chaminé na Tab. 6.1. Entre todos os casos estudados, no caso I encontra-se a chaminé com o menor diâmetro, o que influencia diretamente no aumento da pressão dentro do dispositivo do tipo CAO. A incidência da onda dentro da câmara hidropneumática faz com que a pressão dentro da câmara aumente e, por consequência, ocorre também um aumento da potência hidropneumática, uma vez que ela depende da pressão e da vazão mássica, vide a Eq. (5.7). E no caso D o diâmetro da chaminé é $l = 4,3359$ m e a altura da chaminé mede $H_2 = 13,0077$ m, nesse caso, o diâmetro e a altura da chaminé aumentam em relação ao caso I, logo diminui a

pressão dentro da câmara hidropneumática e, conseqüentemente, diminui a potência hidropneumática. Ao comparar a maior potência hidropneumática ($P_{hid} = 293,0870$ W) com a menor potência hidropneumática ($P_{hid} = 15,8637$ W), o resultado é considerado muito significativo, pois a potência hidropneumática ótima é aproximadamente 18,48 vezes maior em relação a menor potência.

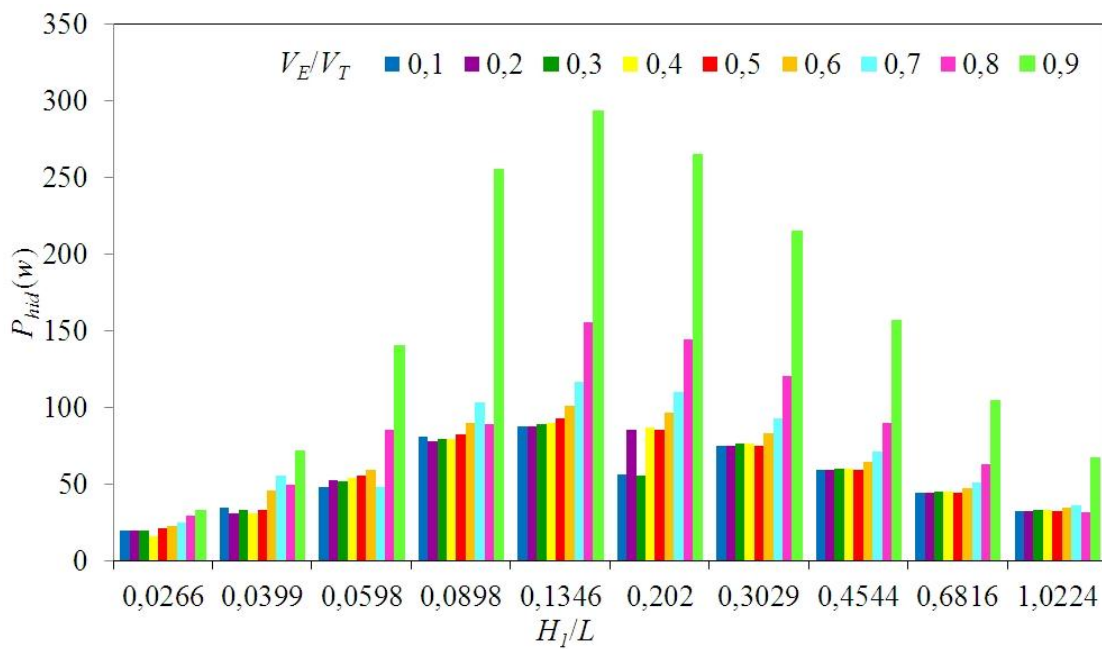


Figura 6.3 - Potência Hidropneumática para todos os casos de V_E/V_T .

Como já foi dito, esse estudo dá continuidade ao estudo realizado por Gomes (2014), para uma onda $T = 5$ s, $\lambda = 37,60$ m, $H = 1,0$ m, $h = 10$ m e $C_T = 188$ m. Gomes (2014) considerou fixo a relação $V_E/V_T = 0,7$ e analisou seis valores diferentes para H_3 . O presente estudo foi realizado para o $H_3 = 9,5$ m (considerado o H_3 ótimo no estudo de Gomes), e foram considerados nove valores diferentes para a relação V_E/V_T .

Comparando os resultados obtidos no presente trabalho com os de Gomes (2014) temos: neste estudo a relação $(H_1/L)_o = 0,1346$ e a $(P_{hid})_{máx.} = 293,0870$ W e a relação V_E/V_T considerada ótima foi $V_E/V_T = 0,9$. Gomes (2014) para a relação $V_E/V_T = 0,7$, obteve a relação $(H_1/L)_{o,o} = 0,1346$ e a potência hidropneumática, otimizada duas vezes $((P_{hid. máx.})_{máx.}) = 116,43$ W. Através da comparação de ambos os trabalhos observa-se que a relação V_E/V_T , tem uma influência expressiva no resultado para a potência hidropneumática.

É possível observar na Fig. 6.4 a potência máxima para cada uma das razões V_E/V_T (a compilação dos casos ótimos da Fig. 6.2). Nota-se que a potência hidropneumática ótima encontra-se para o $V_E/V_T = 0,9$ (caso I), quando a $(P_{hid})_o = 293,0870$ W e o pior caso (na potência máxima) é quando $V_E/V_T = 0,2$ (caso B) e $P_{hid} = 87,5218$ W. Considerando o volume de entrada ($V_E = 37,60$ m³) constante e o volume total (V_T) variável, conforme diminui o valor para V_T aumenta o valor para a relação V_E/V_T . Ao se aproximar de 1 o valor para a relação V_E/V_T , em tese, a pressão aumentaria e a potência também, porém ocorre um aumento elevado na pressão que causa um bloqueio no escoamento.

A maior potência hidropneumática é aproximadamente 3,35 vezes superior a menor potência hidropneumática, essa comparação é feita entre as potências máximas de cada relação de V_E/V_T . Considerando as Figs. 6.2 e 6.3 a potência hidropneumática é máxima quando $H_1/L = 0,1346$, sendo assim, $H_1/L = 0,1346$ é considerado um ótimo universal para os parâmetros estudados no presente trabalho.

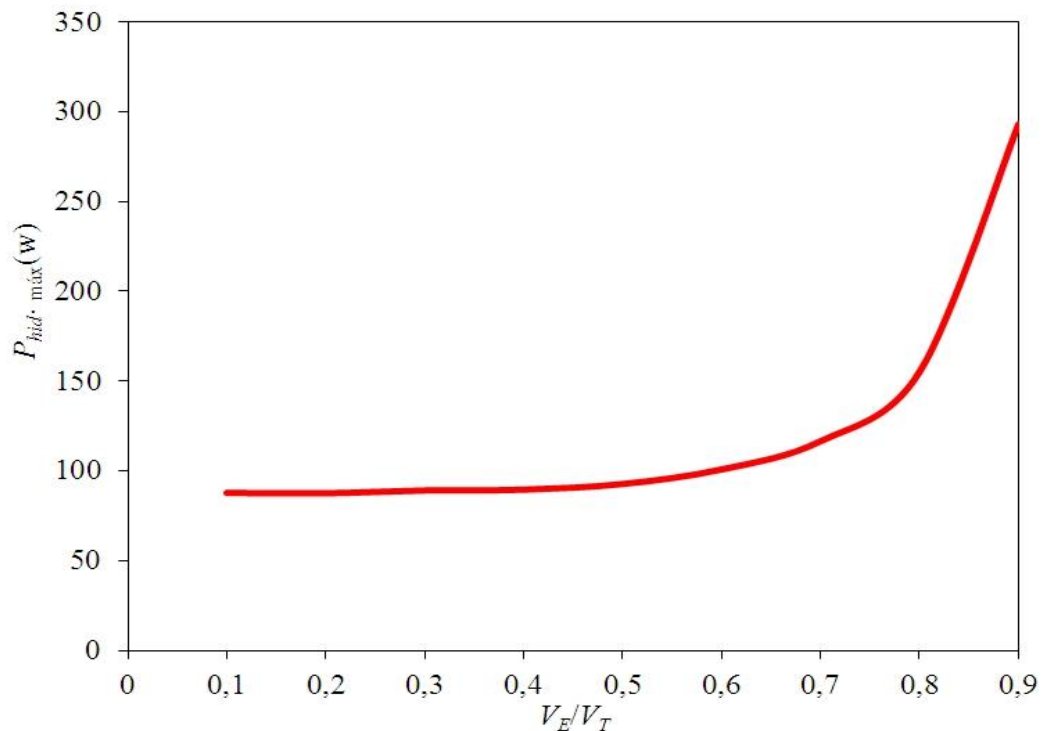


Figura 6.4 - Potência Hidropneumática máxima em cada relação de V_E/V_T .

Ainda é possível observar na Fig. 6.5 que os valores médios (RMS) mínimos, para potência hidropneumática são obtidos para todas as relações de V_E/V_T , para o mesmo valor de H_1/L , ou seja, $(H_1/L) = 0,0266$ (simulação 1) e o valor mínimo da potência hidropneumática é obtido no $V_E/V_T = 0,4$, isto é, caso D, $(P_{hid})_{\min} = 15,8637$ W.

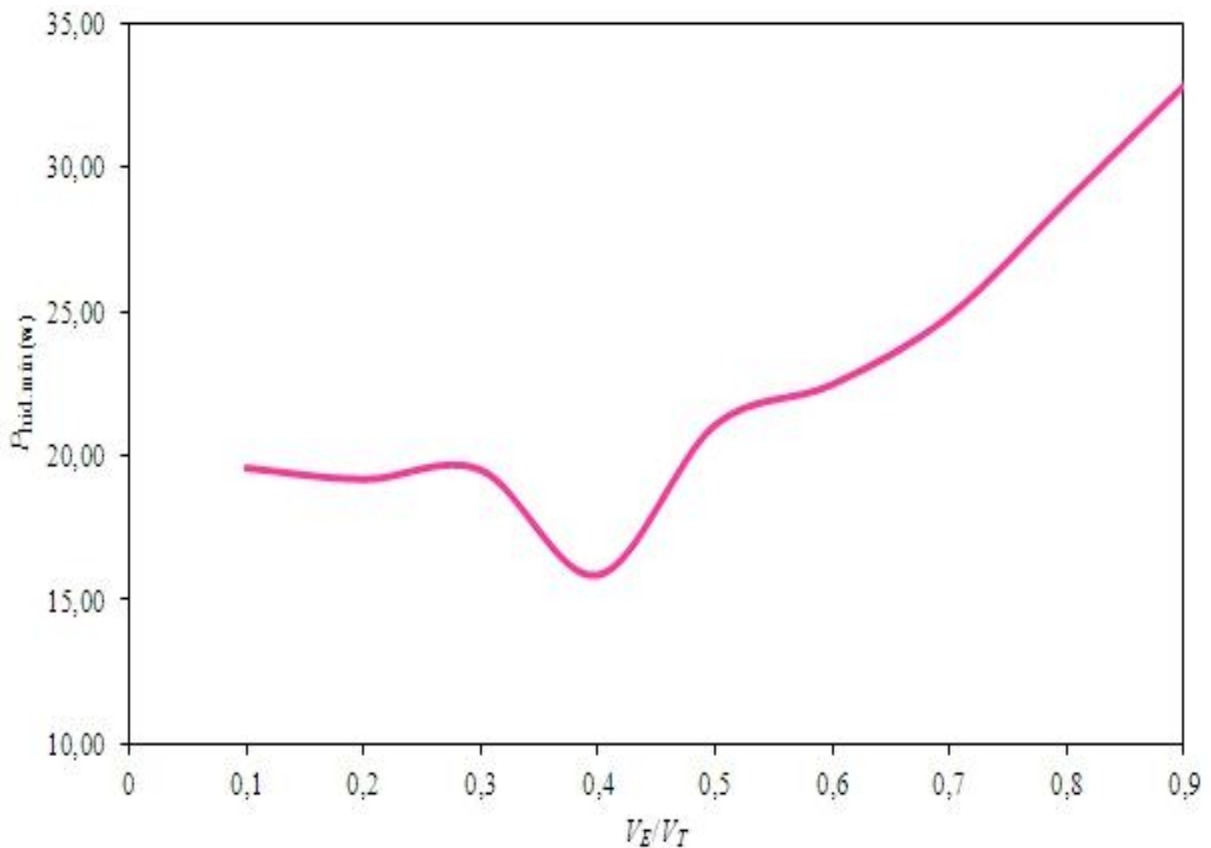


Figura 6.5 - Valores mínimos para potência hidropneumática em $H_1/L = 0,0266$.

Na Tabela 6.2 é possível ainda observar os valores mínimos e máximos para a vazão mássica e potência hidropneumática em cada relação V_E/V_T . O valor mínimo para vazão mássica encontra-se em $V_E/V_T = 0,3$ (caso C), $\dot{m}_{\min} = 6,1317$ kg/s e a potência hidropneumática está em $V_E/V_T = 0,4$ (caso D), $P_{hid.min.} = 15,8637$ W, o valor mínimo para a vazão mássica e a potência hidropneumática é encontrado na relação $H_1/L = 0,0266$ (simulação 1). E o valor máximo para a vazão mássica está em $V_E/V_T = 0,1$ (caso A), $\dot{m}_{\max} = 15,2653$ kg/s e a potência hidropneumática encontra-se em $V_E/V_T = 0,9$ (caso I), $P_{hid.máx.} =$

293,0870 W, o valor máximo para a vazão mássica e a potência hidropneumática estão em $H_1/L = 0,1346$ (simulação 5) para todas as relações de V_E/V_T .

Observa-se na Fig. 6.6 que os valores médios (RMS) máximos da potência hidropneumática são obtidos para todas as relações de V_E/V_T , para o mesmo valor de H_1/L , ou seja, $(H_1/L)_o = 0,1346$. E os valores médios (RMS) mínimos da potência hidropneumática são obtidos para todas as relações de V_E/V_T , para o mesmo valor de H_1/L , ou seja, $(H_1/L) = 0,0266$, considerada a pior geometria.

A partir desse estudo numérico é possível definir a geometria ótima, isto é, aquela que conduz a maior potência hidropneumática para o dispositivo conversor de energia do tipo CAO. Logo, a geometria $(H_1/L)_o = 0,1346$ (ver Fig. 6.3) considerada a geometria ótima, é um valor universal para esta relação.

Tabela 6.2 - Comparação entre os resultados de vazão mássica e potência para cada relação V_E/V_T .

V_E/V_T (caso)	Vazão Mássica (kg/s)		Potência (W)	
	mínimo	máximo	mínimo	Máximo
A = 0,1	6,1903	15,2653	19,5798	87,7325
B = 0,2	6,1787	15,2574	19,1828	87,5218
C = 0,3	6,1317	15,2468	19,5152	89,1107
D = 0,4	6,4197	15,2450	15,8637	89,5494
E = 0,5	6,2951	15,2352	21,0637	94,1715
F = 0,6	6,2883	15,2324	22,4717	100,8247
G = 0,7	6,3113	15,2283	24,8601	116,5129
H = 0,8	6,2433	15,2111	28,8419	155,1045
I = 0,9	6,2096	15,1666	32,8456	293,0870

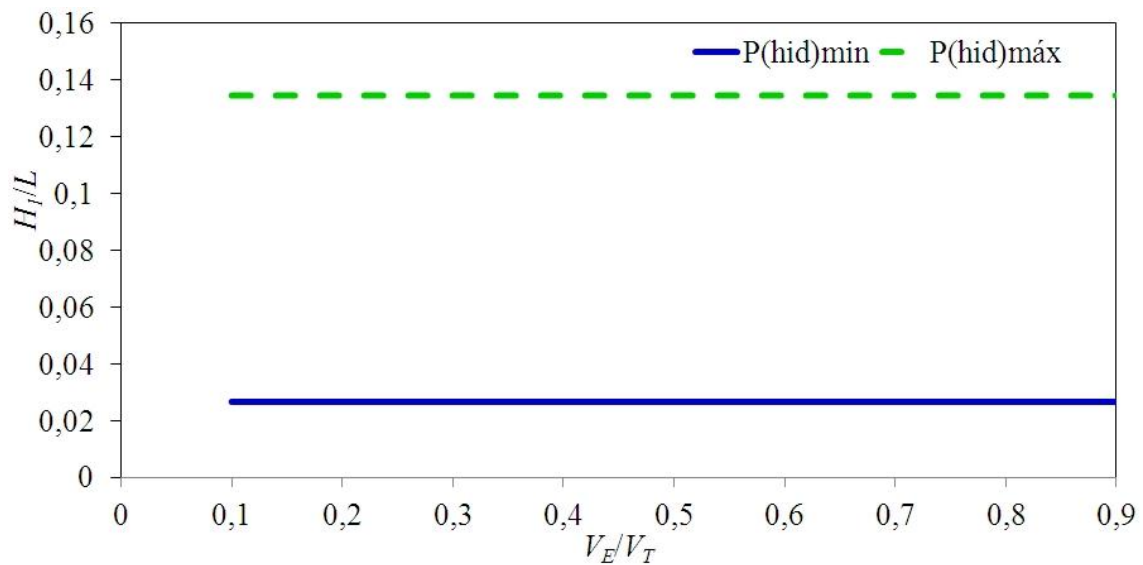


Figura 6.6 - Valores médios (RMS) máximos e mínimos da potência hidropneumática.

Foi analisada a elevação da superfície livre no interior da câmara hidropneumática para duas situações: caso ótimo $H_1/L = 0,1346$ ($H_1 = 2,2500$ m e $L = 16,7111$ m), considerada a geometria ótima, a que conduz a maior potência hidropneumática ao dispositivo conversor de energia do tipo CAO, e o pior caso $H_1/L = 0,0266$ ($H_1 = 1,00$ m e $L = 37,60$ m), a geometria que conduz a menor potência hidropneumática. Os valores para o campo de velocidades na direção vertical, para a compressão e descompressão do caso ótimo e do pior caso podem ser observados na Tab. 6.3, no período de tempo entre $t = 25$ s a $t = 30$ s.

Tabela 6.3 - Valores máximos e mínimos para o campo de velocidade do pior e melhor caso.

Melhor caso			Pior caso		
t (s)	min. (m/s)	máx. (m/s)	t (s)	min. (m/s)	máx. (m/s)
25	-3,61913	2,441059	25	-2,300915	3,804023
26	-1,872591	6,459759	26	-1,92839	4,224538
27	-2,304799	7,237843	27	-3,583731	4,119463
28	-5,664724	1,887637	28	-4,279052	3,862068
29	-6,718417	1,847638	29	-8,571548	4,6736
30	-3,425787	2,63616	30	-9,008265	5,792633

Observa-se no caso ótimo $H_1/L = 0,1346$, vide Fig. 6.7, os picos de movimentação da superfície livre no interior da câmara hidropneumática, são maiores do que os atingidos no pior caso $H_1/L = 0,0266$, vide Fig. 6.8. No caso ótimo Fig. 6.7, é analisado a elevação para a superfície livre dentro da câmara para os instantes de tempo (a) $t = 27$ s e (c) $t = 29$ s. Ainda, é possível observar, os campos de velocidade na direção vertical para os instantes de tempo (b) $t = 27$ s e (d) $t = 29$ s. A Fig. 6.8, representa o pior caso, a elevação da superfície livre é analisada para os instantes de tempo (a) $t = 25$ s e (c) $t = 30$ s, e os campos de velocidade na direção vertical são analisados para os instantes de tempo (b) $t = 25$ s e (d) $t = 30$ s.

No instante de tempo $t = 27$ s Fig. 6.7, quando se tem o maior valor para a compressão como indica a Tab. 6.3, o ar e a água possuem velocidade positiva para o escoamento na direção vertical devido à compressão, no instante em que a crista da onda está incidindo sobre a câmara hidropneumática, vide na Fig. 6.7 (a) $t = 27$ s. O ar que se encontra no interior da câmara devido à compressão é expelido para fora do dispositivo através da chaminé.

O menor valor, como indicado na Tab. 6.3, ocorre no instante de tempo $t = 29$ s, quando o ar e a água possuem velocidade negativa para o escoamento na direção vertical, o fato ocorre devido à descompressão no interior da câmara, causada pela incidência da cava da onda sobre o conversor CAO, vide Fig. 6.7 (c) $t = 29$ s, com isso, o ar da atmosfera é sugado pela chaminé do dispositivo para o seu interior. Desta forma o que determina o sentido da velocidade do ar que se localiza na entrada da chaminé é a presença da crista e da cava da onda no interior da câmara hidropneumática.

No pior caso (Fig. 6.8) o menor valor para a compressão (vide Tab. 6.3) ocorre no instante de tempo $t = 25$ s, devido a incidência da crista no dispositivo (vide Fig. 6.8 (a) $t = 25$ s) ser menor em relação aos outros instantes de tempo considerados. E para a descompressão o menor valor como indicado na Tab. 6.3, ocorre no instante de tempo $t = 30$ s, quando o ar e a água possuem velocidade negativa para o escoamento na direção vertical.

Comparando o caso ótimo com o pior caso, observa-se que a variação da geometria da entrada da câmara hidropneumática H_1/L , possibilita um melhor aproveitamento do sistema. Essa diferença entre o pior e o melhor caso está relacionada ao comprimento da câmara e a altura da câmara, estando de acordo com a teoria Construtal (Bejan e Zane, 2012) a qual afirma que para um sistema de fluxo evoluir, os acessos às suas correntes deve ser facilitado.

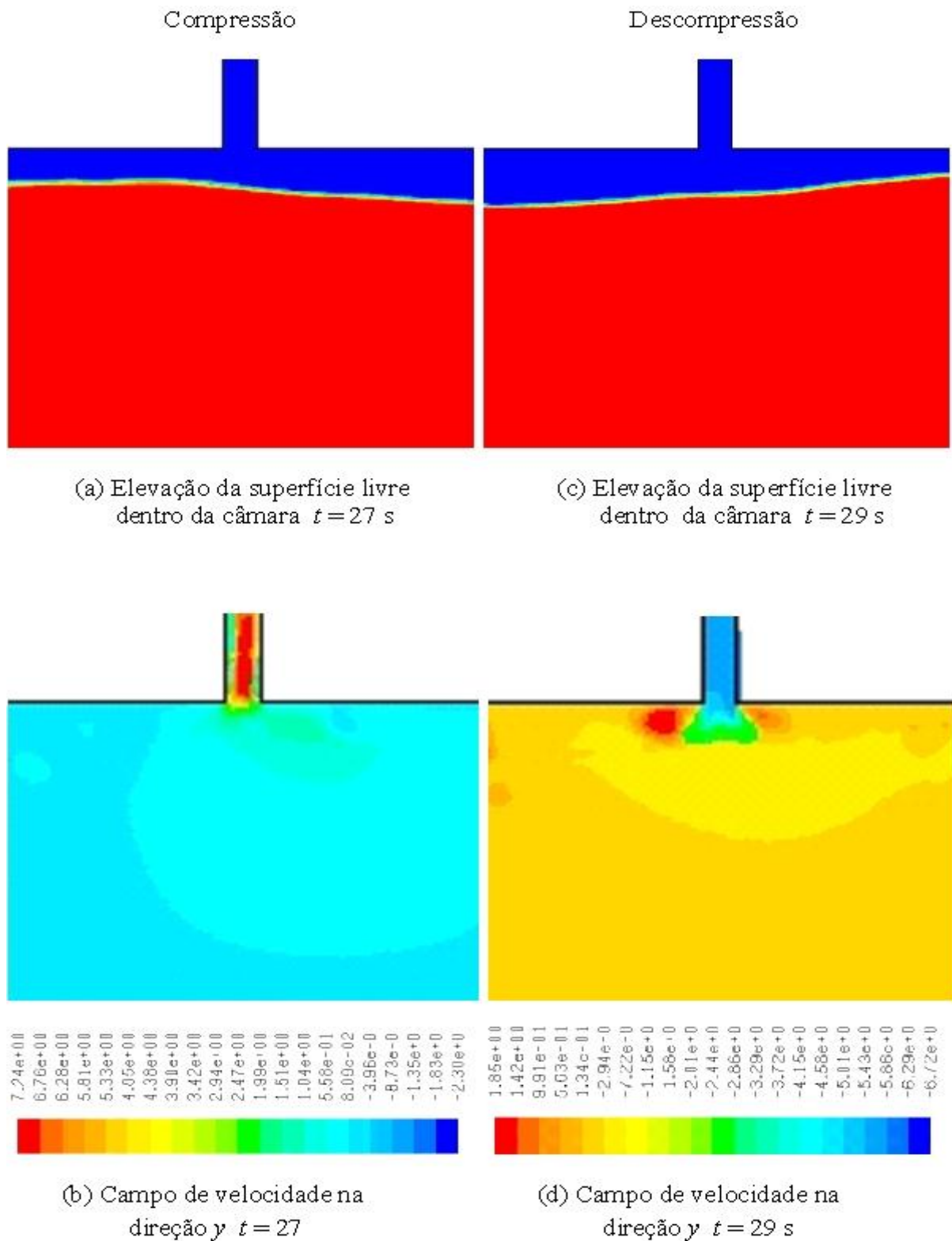


Figura 6.7 - Distribuição da velocidade na compressão e descompressão para $(H_1/L)_0 = 0,1346$ (caso ótimo).

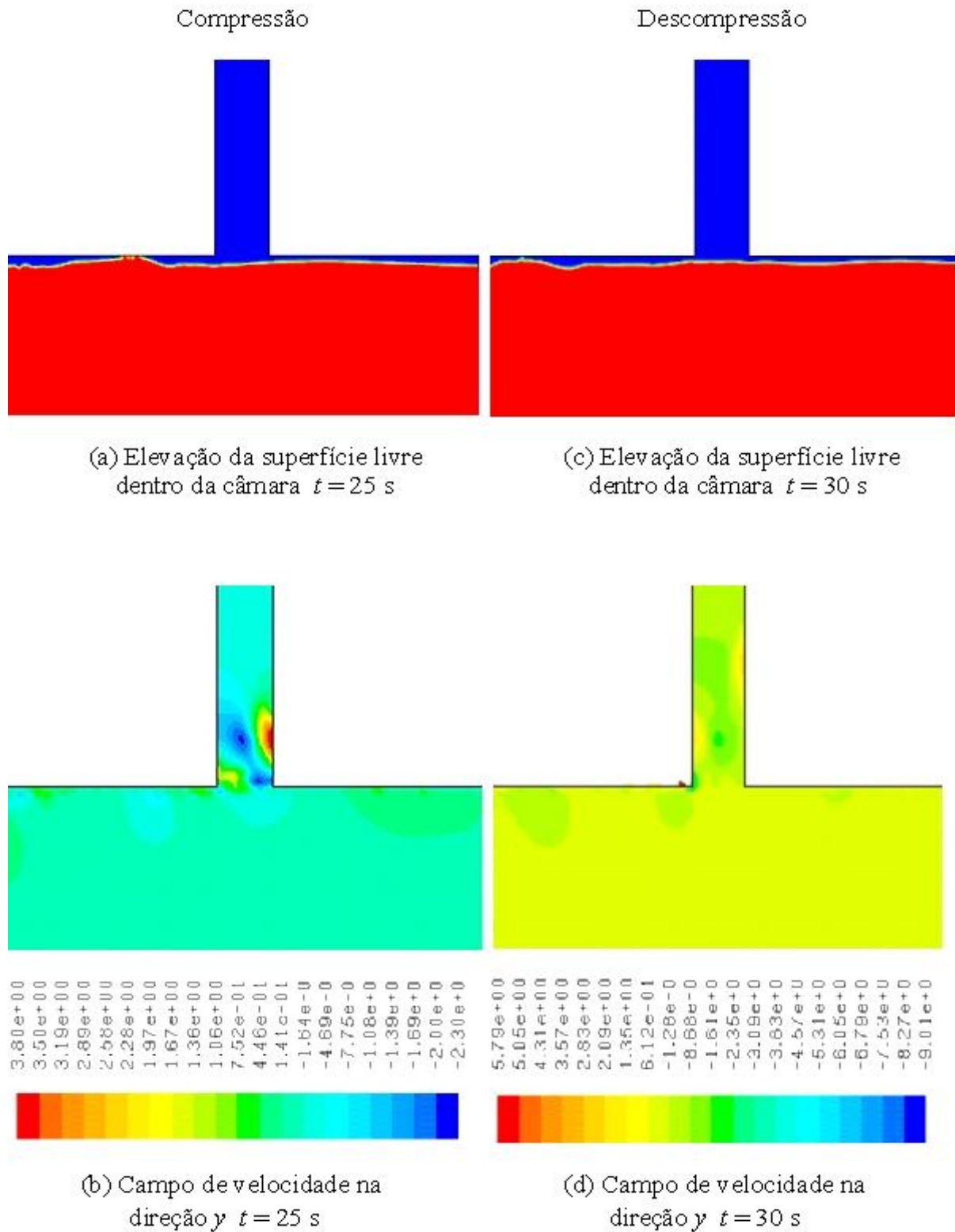


Figura 6.8 - Distribuição da velocidade na compressão e descompressão para $H_1/L = 0,0266$ (pior caso).

É possível observar na Fig. 6.3 a maior potência hidropneumática obtida para todos os casos de V_E/V_T , no grau de liberdade $H_1/L = 0,1346$, isto é, quando o comprimento da câmara é $L = 16,7111$ m e a altura da câmara hidropneumática é $H_1 = 2,2500$ m.

Como já mencionado anteriormente considera-se a situação inicial em que o comprimento da câmara hidropneumática do dispositivo CAO (L) é igual ao comprimento da onda incidente (λ) e que a altura da câmara hidropneumática (H_1) do dispositivo CAO é igual à altura da onda incidente (H). Assim se for dividido o valor do comprimento da onda incidente (λ) pelo comprimento da câmara (L) do dispositivo CAO, e ainda se for dividido a altura da câmara (H_1) do dispositivo CAO pela altura da onda incidente (H), encontra-se o valor de 2,25. Logo o comprimento ótimo da câmara hidropneumática (L_o) é aproximadamente o comprimento da onda incidente (λ) dividido por 2,25, conforme a seguinte expressão:

$$L_o \cong \frac{\lambda}{2,25} \quad (6.1)$$

E a altura ótima da câmara hidropneumática (H_1)_o é cerca de 2,25 vezes a altura da onda:

$$(H_1)_o = 2,25H \quad (6.2)$$

Considerando os valores para o campo de velocidade (vide Tab. 6.3) a compressão máxima que ocorre na geometria ótima ($H_1/L = 0,1346$), no tempo $t = 27$ s, é 24,95% maior em relação à compressão máxima que ocorre na pior geometria ($H_1/L = 0,0266$) no tempo $t = 30$ s.

Essa melhora no desempenho do dispositivo da câmara hidropneumática do tipo CAO é atribuída a alterações na dimensão da geometria da câmara, veja a comparação entre a geometria ótima ($H_1 = 2,2500$ m e $L = 16,7111$ m) Fig. 6.9, com a pior geometria ($H_1 = 1,00$ m e $L = 37,60$ m) Fig. 6.10. A partir desses resultados é possível escrever a seguinte expressão, para a relação da geometria ótima, representada na Fig. 6.9:

$$\left(\frac{H_1}{L}\right)_o \cong 5,062 \frac{H}{\lambda} \quad (6.3)$$

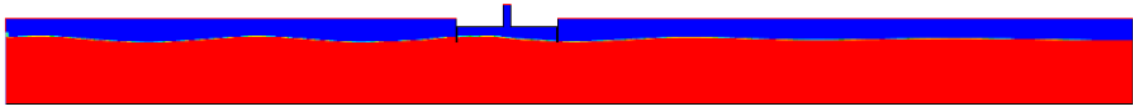


Figura 6.9 - Incidência de onda no conversor CAO no $t = 27$ s e $H_1/L = 0,1346$, melhor caso

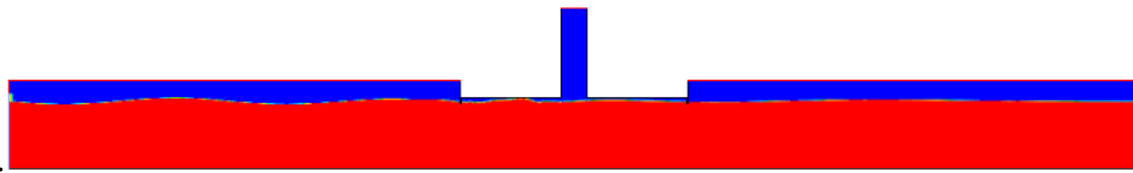


Figura 6.10 - Incidência de onda no conversor CAO no $t = 30$ s em $H_1/L = 0,0266$, pior caso

Na Fig. 6.11 é possível observar a vazão mássica em todos os casos das relações do V_E/V_T , sendo que para cada relação do V_E/V_T foi estudado dez valores (diferentes) para H_1/L (razão entre a altura da câmara hidropneumática e o comprimento da câmara hidropneumática).

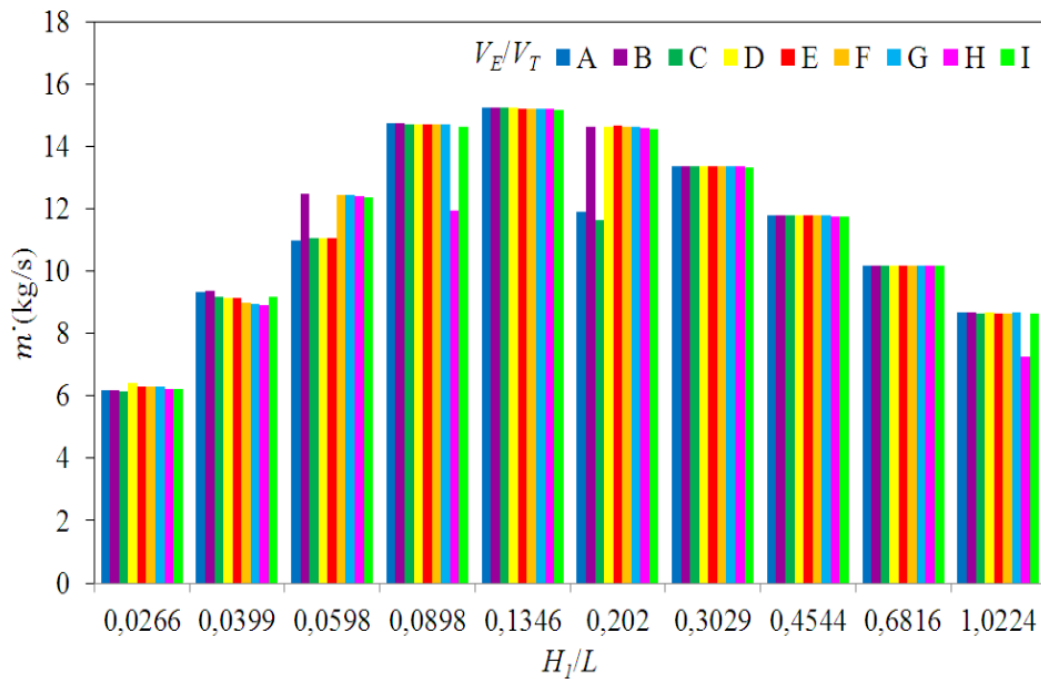


Figura 6.11 - Estudo da vazão mássica em H_1/L para as diferentes relações de V_E/V_T .

Conforme a Fig. 6.11 é possível observar a representação da vazão mássica para cada uma das nove (diferentes) relações do V_E/V_T consideradas. Sendo que no grau de liberdade $H_I/L = 0,1346$, o qual incide o melhor desempenho do conversor tipo CAO, a vazão mássica é máxima para todos os casos do V_E/V_T .

Comparando todos os casos simulados foi constatado que o $V_E/V_T = 0,1$ (caso A), possui maior quantidade de vazão mássica escoando pela chaminé ($\dot{m} = 15,2653 \text{ kg/s}$) e pode ser considerado o melhor caso, apresentando um aproveitamento em torno de 0,65 % maior em relação ao pior caso considerado, o $V_E/V_T = 0,9$ (caso I), ($\dot{m} = 15,1666 \text{ kg/s}$). Lembrando que essa comparação (pode ser observada na Fig. 6.11) é feita para a mesma geometria $H_I/L = 0,1346$, isto é, entre os melhores casos.

Como pode ser analisado na Fig. 6.11 a geometria $H_I/L = 0,1346$ é a que conduz a melhor vazão mássica de ar para todas as relações de V_E/V_T , no entanto, a pior geometria para a vazão mássica é $H_I/L = 0,0266$ para todas as relações de volume de V_E/V_T . Essa comparação entre o pior caso na geometria ($H_I/L = 0,0266$) e o caso ótimo na geometria ($H_I/L = 0,1346$) em cada relação de V_E/V_T da vazão mássica pode ser observada na Fig. 6.12.

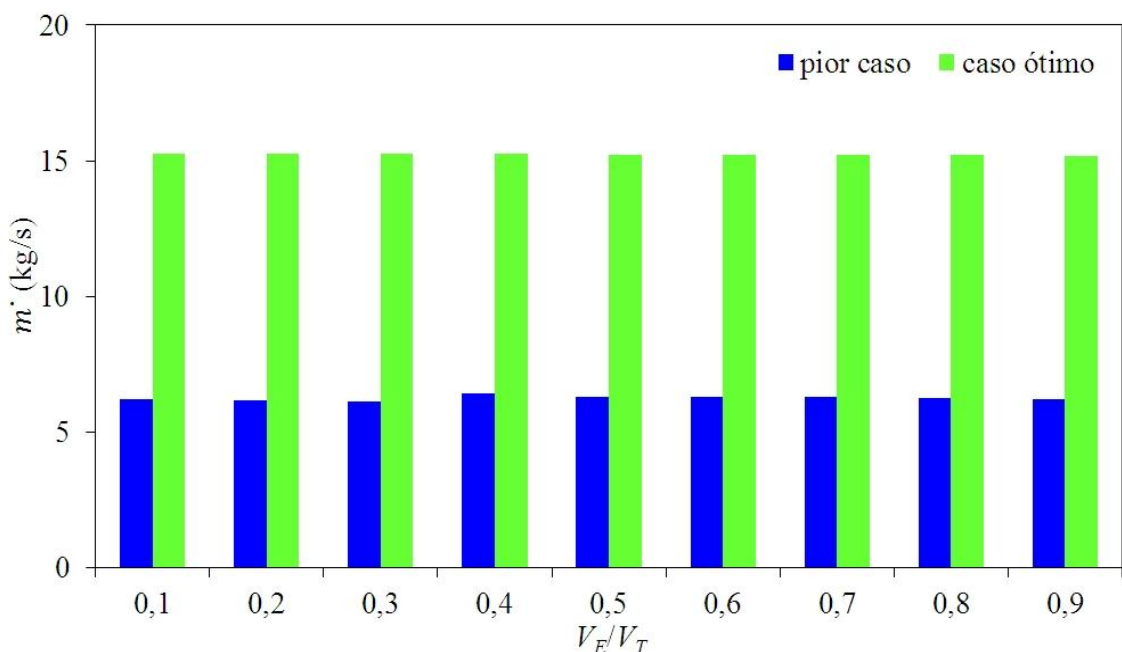


Figura 6.12 - Comparação entre os casos ótimos e piores casos de vazão mássica em todos os casos V_E/V_T .

Observando a Fig. 6.12 é possível comparar o caso ótimo $V_E/V_T = 0,1$ para $H_1/L = 0,1346$ a $\dot{m} = 15,2653$ kg/s com o pior caso $V_E/V_T = 0,3$ para $H_1/L = 0,0266$ a $\dot{m} = 6,1317$ kg/s conforme dados na Tab. 6.2. Foi constatado que a vazão mássica do caso ótimo escoando pela chaminé apresenta um aproveitamento em torno de 2,49 vezes superior em relação ao pior caso. Cabe lembrar aqui que essas comparações são para H_1/L e V_E/V_T diferentes. Esse fato pode ser atribuído ao valor de H_1/L no caso ótimo ser maior em relação ao valor de H_1/L do pior caso, com o aumento do valor de H_1/L no caso ótimo o volume de ar no interior da câmara hidropneumática aumenta, logo diminui o volume de água, e com a incidência da onda dentro do dispositivo CAO, é gerada na saída da chaminé uma maior quantidade de vazão mássica.

Alterando a relação V_E/V_T a vazão mássica não é afetada, disso conclui-se que a influência na vazão mássica está relacionada ao comprimento da câmara hidropneumática (L) em relação ao comprimento da onda (λ).

Ainda é possível observar na Fig. 6.13 a comparação da vazão mássica de ar ao longo do tempo de 30 s, para o pior caso no $V_E/V_T = 0,3$ em $H_1/L = 0,0266$ e o melhor caso no $V_E/V_T = 0,1$ em $H_1/L = 0,1346$.

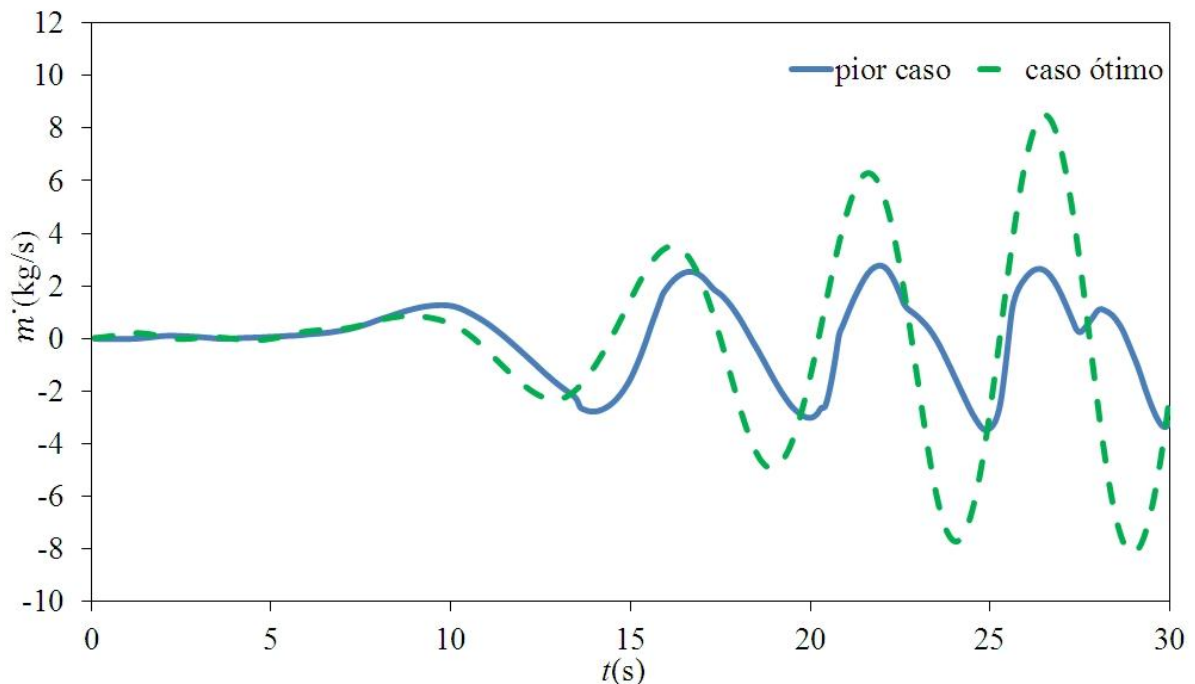


Figura 6.13 - Vazão mássica de ar ao longo do tempo de 30 s do pior e melhor caso estudado.

Observando a Fig. 6.13, nota-se um movimento oscilatório da vazão mássica no interior da câmara hidropneumática, onde ocorre a compressão e descompressão do ar, de acordo com a incidência das ondas.

No momento em que uma crista de onda atinge a câmara hidropneumática, o ar que se encontra no interior da câmara é comprimido e expulso através da chaminé para a atmosfera caracterizando uma vazão mássica positiva; o fluxo de ar que passa pela chaminé é negativo (da atmosfera para a câmara), quando uma cava da onda atinge o dispositivo do tipo CAO.

Como pode ser observado na Fig. 6.14 a pressão é analisada em todos os casos das relações do V_E/V_T , sendo que para cada relação de V_E/V_T foi estudado dez valores (diferentes) para H_1/L . Observa-se ainda que a maior pressão é obtida em $V_E/V_T = 0,9$ (caso I) para todos os valores de H_1/L . Nota-se que em $H_1/L = 0,0399$ temos o maior valor para a pressão.

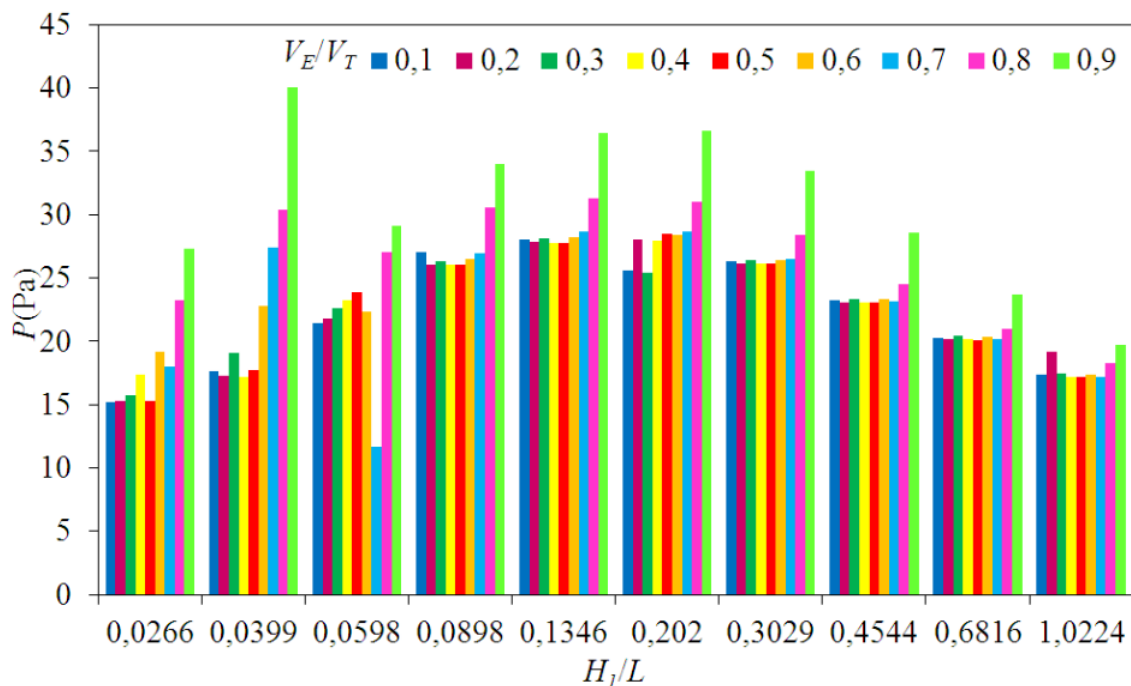


Figura 6.14 - H_1/L para pressão em todas as relações de V_E/V_T .

A comparação entre os piores casos e os melhores casos da pressão nas diferentes relações do V_E/V_T , está representada na Fig. 6.15.

O caso ótimo para a pressão é obtido na relação $V_E/V_T = 0,9$ para $H_1/L = 0,0399$ e o valor da Pressão = 40,0316 (Pa). Enquanto o pior caso, esta na relação $V_E/V_T = 0,7$ em $H_1/L =$

0,0598 sendo o valor da Pressão = 11,6458 (Pa). Conforme dados da Tab. 6.4 foi constatado que a pressão do caso ótimo, foi de um aproveitamento de 3,44 vezes maior em relação ao pior caso.

O H_l aumentou no pior caso ($H_l = 1,5000$) em relação ao caso ótimo ($H_l = 1,2247$), isso significa que aumenta o volume de ar no interior da câmara hidropneumática e diminui o volume de água. O fato de $H_l/L = 0,0598$ ser considerado o pior caso em relação a $H_l/L = 0,0399$ pode ser atribuído que no pior caso o ar terá que subir uma altura maior do que no caso ótimo, sofrendo mais perdas de ar em relação às paredes. E como o $V_E = 37,60 \text{ m}^3$ (constante) e o que varia é o V_T , e a pressão é influenciada por V_E/V_T , ao analisar as variáveis primitivas observa-se que provavelmente está relacionada ao comprimento da chaminé (l) em relação ao comprimento da câmara hidropneumática (L).

Para os casos estudados, a pressão tem uma sensibilidade maior do que a vazão mássica.

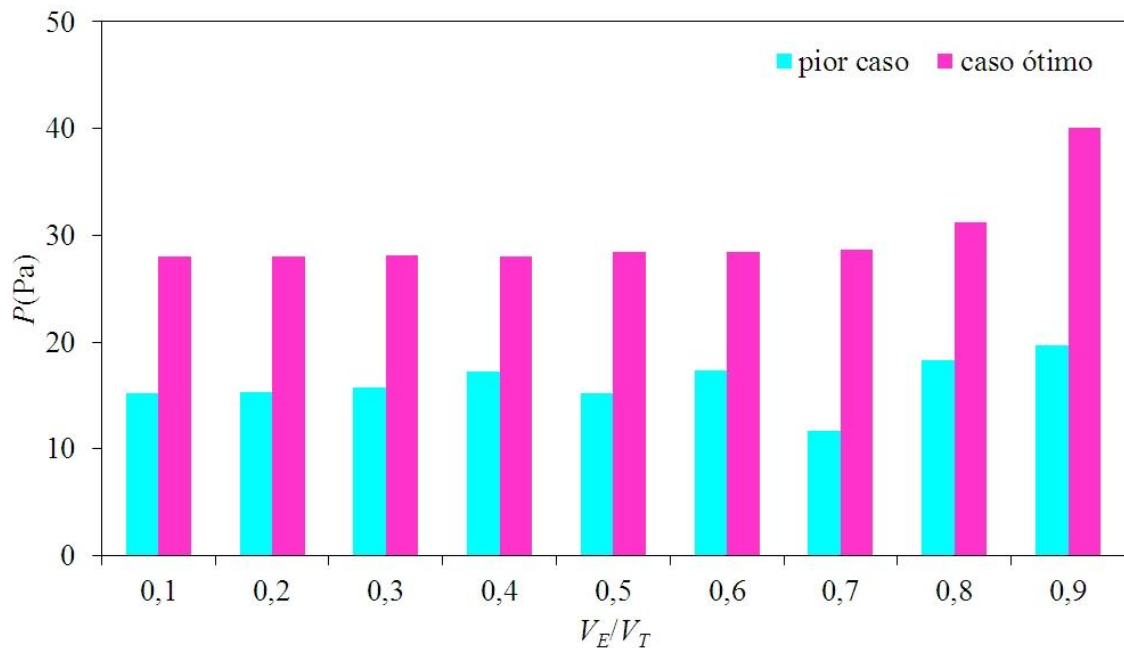


Figura 6.15 - Comparação entre o pior caso e o caso ótimo para pressão em cada V_E/V_T .

Tabela 6.4 - Pressão para os casos ótimos e os piores casos de cada V_E/V_T

V_E/V_T	Pressão (Pa) Pior caso	H_1/L	Pressão (Pa) Caso ótimo	H_1/L
0,1	15,2124	0,0266	27,9891	0,1346
0,2	15,3165	0,0266	28,0279	0,2020
0,3	15,7395	0,0266	28,1507	0,1346
0,4	17,2138	1,0224	27,9723	0,2020
0,5	15,2408	0,0266	28,4833	0,2020
0,6	17,3799	1,0224	28,3840	0,2020
0,7	11,6458	0,0598	28,6630	0,1346
0,8	18,3041	1,0224	31,2563	0,1346
0,9	19,7132	1,0224	40,0316	0,0399

7 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico de análise e otimização. Com o objetivo de avaliar a geometria que conduz ao melhor desempenho através de uma abordagem com Design Construtal aliado a um método de busca exaustiva.

A solução numérica das equações de quantidade de movimento e de conservação de massa foi obtida pelo MVF. O método VOF foi aplicado para o tratamento da interação entre as fases ar e água. Foram utilizados os softwares GAMBIT, para a construção do domínio computacional, e FLUENT, na resolução das equações governantes do problema, através do MVF.

Neste trabalho foi avaliada a influência da relação entre o volume de entrada da câmara hidropneumática (V_E) e o volume total (V_T), no desempenho do dispositivo do tipo CAO; que permite maximizar a potência do dispositivo através do Design Construtal que propôs as configurações geométricas possíveis que são avaliadas numericamente, o que caracteriza uma otimização por busca exaustiva.

Foram realizadas dez variações no grau de liberdade H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara hidropneumática), sendo o V_E/V_T (relação entre o volume de entrada da câmara hidropneumática e o volume total) a restrição do problema.

Considerando uma onda bem definida em escala real, e o resultado obtido através da Eq. 6.3 sugere que o desempenho do dispositivo do tipo CAO é melhor quando o comprimento da câmara hidropneumática (L) é aproximadamente o comprimento da onda incidente (λ) dividido por 2,25, Eq. (6.1), e a altura da câmara hidropneumática do dispositivo do tipo CAO é cerca de 2,25 vezes a altura da onda, Eq. (6.2). O resultado da potência máxima calculada foi aproximadamente 3,35 vezes maior, em relação a menor potência para os casos considerados como potência máxima, na geometria ótima em cada relação V_E/V_T . Ainda ao comparar a potência hidropneumática máxima (na geometria ótima) com a menor potência (na pior geometria) o resultado é considerado muito significativo, pois a potência hidropneumática ótima é 18,48 vezes maior em relação a menor potência.

E a análise da vazão mássica foi 2,49 vezes maior, comparando o melhor caso com o pior caso simulado.

Ainda considerando a pressão máxima, o resultado foi de 3,44 vezes maior em relação à pressão mínima do pior caso deste estudo.

Alterando a relação V_E/V_T a pressão aumenta, porém a vazão mássica não é afetada pela variação dessa relação. Disso conclui-se que o que influencia na vazão mássica é a relação comprimento da câmara hidropneumática em relação à onda incidente no dispositivo do tipo CAO. Já a pressão é influenciada pela relação V_E/V_T , mas analisando as variáveis primitivas, é provável que esteja relacionado ao comprimento da chaminé em relação ao comprimento da câmara hidropneumática.

Portanto, o principal objetivo deste trabalho de maximizar a conversão da energia das ondas regulares em energia elétrica para um dispositivo do tipo CAO, foi alcançado. Conhecendo uma onda bem definida de uma região, através dos resultados apresentados é possível determinar as dimensões do conversor para se obter um desempenho otimizado.

Para prosseguimento deste trabalho, são propostas as seguintes análises:

- 1) Variar mais de um grau de liberdade, além da variação da altura e comprimento da câmara hidropneumática, considerar a razão entre a altura e o diâmetro da chaminé, fixando o diâmetro da chaminé;
- 2) Variar a altura da onda incidente, para estudos semelhantes;
- 3) Estudar geometricamente um conversor do tipo CAO, adotando uma abordagem numérica tridimensional, comparando com a abordagem numérica bidimensional, e assim avaliar a possibilidade de extrapolação de resultados obtidos em uma geometria bidimensional para uma geometria tridimensional.
- 4) Utilizar ondas reais provenientes de um modelo numérico espectral ou observação de campo.

8 REFERÊNCIAS

- BARBIERI, J. C. 2007. Gestão Ambiental Empresarial: Conceitos, Modelos e Instrumentos. 2. ed. São Paulo: Saraiva.
- BARREIRO, T. G., 2009. Estudo da Interação de uma Onda Monocromática com um Conversor de Energia, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 87p.
- BASAK, T., 2011. The Law of Life: The Bridge Between Physics and Biology, *Phys Life Rev.* Vol. 8, pp.249-252.
- BEJAN, A., 1997. Constructal-Throry Network Of Conducting Paths For Cooling A Heat Generating Volume, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, nº 4, pp.799-816.
- BEJAN, A., 2000. Shape and Structure, from Engineering to Nature. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- BEJAN, A.; LORENTE, S., 2006. Constructal Theory of Generation of Configuration in Nature and Engineering, *J. Appl. Phys.*, Vol. 100, pp.041301.
- BEJAN, A.; LORENTE, S., 2013. Constructal Law of Design and Evolution: Physics, Biology, technology, and Society. *Journal of Applied Physics*, Vol. 113, pp.151301-1 – 151301-20.
- BEJAN, A.; ZANE, J. P., 2012. Design in Nature: How the Constructal Law Governs Evolution in Biology, Physics, Technology, and Social Organization. Published in the United States by Doubleday.
- BORTOLI, A. L., 2000. Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional, Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 134 p.
- CALLAWAY, Ewen. To Catch a Wave. *Nature*, v. 450, 08/11/2007.
- CA-OE (The Coordinated Action on Ocean Energy), 2006. Ocean Energy Conversion in Europe: Recent Advancements and Prospects. E. Comission. Centre of Renewable Energy Sources for the European Commission. 36 pp.
- CARNEIRO, M. L., 2007. Desenvolvimento de Dispositivo 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.

- CENTRE for RENEWABLE ENERGY SOURCES, 2002. Wave Energy Utilization in Europe- Current Status and Perspectives. CRES, Pikermi, Greece. 30 pp.
- CENTRE for RENEWABLE ENERGY SOURCES, 2006. Ocean Energy Conversion in Europe - Recent Advancements and Prospects", Pikermi, Greece: CRES. 34pp.
- CONDE, J. M. P.; GATO, L. M. C., 2008. Numerical Study o Fair-flow in na Oscillating Water Column Wave Energy Converter, Renewable Energy, v. 33, pp 2637-2644.
- CRUZ, J. M. B. P.; SARMENTO, A. J. N. A., 2004. Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais. Alfragide, Protugal: Instituto do Ambiente, 65p.
- DANIELSSON, O., 2006. Wave Energy Conversion – Linear Synchronous Permanent Magnet Generator. Ph.D. Thesis, Uppsala University, Uppsala. 102 p.
- DANTAS, A. G., 2009. A Importância das Fontes Alternativas e Renováveis na Evolução da Matriz Elétrica Brasileira. V Seminário de Geração e Desenvolvimento Sustentável Fundación MAPFRE.
- DARZÉ, A. S. S. P., 2002. A Questão Ambiental como um Fator de Desestímulo ao Investimento no Setor Privado de Geração de Energia Hidrelétrica no Brasil, Dissertação de Mestrado, UFBA, Salvador, Brasil.
- DEAN, R. G., DALRYMPLE, R.A., 1991. Water Wave Mechanics for Engineers end Scientist, vol. 2, World Scientific, Singapura, 353 p.
- DIZADJI, N.; SAJADIAN, S. E., 2011. Modeling and Optimization of the Chambre of OWC System. Energy, V.36, pp. 2360-2366.
- Dos SANTOS E. D., MACHADO, B.N., LOPES,N.R., SOUZA, J.A., TEIXEIRA,P. R. F., GOMES,M. N., ISOLDI, L. A., ROCHA, L.A. O., 2013. Constructal Design of Wave Energy Converts, In: L. A. O. Rocha, S. Lorente, A. Bejan (Org.), Constructal Law and the Unifying Principle of Design, Ist Ed, Springer, pp.275-294.
- Dos SANTOS, E. D., MACHADO, B.N., ZANELLA, M. M., GOMES, M. N., SOUZA, J. A., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., 2014. Numerical Study Of The Effect Of The Relative Depth On The Overtopping Wave Energy Converters According To Constructal Design. Defect And Diffusion Forum, v. 348, pp. 232-244.

- DUARTE, C. R., 2006. Estudo Experimental e de Simulação da Fluidodinâmica e Recobrimento em Leito de Jorro. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 196p.
- ECHARRI, L., 2009. Livro Eletrônico, Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Escuela Superior de Ingenieros de San Sebastian, Universidad de Navarra. Navarra, Espanha Disponível
<<http://www.tecnun.es/asignaturas/ecologia/hipertexto/00General/Principal.html>>.
- FALCÃO, A. F., 2000. The Shoreline OWC Wave Power Plant at the Azores. 4th European Wave Energy Conference, Dinamarca.
- FALCÃO, A. F. O., 2010. Wave Energy Utilization: A Review of the Technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 3, p. 899-918.
- FARINA, L., 2006. Ondas Oceânicas de Superfície. Ed. SBMAC, p.114. São Carlos, SP.
- FLEMING, F.P., 2012. Avaliação do Potencial de Energias Oceânicas no Brasil. Rio de Janeiro, 100 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- FLUENT (version 6.3) 2006.
- FORTUNA, A. O., 2000. Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos – Conceitos Básicos e Aplicações, Edusp, São Paulo, 426 p.
- FOX, R. W., PRITCHARD, P. J., McDONALD, A. T., 2010. Introdução a Mecânica dos Fluidos, 7 ed. LTC, Rio de Janeiro, 710 p.
- GHOSH, T., PRELAS, M., 2010. Energy Resources and Systems. Vol 2: Renewable Resources, Columbia, Missouri, USA. Springer Dordrecht Heidelberg London New York.
- GOLDEMBERG, J., LUCON, O., 2007. Energia e Meio Ambiente no Brasil. Estudos Avançados, v. 21, n. 59, pp.7-20.
- GOMES, S.C.P., 1999. Métodos Numéricos: Teoria e Programação. Ed. Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 190 p. Rio Grande.
- GOMES, M. N. ISOLDI, L. A., OLINTO, C. R., ROCHA, L. A. O., SOUZA, J. A., 2009 Modelagem Computacional de um Dispositivo do tipo Coluna de Água Oscilante para a

- Costa de Rio Grande, The 3rd South Conference on Computational Modeling (MCSUL), Rio Grande, Brasil.
- GOMES, M. N.; OLINTO, C. R.; ROCHA, L. A. O.; SOUZA, J. A.; ISOLDI, L. A., 2009a, Computational Modeling of a Regular Wave Tank. *Engenharia Térmica*, V.8, pp. 44-50.
- GOMES, M. N., 2010. Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna D'água Oscilante para a Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica. Rio Grande, 209 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional), Universidade Federal do Rio Grande.
- GOMES, M. N., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D., ROCHA, L. A. O., 2012a. Análise de Malhas para Geração Numérica de Ondas em Tanques, VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luís.
- GOMES, M. N., NASCIMENTO, C.D., BONAFINI, B.L., SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., 2012b. Two-Dimensional Geometric Optimization of na Oscillating Water Column Converter in Laboratory Scale. *Engenharia Térmica*, Vol. 11, pp. 30-36.
- GOMES, M. N., 2014. Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante. Porto Alegre, 168 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- GOMES, M. N., BONAFINI, B. L., CASSEL, L. F., ISOLDI, L. A., Dos SANTOS, E. D., ROCHA, L. A. O., 2015. 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.
- GOULART, M. M., 2014. Estudo Numérico da Geometria de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real Empregando Constructal Design. Rio Grande, 126 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional), Universidade Federal do Rio Grande.
- GOULART, M. M., MARTINS, J. C., GOMES, M. N., ACUNHA JR. I. C., SOUZA, J. A., ROCHA, L. A. O., ISOLDI, L. A., Dos SANTOS, E. D., 2015. Constructal Design de

um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real para uma Profundidade Fixa. Scientia Plena, vol.11, num. 08, pp.1-10.

GRIMMLER, J. A. M., 2013. Conversor de Energia das Ondas em Energia Elétrica com Dispositivo de Coluna de Água Oscilante: Simulação Numérica e Estudo Geométrico. Rio Grande, 118 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional), Universidade Federal do Rio Grande.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J., 2009. Gravitação, Ondas e Termodinâmica, vol. 2; p. 314. LTC, ed. S.A. Rio de Janeiro.

HEATH, T., 2001. The Construction, Commissioning and Operation of the LIMPET Wave Energy Collector, Wavegen, Reino Unido.

HIRT, C. W., NICHOLS, B. D., 1981. Volume of Fluid (vof) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal Computational Physics, vol. 39, pp. 201-225.

HORKO, M., 2007. CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy Converter, Tese de Mestrado em Engenharia e Ciencia, Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Western, Australia, 145 p.

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

LARA, M. F. E., 2015. 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 D'Água Oscilante. Porto Alegre, 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LETZOW, M., 2014. Avaliação Geométrica da Câmara de um Dispositivo OWC Onshore Inserido em um Tanque com Rampa Triangular em Escala Real Empregando Constructal Design. Rio Grande, 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Osceânica), Universidade Federal do Rio Grande.

LEWIS, A., ESTEFAN, S., HUCKERBY, J., MUSIAL, W., MARTINEZ, J. T., 2011. Ocean Energy. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. IPCC.

- LIMA, Y.T.B., ROCHA, L. A. O., PLAMER, C. B., ISOLDI, L. A., Dos SANTOS, E. D., GOMES, M. N., 2015. Análise Numérica com Constructal Design da Forma Geométrica na Região de Transição Entre a Câmara Hidropneumática e a Chaminé de um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante. XXXVI Ibero-Latin American Congress on computational Methods in Engineering - CILAMCE, Rio de Janeiro.
- LING, L., YONGCAN, C. AND YULIANG, L., 2001. Volume Of Fluid (VOF) Method for Surved Free Surface Water Flow in Shallow Open Channel. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing, China.
- LIU, Z., HYUN B., HONG, K., 2008a. Application of Numerical Wave Tank to OWC Air Chamber for Wave Energy Conversion, International Offshore and Polar Engineering Conference.
- LIU, Z., HYUN B., JIN, J., 2008b. Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, vol. 11, n.1, pp. 35-41.
- LIU, Z., HYUN B., HONG, K., 2011, Numerical Study of Air Chamber for Oscillating Water Column Wave Energy Convertor. China Ocean Eng., v. 25, pp. 169-178.
- LV, X., ZOU, Q. AND REEVE, D., 2011. Numerical Simulation of Overflow at Vertical Weirs Using a Hybrid Level set/VOF Method, Adv. Water Resour. 34: pp. 1320-1334.
- LOPES, N. R., SANT'ANNA, F. S. P., GOMES, M. N., SOUZA, J. A., TEIXEIRA, P. R. F., DOS SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., 2011. Constructal Design Optimization Of The Geometry Of An Oscillating Water Column Wave Energy. In: Constructal Law Conference, Porto Alegre - RS. Constructal Design Optimization Of The Geometry Of An Oscillating Water Column Wave Energy.
- LOPES, N. da R., 2012. Modelagem Computacional e Otimização Geométrica de um Conversor do Tipo Coluna de Água Oscilante, Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) Universidade Federal do Rio Grande.
- MACHADO, B. N., ZANELLA, M. M., GOMES, M. N., TEIXEIRA, P. R. de F., ISOLDI, L. A., Dos SANTOS, E. D., ROCHA, L. A. O., 2011 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.
- MACHADO, B. N., 2012. Modelagem Computacional e Otimização Geométrica de um

Dispositivo de Galgamento para a Conversão da Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica, Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Fundação Universidade do Rio Grande.

MACHADO, B. N., GOMES, M. N., SOUZA, J. A., TEIXEIRA, P. R. F., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., DOS SANTOS, E. D., 2012. Geometric Optimization of an Overtopping Wave Energy Converter for Deep Water Flow. 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, november.

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

MAHNAMEFAR, F., ALTUNKAYNAK, A., 2015. OWC Type Wave Chamber Optimization Under of Regular Waves. Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 41, pp. 1543-1549.

MARJANI A. EL, CASTRO F., BAHAJI M., FILALI B., 2006. 3D Unsteady Flow Simulation in na OWC Wave Converter Plant. ICREPQ'06. Palma de Mallorca, Spain.

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

NGÔ, C., 2010. Energy. Resources, Technologies and the Environment. English Translation 2010. The Institution of Engineering and Technology. O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer e C. V. Stechow, Eds. Cambridge and New York, p. 50.

OH, J. S., JANG, J. H., 2015. OWC Design to Increase Wave Energy Absorption Efficiency in Wave Conversion Systems. Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 29, pp. 2987-2993.

OLIVEIRA, L., TEIXEIRA, P. R. F., SANTOS, E. D. dos, ISOLDI, L. A., 2012. Constructal Design Applied to the Geometric Optimization of the Hydropneumatic Chamber Dimensions of na Oscillating Water Column Wave Energy Device, In Proceedings of the 11 th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, Brasov, Romania.

PACHECO, F., 2006. Energias Renováveis Breves Conceitos. Conjuntura e Planejamento SEI, Salvador, Brasil, n.149, pp.4-11.

- PATANKAR, S.V., SPALDING, D. B., 1972. 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.
- PATEL, S., RAM, K., AHMED. M. R., 2012. Effect of Partial Blockage of Air Duct Outlet on Performance of OWC Device. *Journal of Central South University*, Vol. 19, pp. 748-754.
- PONTES, M.T, FALCÃO, A. F., 2001. Ocean Energies: Resources and Utilisation, 18th World Energy Conference, Buenos Aires, Argentina.
- RAM, K., FAIZAL, M., AHMED, M. R., LEE, Y. H., 2010. Experimental Studies on the Flow Characteristics in an Oscillating Water Column Device. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.24, pp. 2043-2050.
- RAMALHAIS, R. dos S., 2011. Estudo Numérico de um Dispositivo de Conversão da Energia das Ondas do Tipo Coluna de Água Oscilante (CAO). Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- ROCHA, L. A. O., LORENZINI, E., BISERNI, C., 2005. Geometric Optimization of Shapes on the Basis of Bejan's Constructal Theory. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. n°. 32, pp. 1281-1288.
- SANTOS, K. G., 2008. Estudo da Fluidodinâmica do Leito de Jorro por CFD com Malhas Tridimensionais, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. 110 p.
- SARMENTO, A. J., BRITO-MELO, A., PONTES, M., 2003. The Influence of the Wave Climate on the Design and Annual Production of Electricity by OWC Wave Power Plants. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME. Vol.125.
- SHANNON, R. E., 1998. Introduction to the Art and Science of Simulation. *Proceedings of The Winter Simulation Conference*.
- SOUZA, R. A., 2011. Escolha de Tecnologia de Conversão da Energia das Ondas em Energia Elétrica. Rio Grande, 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica), Universidade Federal do Rio Grande.
- TRUJILLO, A. P. e THURMAN, H. V., 2011. *Essentials of Oceanography*. 10. USA: Prentice Hall. 551 p.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W., 1999. An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Longman, Malásia, 257 p.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W., 2007. Na Introduction to Computational Fluid Dynamics, Malaysia: Pearson.

WAVE ENERGY CENTER, 2004. Potencial e Estratégia de Desenvolvimento da Energia das Ondas em Portugal. WEC, Portugal. 72 p.

WAVEGEN, 2002. Islay LIMPET Project Monitoring Final Report, Reino Unido, 37 p. Disponível em: <<http://www.wavegen.co.uk>>.

ANEXO 1

UDF para a geração de uma onda linear no FLUENT

```
#include "udf.h"

/*Definição das constantes, Propriedades da Onda e Variáveis do domínio*/

DEFINE_PROFILE(x_velocity,thread,position)
{
    real PI=3.14159265; /*constant*/
    real GRAV=9.81;
    real H=1; /*wave height*/
    real D=10; /*waterdepth*/
    real T=5; /*wave period*/
    real L=37.6; /*wave lenght*/

    real x[ND_ND]; /*this will hold the position vector */
    real y;
    real AA,BB,CC,DD,EE,FF,GG,LL,ZZ,k; /*y=position vector,AA,BB, etc are
    temporary stores*/
    face_t f;

    begin_f_loop(f,thread)
    {
        real t=RP_Get_Real("flow-time");
        F_CENTROID(x,f,thread);
        y=x[1];
        ZZ=y-D;
        k=2*PI/L;
        AA=cosh(k*(ZZ+D));
        BB=cosh(k*D);
        DD=cos(PI/2.0-2.0*PI*(t/T));

        /* this defines the wave height (LL) at time=y */
    }
}
```

```

LL=D+(H*DD/2.0);
if(y<=D)          /*this defines the profile below water level=D */

F_PROFILE(f,thread,position)=H/2.0*(GRAV*T/L)*AA*DD/BB;

else if(y<=LL)    /*this stretches the velocity above mean water level */

F_PROFILE(f,thread,position)=H/2.0*(GRAV*T/L)*BB*DD/BB;
else /*this sets the velocity above the wave height to zero*/

F_PROFILE(f,thread,position)=0;
}
end_f_loop(f,thread)
}

DEFINE_PROFILE(y_velocity,thread,position)
{
real PI=3.14159265; /*constant*/
real GRAV=9.81;
real H=1; /*wave height*/
real D=10; /*waterdepth*/
real T=5; /*wave period*/
real L=37.6; /*wave lenght*/
real x[ND_ND]; /*this will hold the position vector */
real y;
real k,MM,NN,OO,PP,FF,QQ,RR,SS,TT,UU,VV,WW,ZZZ; /*y=position vector,AA,BB,
etc are temporary stores*/

face_t f;

begin_f_loop(f,thread)
{

real t=RP_Get_Real("flow-time");
F_CENTROID(x,f,thread);
y=x[1];
ZZZ=y-D;
k=2*PI/L;

```

```

NN=cosh(k*D);
OO=cos(PI/2.0-(2.0*PI*t/T));

VV=sin(PI/2.0-(2.0*PI*t/T));

RR=sinh(k*D);

PP=D+(H*OO/2.0);

if(y<=D)

F_PROFILE(f,thread,position)=H/2.0*(GRAV*T/L)*RR*VV/NN;

else
F_PROFILE(f,thread,position)=0;
}
end_f_loop(f,thread)
}

```