

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

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

por

Maria Fernanda Espinel Lara

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, abril de 2015

ESTUDO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL COM APLICAÇÃO DE *CONSTRUCTAL DESIGN* PARA A OTIMIZAÇÃO DA GEOMETRIA E DA PROFUNDIDADE DE SUBMERSÃO DE UM DISPOSITIVO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR DO TIPO COLUNA D'ÁGUA OSCILANTE

por

Maria Fernanda Espinel Lara
Engenheira Química

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

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Aprovada por:

Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes, IFPR.

Prof^a. Dr^a. Adriane Prisco Petry, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Luiz Endres, IPH/UFRGS.

Prof. Dr. Luiz A. O. Rocha
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 09, abril de 2015

AGRADECIMENTOS

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

Ao meu orientador, o professor Luiz Alberto Oliveira Rocha pelo apoio, pela ajuda e confiança nas minhas capacidades e por me permitir aprender sobre energia dos oceanos.

Ao professor Mateus das Neves Gomes pela paciência, pela sua ajuda e os seus ensinamentos.

Aos meus pais e meus irmãos pelo apoio e amor nestes dois anos fora do meu país.

Ao meu namorado Juan Diego Naranjo Toro pelo amor e pela sua ajuda e apoio.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo maximizar a potência hidropneumática convertida num dispositivo do tipo Coluna d'Água Oscilante (CAO). Para fazê-lo, o método *Constructal Design* é aplicado para aprimorar a geometria e a profundidade de submersão do dispositivo. No desenvolvimento do método Constructal são propostos e analisados três graus de liberdade: H_1/L (razão entre a altura e comprimento da câmara do dispositivo CAO), H_2/l (razão entre a altura da câmara e o comprimento da chaminé) e H_3 (profundidade de submersão do dispositivo CAO). As restrições do problema (parâmetros constantes) são a área da câmara A_1 e a área total do dispositivo CAO A_2 . O domínio computacional consiste de um dispositivo CAO inserido num tanque que é submetido a ondas na escala real. A malha é desenvolvida no software Ansys Icem[®]. O código de Dinâmica dos Fluidos Computacional Ansys Fluent[®] é empregado para encontrar a solução numérica a qual é baseada no método dos Volumes Finitos. O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é usado na interação das fases água-ar. Os resultados indicam que a potência hidropneumática máxima obtida 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. Por outro lado, o menor valor obtido da potência hidropneumática é de quase 11 W, o que mostra a utilidade do método Constructal, para fornecer uma relação entre o clima de ondas de um lugar determinado e as dimensões ótimas do dispositivo CAO.

Palavras-chave: Conversor de Energia das Ondas, Constructal Design, Coluna d'Água Oscilante, Modelagem Computacional.

ABSTRACT

The present work aims to maximize the hydropneumatic power converted in an Oscillating Water Column (OWC) device. To do this, *Constructal Design* is applied to optimize its geometry and submergence. For the development of Constructal method, it has been proposed and analyzed three degrees of freedom: H_1/L (ratio between the height and length of OWC chamber), H_2/l (ratio between height and length of chimney), and H_3 (submergence). The problem constraints (fixed parameters) are total area of the OWC chamber A_1 and total area of OWC device A_2 . The computational domain consists of an OWC inserted in a tank where waves in a real scale are generated. The mesh is developed in ANSYS ICEM[®]. The Computational Fluid Dynamics code FLUENT[®] is used to find the numerical solution which is based on Finite Volume Method (FVM). The multiphasic Volume of Fluid (VOF) model is applied to tackle with the water-air interaction. The results show that the maximum hydropneumatic power obtained was 190 W for H_1/L , H_2/l e H_3 ratios equal to 0.135, 6.0 and 9.5 m respectively. In contrast, the smaller value obtained for the hydropneumatic power is almost 11 W. So, it shows the utility of Constructal Method which provides a relationship between the wave climate of a particular place and the optimal dimensions for the OWC device.

Keywords: Wave Energy Converter, Oscillating Water Column, Constructal Design, Computational Modeling.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação	1
1.1.1	Classificação das fontes de energia a partir dos oceanos	1
1.1.2	Estimativa do potencial global.....	2
1.1.3	Estimativa de custo	3
1.1.4	O caso do Brasil.....	4
1.2	Objetivos.....	4
1.2.1	Objetivos específicos	4
1.3	Organização do Trabalho.....	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	A Energia das ondas do mar	6
2.1.1	Potencial do recurso energético da energia das ondas do mar.....	6
2.1.2	Tecnologias disponíveis de dispositivos conversores de energia das ondas do mar	8
2.1.3	Etapas de um projeto de energia das ondas do mar	10
2.1.4	Energia das ondas do mar no Brasil	12
2.1.5	Estudo do potencial de energia das ondas do mar no Brasil.....	13
2.2	O Dispositivo Coluna D'Água Oscilante	14
2.2.1	Modelagem computacional de conversores de energia das ondas do mar do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO).....	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	Conceitos fundamentais sobre Constructal Design	17
3.1.1	Aplicação do Constructal Design	18
3.1.2	Constructal Design aplicado aos conversores de energia das ondas do mar	20
3.1.3	Formulação matemática com Constructal Design para dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO	22
3.2	Introdução à Teoria das Ondas Oceânicas	24
3.2.1	Teoria Linear	25

4	MODELO COMPUTACIONAL	29
4.1	Domínio computacional.....	30
4.2	Condições de contorno	30
4.3	Geração da malha	31
4.4	Solução do Modelo Numérico	32
4.4.1	Modelo VOF para problemas multifásicos.....	33
4.4.2	Métodos de solução	36
4.5	Interpretação dos Resultados	39
4.5.1	Superfícies de monitoramento e cálculos	39
4.5.2	Verificação da geração da onda e validação do modelo computacional	42
4.5.3	Procedimento para aprimorar os graus de liberdade.....	44
5	RESULTADOS	46
5.1	Resultados da variação de H_2/l	46
5.2	Resultados da variação de H_1/L	49
5.3	Resultados da variação de H_3	52
6	CONCLUSÕES.....	55
6.1	Propostas de trabalhos futuros	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
	APÊNDICE A – Resultados das simulações	64
	APÊNDICE B – Trabalhos publicados.....	70
	ANEXO A – Função definida pelo usuário (UDF)	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mapa global de recurso de energia das ondas (Kw/m) [Pelamis, 2014].	7
Figura 2.2 – Dispositivos conversores de energia das ondas [Aquaret, 2014].	10
Figura 2.3 – Etapas de um projeto de energia das ondas do mar.	11
Figura 2.4 – Dispositivo conversor de energia das ondas instalado no estado de Ceará, Brasil [Estefen, 2012].	12
Figura 2.5 – Dispositivo que será instalado no Rio de Janeiro, Brasil [Planeta Coppe, 2014].	13
Figura 2.6 – Esquema bidimensional de um sistema CAO, [Gomes, 2014].	15
Figura 3.1 – Domínio Computacional Bidimensional do dispositivo CAO.	21
Figura 3.2 – Características das ondas oceânicas.	25
Figura 4.1 – Discretização do domínio computacional (a) e detalhe do dispositivo CAO (b). Refinamento da malha: Gomes et al., 2012.	32
Figura 4.2 – Superfícies de monitoramento no domínio computacional [Gomes, 2014].	40
Figura 4.3 – Verificação do modelo computacional em $x = 48$ m.	43
Figura 4.4 – Variação de H_2/l .	44
Figura 4.5 – Variação de H_1/L e H_2/l .	44
Figura 4.6 – Variação de H_1/L , H_2/l e H_3 .	45
Figura 5.1 – Resultados da Potência hidropneumática, pressão e vazão mássica para H_2/l .	46
Figura 5.2 – Variação da pressão em relação ao tempo para H_2/l de 2,3 e 6,0.	47
Figura 5.3 – Vetores da velocidade no sexto período (a),(c),(e) $H_2/l = 2,3$; (b),(d),(f) $H_2/l = 6,0$.	48
Figura 5.4 – Variação de P_{hid} , P e \dot{m} para valores elevados de H_2/l [Espinel, 2014].	49
Figura 5.5 – RMS da potência hidropneumática relacionada com a variação de H_1/L .	50
Figura 5.6 – Comportamento da vazão mássica de ar para H_1/L de 0,0226 e 0,1346.	51
Figura 5.7 – RMS da máxima potência e H_1/L ótimo para H_2/l .	52
Figura 5.8 – Potência máxima para H_3 .	53
Figura 5.9 – Valores ótimos de H_1/L e H_2/l para H_3 .	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dimensões de H_2 e l	23
Tabela 3.2 – Dimensões de H_1 e L	24
Tabela 4.1 – Dimensões do tanque e características da onda incidente.	30
Tabela A.1 – Resultados da vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para $H_2/l = 2,3$	65
Tabela A.2 – Resultados da vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para $H_2/l = 2,5$	66
Tabela A.3 – Resultados da vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para $H_2/l = 3,0$	67
Tabela A.4 – Resultados da vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para $H_2/l = 4,0$	68
Tabela A.5 – Resultados da vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para $H_2/l = 6,0$	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMG	Multigrid Algébrico
CAO	Coluna d'Água Oscilante
CFD	Dinâmica dos fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics)
CPU	Central Processing Unit
FIT	Regime de tarifa Feed- in (Feed-in tariff)
NCEP	Centro Nacional de Previsão Ambiental NCEP (National Center of Environmental Prediction)
PISO	Pressure-Implicit with Splitting of Operators
PRESTO	Pressure Staggering Option
RMS	Root Mean Square
SIMPLE	Semi IMPLICIT Linked Equations
SIMPLEC	Semi IMPLICIT Linked Equations Consistent
UDF	Função definida pelo usuário (User Defined Function)
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
TGC	Certificado verde negociável (Tradable Green Certificate)
VOF	Método Volume de Fluido (Volume Of Fluid)
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Amplitude da onda [m]
A_i	Área de cada volume de controle [m ²]
A_1	Área da câmara de entrada do dispositivo CAO [m ²]
A_2	Área total do dispositivo CAO [m ²]
C_T	Comprimento do tanque de ondas [m]
d	Número de volumes por cada comprimento de onda
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
h	Profundidade do clima de ondas [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	Diâmetro da chaminé de saída do dispositivo CAO [m]
L	Comprimento da câmara CAO [m]
L_T	Comprimento do tanque de ondas [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]
P	Pressão [Pa]
P_d	Pressão dinâmica [Pa]
P_e	Pressão estática [Pa]
P_{hid}	Potência Hidropneumática [W]
S_{α_q}	Fonte de massa constante ou definida pelo usuário para cada fase [kg/s]
t	Tempo [s]
T	Período da onda [s]
u	Componente da velocidade na direção horizontal [m/s]
U_f	Fluxo volumétrico através da face [m ³ /s]

V	Volume da célula ou volume de controle [m^3]
w	Componente da velocidade na direção vertical [m/s]
$\alpha_{q,f}$	Valor nominal da fração da fase q
η	Elevação da superfície livre [m]
λ	Comprimento da onda incidente [m]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
$\bar{\tau}$	Tensor de tensões [N/m ²]
φ	Função potencial
ω	Frequência angular da onda [m^{-1}]

SUBÍNDICES

c	Valor de uma variável ou função para CO ₂
l	Limite inferior de uma variável, leste
loc	Condição local
m	Direção
max	Valor máximo
med	Valor médio
n	Norte
o	Oeste
p	Ponto de interesse
ref	Condição de referência
s	Sul
u	Limite superior de uma variável
w	Indica valor de uma variável na parede do domínio, valor de uma variável ou função para H ₂ O

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Na atualidade, a necessidade de uma economia sustentável orientada para o futuro e a segurança no abastecimento de energia tem acelerado a investigação e desenvolvimento de projetos de fontes renováveis de energia no mundo. Enquanto a energia proveniente de fontes convencionais, como gás, carvão e petróleo, que estão geograficamente mais concentradas, a energia renovável têm potencial de implantação significativa, pois todos os países do mundo têm pelo menos um abundante recurso renovável, e ainda, muitos países têm um portfólio de recursos [IEA, 2014].

Entre os benefícios que pode oferecer a energia renovável estão menor impacto ambiental, incluindo as emissões de gases de efeito estufa e de poluentes locais, segurança energética e desenvolvimento econômico estratégico, incluindo o desenvolvimento rural, o setor agrícola e o de produção de alta tecnologia [EREC, 2014]. Por isto os governos criaram políticas de apoio local e, como resultado, as fontes renováveis têm sido o motor de grande parte do crescimento do setor global de energia limpa a partir do ano de 2000. O crescimento desta fonte de energia seguirá aumentando, e se espera que supere o do gás natural e que seja o dobro da energia nuclear até 2016, tornando-se a segunda fonte mais importante de eletricidade global, depois do carvão [IEA, 2014].

O oceano é uma enorme fonte de energia renovável, com potencial para satisfazer uma percentagem importante do abastecimento de eletricidade do mundo. Embora as pesquisas sobre energia dos oceanos tenham iniciado há décadas atrás, um desenvolvimento notável só ocorreu desde o início deste século. No geral, o desenvolvimento da energia dos oceanos já não se limita à pesquisa acadêmica. Recentemente, grandes empresas, serviços públicos e consórcios industriais começaram a investir substancialmente em projetos de energia do oceano, demonstrando a ambição do setor [EREC, 2014].

1.1.1 Classificação das fontes de energia a partir dos oceanos

As fontes de energia oriundas do oceano são classificadas da seguinte forma [IEA, 2014]:

- Energia das marés: é a energia derivada das forças gravitacionais do sistema Terra-Lua-Sol. A energia potencial associada às marés pode ser aproveitada com a construção de uma barragem ou outras formas de construção num estuário. Atualmente, os sistemas de barragens de marés que estão em operação são: a barragem de 254 MW em Sihwa (Coreia do Sul) em funcionamento desde 2011 e a barragem de 240 MW chamada de La Rance, na França, onde a geração de energia começou a partir de 1966.

- Energia das correntes marinhas: oriunda da ação dos ventos e da circulação oceanográfica, devido às diferenças térmicas e de salinidade. As correntes podem ser aproveitadas usando sistemas modulares. O sistema melhor caracterizado é o da Corrente do Golfo nos Estados Unidos, onde a corrente da Flórida tem um potencial energético para geração de 25 GW de eletricidade.

- Energia das ondas do mar: é dada pela transferência de energia cinética do vento para a superfície do mar. As energias, cinética e potencial, associadas com as ondas do oceano podem ser aproveitadas por uma série de tecnologias em desenvolvimento. O dispositivo mais estudado é do tipo Coluna d'Água Oscilante (CAO). Na atualidade, os sistemas que estão operando são o CAO do Pico nos Açores, o CAO de Limpet na Escócia e o CAO de Mutriku no País Basco.

- Gradientes de temperatura: oriunda da diferença de temperatura entre as camadas superiores e a água fria geralmente abaixo de mil metros de profundidade. Este tipo de energia pode ser aproveitado, ainda mais, na zona Equatorial, pois ela tem uma diferença de temperatura quase constante no ano todo. Por exemplo, no Hawaii, uma planta piloto de 100MW vai ser construída. As Ilhas Bahamas têm dois projetos de construção de plantas para produzir eletricidade.

- Gradientes de salinidade: oriunda da diferença de salinidade entre a água doce e a água salgada na foz de rios. A tecnologia para aproveitar a energia pelo gradiente de salinidade usa as diferenças de pressão osmótica entre a água salgada e a água doce, ou entre corpos d'água de salinidade diferente. Os sistemas de gradiente de salinidade estão sendo desenvolvidos principalmente na Noruega e na Holanda.

1.1.2 Estimativa do potencial global

Ainda não se tem uma cifra exata sobre o potencial global para cada tecnologia de energia dos oceanos. O desenvolvimento futuro vai permitir conhecer dados mais

aproximados, além de aumentar a eficiência de conversão e diminuir as restrições geográficas para a implantação dos projetos. Os potenciais conhecidos atualmente são [Brown, 2011]:

- Energia das marés: mais de 300 TWh/ano
- Correntes marinhas: 800 TWh/ano
- Energia das ondas: 8.000 a 80.000 TWh/ano
- Gradientes de temperatura: 10.000 TWh/ano
- Gradientes de salinidade: 2.000 TWh/ano

Além disso, estimativas sobre o desenvolvimento destas tecnologias indicam que a geração global de energia a partir dos oceanos atingirá 870 TWh no ano de 2030.

1.1.3 Estimativa de custo

Estimativas de custo na Europa indicam que a energia das ondas do mar e a energia das marés não são competitivas na atualidade, mas têm um potencial de redução de custos. Para a energia das ondas do mar prevê-se uma diminuição do custo de aproximadamente 40% entre os anos 2020 e 2050 e, para a energia das marés, de até 60% para o mesmo período. Além disso, espera-se que as tecnologias tornem-se maduras em 2035 [Brown, 2011].

O apoio financeiro dos governos é fundamental no desenvolvimento deste tipo de projetos. O governo de países na Europa como o Reino Unido, tem apoiado o desenvolvimento de dois locais (Centro Europeu de Energia Marinha em Orkney e o Wave Hub largo da costa sudoeste) para testar dispositivos conversores de energia. Estes sítios oferecem facilidades para o ensaio de dispositivos a escala e em condições reais. Portugal também está desenvolvendo uma zona piloto para acomodar projetos com uma capacidade de mais de 250 MW. Além disso, é concedido apoio financeiro para dispositivos implantados para energia das ondas do mar e das marés através de um certificado verde negociável ou transacionável (*TGC*) e regimes de tarifa feed-in (*FIT*), os quais oferecem a segurança na compra da energia por um preço estabelecido para incentivar investimentos em energia renovável [Brown, 2011].

1.1.4 O caso do Brasil

O Brasil é um país que possui uma grande extensão de território e a sua localização permite um amplo contato com o oceano atlântico. Por isto, há uma grande disponibilidade de recursos associados às fontes de energia renovável a partir dos oceanos. O potencial estimado da energia dos oceanos na costa brasileira é de 114 GW, dividido em 27 GW para a energia das marés e 87 GW para a energia das ondas do mar [Estefen, 2012].

Para aproveitar o potencial energético da costa do Brasil, é necessário fazer estudos sobre a conversão de energia dos oceanos em energia elétrica. A simulação numérica é uma ferramenta útil nas etapas de desenvolvimento de projetos de energia renovável, pois o emprego desta ferramenta permite fazer um dimensionamento do dispositivo de modo a converter o máximo possível da potência disponível.

1.2 Objetivos

O presente estudo tem como objetivo maximizar a potência hidropneumática convertida no dispositivo Coluna d'Água Oscilante (CAO) submetido a ondas incidentes regulares na escala real. Para fazê-lo, Constructal Design é aplicado para aprimorar a geometria e a profundidade de submersão do dispositivo, por meio da variação dos graus de liberdade H_1/L (razão entre a altura e comprimento da câmara do dispositivo CAO), H_2/l (razão entre a altura da câmara e o comprimento da chaminé) e H_3 (profundidade de submersão do dispositivo CAO). Considerou-se como restrições geométricas, a área de câmara e a área total do dispositivo CAO.

1.2.1 Objetivos específicos

- Aplicar Constructal Design para aprimorar a geometria de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO em escala real;
- Adaptar o modelo numérico desenvolvido por Gomes (2014) em Ansys versão 6, para Ansys versão 13.
- Verificar a geração da onda no domínio computacional;

- Simular numericamente diversas configurações geométricas para a câmara e a chaminé do dispositivo CAO e, também, para a profundidade de submersão de acordo com o princípio Constructal;
- Selecionar as configurações geométricas que maximizam a potência hidropneumática.

1.3 Organização do Trabalho

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o panorama da energia das ondas do mar no mundo e no Brasil, além de uma descrição do dispositivo CAO e os estudos da modelagem computacional do dispositivo CAO para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica.

No capítulo 3 é apresentada a definição de Constructal Design, algumas de suas aplicações em engenharia, medicina, hidrologia, (entre outras) e os mais importantes trabalhos desenvolvidos empregando Constructal Design para melhorar o desempenho dos conversores de energia das ondas. Além disso, é apresentada a introdução à teoria das ondas oceânicas.

No capítulo 4 é apresentada a modelagem matemática e numérica composta pelo clima de ondas, as condições de contorno, a malha, a solução numérica e a interpretação dos resultados.

No próximo capítulo são apresentados e analisados os resultados das simulações para a solução do problema proposto. O capítulo 6 apresenta as conclusões da dissertação. O Apêndice A apresenta os resultados dos cálculos para a vazão mássica, a pressão e a potência hidropneumática das 300 simulações realizadas. O Apêndice B apresenta os trabalhos publicados como resultado do trabalho desenvolvido durante o mestrado. O Anexo A apresenta a Função Definida pelo Usuário, que descreve as equações para a velocidade das ondas de entrada no domínio computacional baseadas na Teoria Linear de Ondas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Energia das ondas do mar

O início das pesquisas sobre a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica data da década de 1940, onde foi desenvolvida, no Japão, uma bóia de navegação alimentada por energia das ondas, equipada com uma turbina de ar, que tempo depois foi denominada como dispositivo do tipo Coluna d'Água Oscilante (CAO). Estas bóias foram comercializadas no Japão desde 1965 e, mais tarde, nos Estados Unidos. Depois da crise do petróleo em 1973, aproximadamente na década de 1980, mais de mil patentes foram registradas e o número aumentou acentuadamente desde então. O Governo britânico começou em 1975 uma pesquisa ambiciosa e um programa de desenvolvimento da energia das ondas. Em 1985, foram construídos na Noruega, dois protótipos *shoreline* (linha costeira) na escala real com potência nominal de 350 e 500 kW, perto de Bergen. Em 1991, na Escócia, foi testado um protótipo CAO *shoreline* implantado na ilha de Islay. Ao mesmo tempo, dois protótipos CAO foram construídos na Ásia: um conversor de 60 kW integrado num quebra-mar no porto de Sakata, Japão, e uma planta de 125 kW no Trivandrum, na Índia. Em 1991, a Comissão Europeia incluiu a energia das ondas em seu programa de pesquisa e desenvolvimento em energias renováveis. Com isto, cerca de trinta projetos de energia das ondas do mar foram financiados pela Comissão Europeia, que envolve um grande número de equipes em atividade na Europa. Recentemente, países como os Estados Unidos, Canadá, Coreia do Sul, Austrália, Nova Zelândia, Brasil, Chile e México, tem um crescente interesse na energia das ondas do mar [Ocean Energy System, 2014].

2.1.1 Potencial do recurso energético da energia das ondas do mar

O potencial de energia das ondas do mar pode ser aproveitado com a localização dos dispositivos *shoreline*, *near-shore* e *off-shore*. Para isto, é necessário construir um atlas detalhado, pois a variabilidade dos ventos deve ser levada em conta. As boas locações *offshore* ocorrem, principalmente, em moderadas e altas latitudes. As variações sazonais da época são maiores no norte do que no hemisfério sul, o que faz com que as costas do sul da América do Sul, África e Austrália sejam particularmente atraentes para a exploração da energia das ondas. O potencial da energia das ondas é geralmente expresso como potência por

unidade de comprimento (ao longo da crista de onda). Na Figura 2.1 é mostrado o mapa global do recurso da energia das ondas. Qualquer área com médias anuais superiores a 15 kW por metro tem o potencial de converter energia das ondas a preços competitivos [Ocean Energy System, 2014].

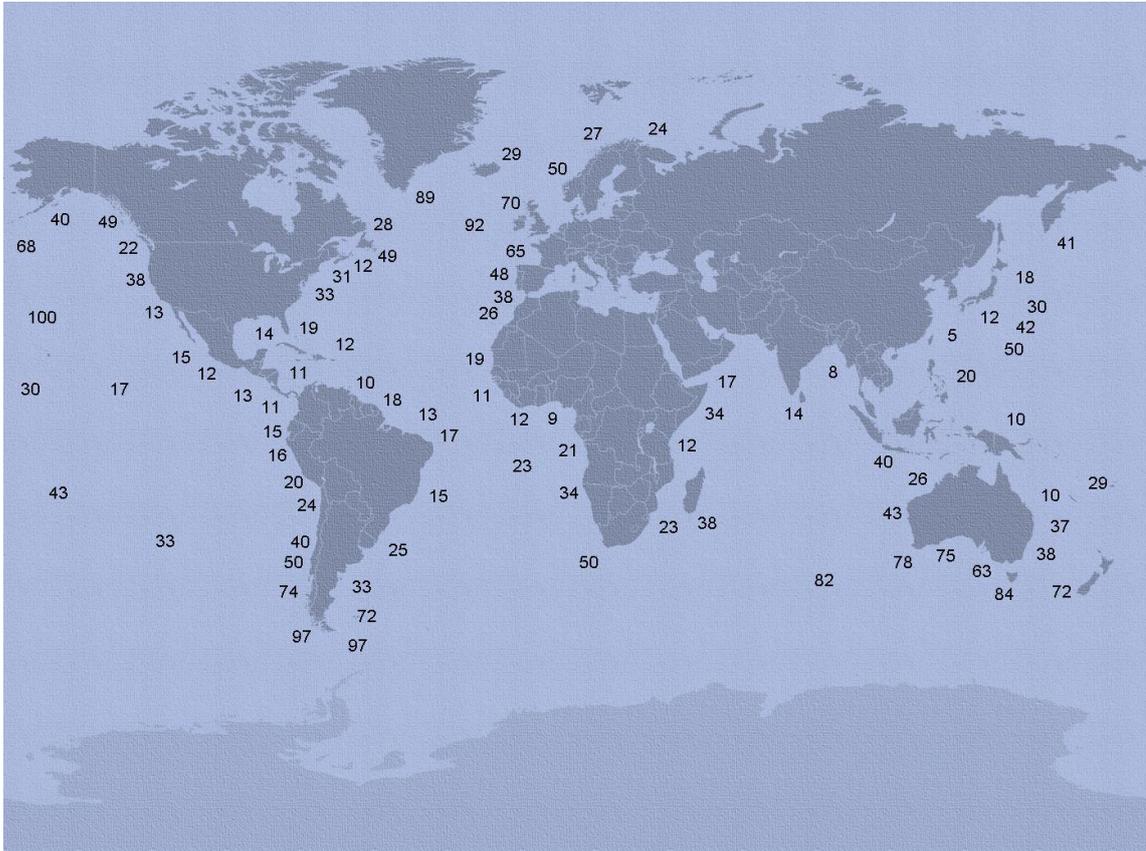


Figura 2.1 – Mapa global de recurso de energia das ondas (Kw/m) [Pelamis, 2014].

Uma estimativa do Potencial Teórico Regional da Energia das Ondas é (*A distribuição regional anual da energia das ondas incidentes nos litorais de países e regiões foi obtida em áreas de potência teórica das ondas $P \geq 5 \text{ kW/m}$ e latitude $\leq 66.5^\circ$*): Europa Ocidental e Norte: 2.800 TWh/ano; Mar Mediterrâneo e Arquipélagos do Atlântico: 1.300 TWh/ano; América do Norte e Groelândia: 4.000 TWh/ano; América Central: 1.500 TWh/ano; América do Sul: 4.600 TWh/ano; África: 3.500 TWh/ano; Ásia: 6.200 TWh/ano; Austrália, Nova Zelândia e Ilhas do Pacífico: 5.600 TWh/ano.

2.1.2 Tecnologias disponíveis de dispositivos conversores de energia das ondas do mar

Existe uma grande variedade de tecnologias de conversão de energia das ondas do mar. As diferenças entre os dispositivos estão na forma de captação da energia, a localização do dispositivo e a profundidade da água no local. Existem cerca de uma centena de projetos em vários estágios de desenvolvimento. Além disso, novos conceitos e tecnologias substituem ou superam as anteriores.

Vários métodos têm sido propostos para classificar os sistemas de conversão de energia das ondas, de acordo à localização, ao princípio de funcionamento e ao tamanho. A seguinte classificação é baseada principalmente no princípio de funcionamento [EMEC, 2014; Aquaret, 2014; Cruz e Sarmiento, 2004]:

- Atenuador (*Attenuator*): é um dispositivo flutuante, que opera perpendicularmente à frente de onda (vide Figura 2.2a). Este dispositivo captura a energia a partir do movimento relativo dos seus dois braços quando a onda passa através deles. Um exemplo comum de atenuador é o dispositivo Pelamis.

- Absorvedor pontual (*Point Absorber*): é uma estrutura flutuante, que absorve a energia em todas as direções por meio dos seus movimentos na superfície da água ou perto dela. O dispositivo converte o movimento da parte superior flutuante, em relação à base, em energia elétrica. A característica de absorção pontual significa, basicamente, a capacidade para absorver energia de uma área de mar superior às dimensões do dispositivo. O sistema pode tomar um número de formas, dependendo da configuração dos corpos imersos. Exemplos comuns de bóias com simetria axial são o Wavebob, o OPT PowerBuoy e o Aquabuoy (vide Figura 2.2b).

- Conversores oscilantes de translação das ondas (*Oscillating Wave Surge Converter*): este conversor pode extrair energia da translação da onda e do movimento das partículas de água dentro dela. O braço oscila como um pêndulo montado sobre um conjunto articulado em resposta ao movimento da água nas ondas (Figura 2.2c). Exemplos comuns são o Waveroller, completamente submerso, e o Oyster, parcialmente submerso.

- Coluna d'Água Oscilante CAO (*Oscillating Water Column*): o CAO é uma estrutura oca parcialmente submersa, com abertura para o mar abaixo da superfície da água, de forma que uma coluna de ar é comprimida no topo pela coluna de água. As ondas causam a subida e descida da coluna de água, o que comprime e descomprime o ar (vide Figura 2.2d). Este ar escoar através de uma turbina, que geralmente tem a capacidade de girar

independentemente da direção do fluxo de ar. A rotação da turbina é utilizada para gerar eletricidade. Os conversores CAO comuns são construídos diretamente na linha costeira (CAO do Pico nos Açores, CAO de Limpet na Escócia) ou integradas em quebra-mares (CAO de Mutriku no País Basco).

- Galgamento (*Overtopping*): O dispositivo de galgamento consiste numa rampa que é galgada pelas ondas e num reservatório de armazenamento da água. A turbina é movimentada pela água que entra no reservatório e depois retorna ao mar. Um dispositivo de Galgamento pode utilizar coletores para concentrar a energia das ondas (vide Figura 2.2e). Os dispositivos podem ser flutuantes como o Wave Dragon, atualmente o maior conversor de energia em desenvolvimento; ou fixos (estruturas em terra), como o SSG (Sea Wave Slot Cone Generator), integrado num quebra-mar.

- Dispositivo Submerso de Diferença de Pressão (*Submerged Pressure Differential*): o dispositivo é normalmente localizado perto da costa e apoiado no fundo do mar. O movimento das ondas provoca a subida e descida do nível da água acima do dispositivo, induzindo uma diferença de pressão que provoca a subida e descida do dispositivo juntamente com as ondas. Como exemplo tem-se o AWS (Archimedes Wave Swing), que também tem boas características de absorção pontual. Outro dispositivo é o Waverotor (vide Figura 2.2f).

- Outras: Isto abrange os dispositivos com um design único e muito diferente dos tipos de tecnologia estabelecidos.

Na Figura 2.2, é possível ver as estruturas descritas anteriormente.

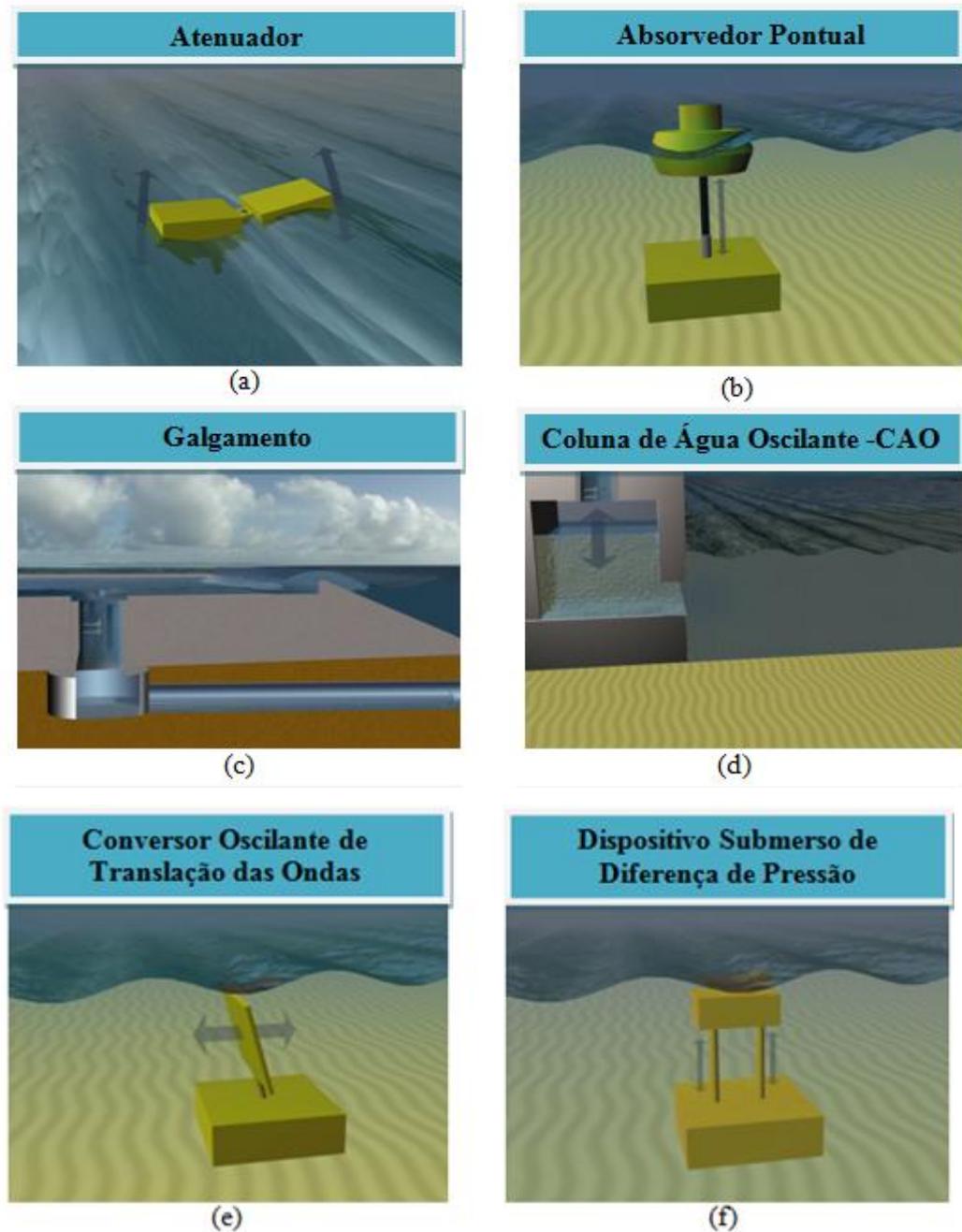


Figura 2.2 – Dispositivos conversores de energia das ondas [Aquaret, 2014].

2.1.3 Etapas de um projeto de energia das ondas do mar

A utilização da energia das ondas do mar abrange uma sequência de processos, cada um dos quais é caracterizado pela sua eficiência, assim como as restrições e procedimentos de controle.

Primeiramente é necessário fazer a caracterização da energia das ondas no local, o que é essencial para compreender a viabilidade do projeto e determinar o custo provável da energia.

Para um determinado local de exploração, o clima de ondas é estabelecido a partir de dados históricos ao longo de um período de vários anos. Inicialmente os dados vêm a partir de medições de satélite e de modelos numéricos de ondas e vento que depois podem ser refinados usando dados de bóias colocadas na vizinhança. Além disso, é importante determinar a direção da onda média e sua distribuição para a localização e a orientação do dispositivo.

A potência que é produzida pelo dispositivo conversor num local determinado depende das características da máquina e do clima de ondas do local. A resposta do dispositivo é conhecida através de um modelo numérico e é comparada e validada contra medições feitas nos dispositivos construídos em escala média ou total. A potência de saída do dispositivo é derivada de toda a gama de estados do mar, cada um definido pela altura efetiva e o período da onda [Pelamis, 2014]. O diagrama das etapas é mostrado na Figura 2.3.

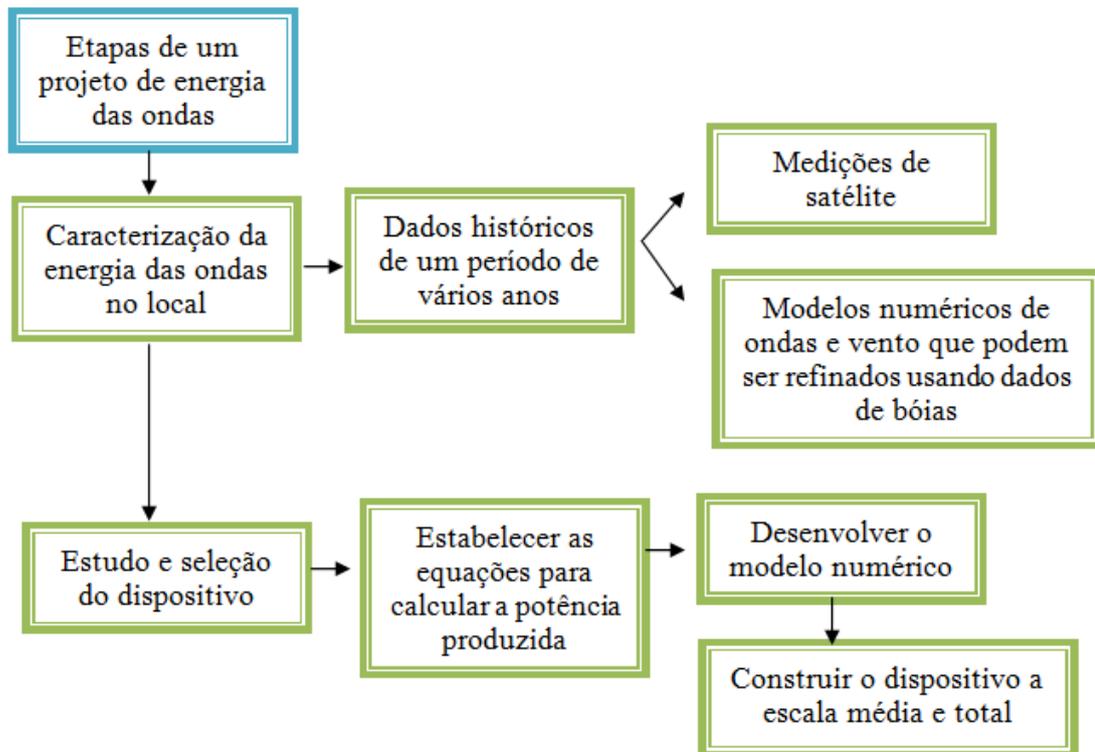


Figura 2.3 – Etapas de um projeto de energia das ondas do mar.

2.1.4 Energia das ondas do mar no Brasil

Estimativas do potencial energético das ondas no Brasil estão ao redor de 87 GW. Além disso, é possível converter cerca de 20% desse potencial em energia elétrica, o que significa 17% da capacidade instalada no país [Estefen, 2012; Coppenario, 2014].

As ondas no Brasil se caracterizam por ter alturas entre 1 e 2m com períodos compatíveis entre 5 e 9 s, mas com constância de cerca de 40% do ano. De forma geral, as regiões com melhor potencial de energia das ondas são a região sul e sudeste, mas há lugares como o estado do Ceará que recebem os ventos alísios constantemente [Planeta Coppe, 2014].

Na atualidade o Brasil tem um projeto desde o ano 2009 de um dispositivo de energia das ondas desenvolvido pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal de Rio de Janeiro. Na Figura 2.4 é possível observar o dispositivo. O dispositivo está localizado no porto de Pecém, no estado de Ceará, e gera aproximadamente 100 kW. A conversão da energia é realizada através dos flutuadores na base de braços mecânicos instalados no quebra-mar, as ondas fazem com que os braços se movimentem na direção vertical, esse movimento gera uma força utilizada para impulsionar água por tubos, isso cria uma grande pressão na câmara hiperbárica, o que faz movimentar a turbina ligada a um gerador que produz eletricidade.



Figura 2.4 – Dispositivo conversor de energia das ondas instalado no estado de Ceará, Brasil [Estefen, 2012].

Além disso, a COPPE está trabalhando no desenvolvimento e construção de um protótipo, para geração de energia elétrica na cidade do Rio de Janeiro. A usina será instalada

a 14 quilômetros da praia de Copacabana (próximo da Ilha da Rasa) com capacidade de 100 kW. A energia do mar será aproveitada usando um flutuador que vai ser movimentado pelas ondas na direção vertical. Dentro do flutuador está localizada a coluna central que é ancorada no leito marinho. A Figura 2.5 apresenta a imagem do protótipo que está sendo desenvolvido [Planeta Coppe, 2014].



Figura 2.5 – Dispositivo que será instalado no Rio de Janeiro, Brasil [Planeta Coppe, 2014].

2.1.5 Estudo do potencial de energia das ondas do mar no Brasil

Em Carvalho, 2010 é apresentado um estudo detalhado da climatologia da energia das ondas para o litoral Brasileiro. Nele foi realizada uma modelagem numérica com a utilização dos dados de vento provenientes da previsão global do Centro Nacional de Previsão Ambiental NCEP (*National Center of Enviromental Prediction*) entre os anos 1997 e 2009. Destacam-se os seguintes dados:

- Nas áreas da região costeira de Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Rio de Janeiro, norte do litoral fluminense e centro sul do Litoral Espírito Santo, os meses de abril a setembro apresentam média mensal acima de 15 kW/m, com destaque para a área entre o Rio Grande do Sul até a região oceânica na latitude do município de Florianópolis - SC. Esta área atinge um máximo de 20 kW/m nos meses de maio e setembro, com média mensal sempre acima de 10 kW/m.

- As áreas que compreendem a região costeira centro-norte do Espírito Santo, da Bahia, de Sergipe, e a região leste do Rio Grande do Norte, apresentam os maiores valores da média mensal de energia de ondas entre os meses de abril e outubro, variando de 10 a 15 kW/m.
- A área da região costeira do Rio Grande do Norte, do Ceará e do Piauí apresenta as menores médias mensais, com valor máximo nos meses de verão (a média no mês de janeiro é de 13 kW/m) e ficando abaixo de 10 kW/m entre os meses de abril e agosto.
- Na área da região costeira do Maranhão, do Pará, e do Amapá, os meses de janeiro a abril apresentam os maiores valores da média, chegando a 15 kW/m no Maranhão e a 19 kW/m no Pará e Amapá, e, nos meses de inverno apresenta uma média abaixo de 10 kW/m.

2.2 O Dispositivo Coluna D'Água Oscilante

O conversor CAO consiste, basicamente, em uma estrutura oca, parcialmente submersa, aberta para o mar abaixo da superfície livre da água (Figura 2.6). A geração de energia elétrica ocorre quando a água, movimentada pelas sucessivas cristas e cavas das ondas, incide na estrutura causando, respectivamente, a compressão e a decompressão do ar no interior de sua câmara hidropneumática. Durante a compressão o ar é forçado a sair e passar por uma turbina, como consequência direta do aumento de pressão na câmara hidropneumática. Quando a água retorna ao mar, o ar passa novamente na turbina, desta vez no sentido inverso, dada a pressão inferior no interior desta câmara. Para aproveitar estes movimentos de sentidos opostos é necessário o uso de uma turbina que mantenha o sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento. Esta turbina é acoplada a um gerador, sendo estes equipamentos os responsáveis diretos pela geração da energia elétrica [Cruz e Sarmiento,2004].

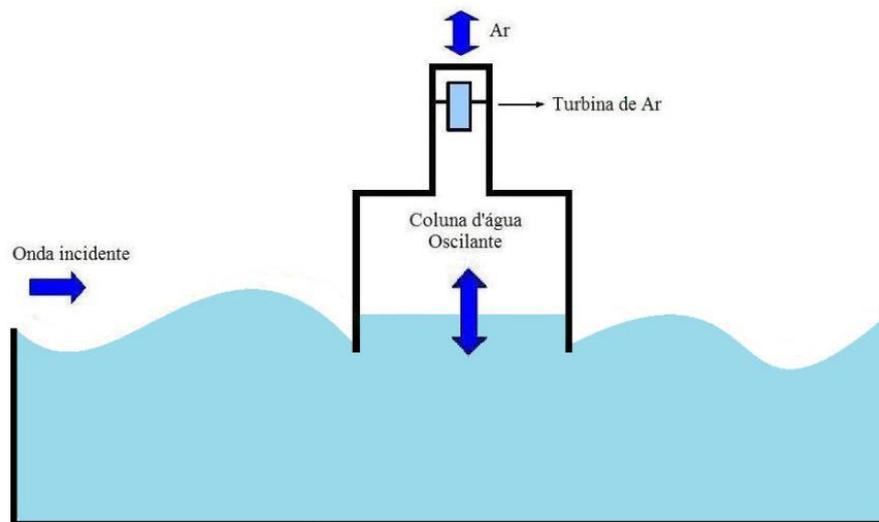


Figura 2.6 – Esquema bidimensional de um sistema CAO, [Gomes, 2014].

2.2.1 Modelagem computacional de conversores de energia das ondas do mar do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO)

Nos últimos anos, foram desenvolvidos diversos trabalhos sobre modelagem computacional de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO. Os mais importantes apresentam-se a seguir.

Em Weber e Thomas, 2001, é apresentado um estudo bidimensional, onde é determinada a eficiência máxima com relação a cinco parâmetros: submergência da barreira frontal (*lip*), comprimento da câmara, altura da câmara acima da superfície livre, diâmetro e velocidade rotacional para o design de uma classe especial de turbina. O espectro de ondas, semelhante ao da Ilha do Pico, é utilizado para representar as condições de mar.

Em Horko, 2007, é apresentado o estudo numérico de um dispositivo Coluna de Água Oscilante, onde são testadas diversas formas geométricas e dimensões da parede frontal do dispositivo chamada de “*lip*”.

Em Conde e Gato, 2008, é analisado o escoamento do ar pelo interior de uma câmara CAO equipada com duas chaminés. A metodologia utilizada consiste em, de acordo com uma função senoidal aplicada à parte inferior do dispositivo CAO, variar a entrada e saída de ar na câmara. Em Marjani et al., 2008, é desenvolvido um estudo sobre o sistema do conversor CAO semelhante ao da ilha do Pico em Portugal, incluindo a modelagem da turbina.

Em Liu et al., 2008^a, é apresentada a modelagem computacional de um dispositivo CAO, onde são estudados casos com diferentes geometrias e, também, com diferentes características de onda. Além disso, o estudo é desenvolvido em *2D* e *3D*.

Em Liu et al., 2011, é apresentado um estudo semelhante ao de Liu et al., 2008a, realizando a comparação de resultados numéricos *2D* e *3D* com resultados experimentais.

Em Ramalhais, 2011, é estudado o comportamento de um dispositivo CAO, exposto a ondas de diferentes períodos. A influência das suas características geométricas na resposta do sistema é analisada. Verificaram-se, também, os efeitos causados pela introdução de diferentes turbinas, para um estado de mar característico.

Em Zhang et al., 2012, um método numérico é desenvolvido para simular a interação da onda com uma câmara semi submersa. O efeito das várias condições de onda, profundidade de submersão, espessura da parede frontal da câmara CAO, geração de vórtices na região de entrada da câmara e características da câmara na eficiência da conversão de energia, são investigados.

Em Teixeira et al., 2013, é analisada numericamente a geometria da câmara de um dispositivo do tipo CAO, além da turbina que possibilita o melhor desempenho do dispositivo.

Em Bouali e Larbi, 2013, é aprimorada a geometria e as dimensões do conversor CAO, para obter a máxima potência disponível, considerando uma onda progressiva com período e comprimento constante. Os resultados das simulações mostram que o tamanho da câmara, a profundidade de submersão e a orientação da parede frontal do dispositivo tem um impacto significativo no desempenho do dispositivo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Conceitos fundamentais sobre Constructal Design

A Teoria Constructal é o pensamento e o entendimento, que a geração de estruturas dos sistemas naturais, onde existe escoamento, é baseada em um princípio evolucionário do aumento de acesso no tempo. Este princípio é a Lei Constructal: *“Para um sistema persistir no tempo sua configuração deve mudar no tempo tal que forneça fácil acesso às suas correntes (fluido, energia, etc)”* [Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008; Bejan e Zane, 2012; Bejan e Lorente, 2013].

A Lei Constructal se aplica através do Método Constructal chamado também de *“Constructal Design”*. O método é utilizado para encontrar formas geométricas ideais que melhoram o fluxo das correntes e para maximizar o desempenho do sistema, representado pela redução da perda de energia. Com o emprego do método, é possível prever muitos fenômenos da natureza e “designs” em Engenharia [Bejan, 2012].

A lei Constructal propõe uma forma de explicar como o design na natureza ocorre: *“Tudo o que escoar, evolui ao longo do tempo: a geração de design e evolução são fenômenos universais”*. Isto é, a evolução dos sistemas que escoam não tem uma intenção definida (por exemplo: um escoamento mais fácil e rápido com canais maiores). Em vez disso, eles evoluem porque estão dirigidos pela lei Constructal. Isto acontece da mesma forma que na lei da gravidade, onde as coisas devem se deslocar em direção ao centro do planeta com a mesma aceleração [Bejan, 2012].

Um dos usos da lei Constructal é reformular a evolução como um processo dinâmico que gera melhores designs. Os melhores designs são levados a superar as imperfeições e facilitar o escoamento de massa usando menos energia.

Todos os sistemas da natureza são movimentados pela energia útil que o sol fornece a eles. Cada sistema que escoar, está sempre fazendo mudanças na sua geometria para superar os obstáculos e distribuir as imperfeições. Tudo o que eles precisam é de liberdade e energia para gerar as mudanças e melhorar a arquitetura do fluxo. Embora o sistema não vá existir sempre, pois sua geometria é o resultado do movimento, mecanismo através do qual o escoamento atinge seu objetivo global sujeito às constantes. Quando o escoamento para, o sistema torna-se um fóssil (ex.: leito do rio seco, esqueleto de um animal, tecnologia abandonada) [Bejan, 2012].

O movimento acontece pela lei da gravidade e, em seguida, todos os sistemas que escoam, estão à procura de atingir o equilíbrio. Mas a forma como eles escoam é governada pela lei Constructal, porque todos eles apresentam um design que evolui no tempo para facilitar o escoamento. Mas o que escoa em um sistema? Pode ser água, calor, sangue, gente. Quando o design aparece num sistema? Há uma fase de transição em que todas as condições necessárias tem que acontecer para existir escoamento. A formação de canais num rio ocorre quando água da chuva se une para formar um riacho e logo essa água torna-se abundante e sua velocidade aumenta [Bejan, 2012].

A lei Constructal explica, por exemplo, que num rio, a eficiência do escoamento pode ser melhorada quando a sua largura é proporcional à sua profundidade. No corpo humano, o sistema circulatório precisa de uma estrutura tipo árvore, com canais para o transporte de água, oxigênio e alimento para todas as células. A Lei Constructal prevê tudo com respeito aos animais, por exemplo, o tamanho de seu coração, formas dos vasos sanguíneos e frequência dos seus movimentos. Com base nesta lei, podemos distinguir quais mudanças ou comportamentos são produto de acidente, acaso ou padrão previsível. [Bejan, 2012].

A Teoria Constructal é consistente também para máquinas feitas pelos homens. A relação de força-massa é a mesma que a dos insetos, dos corredores e dos nadadores. A Teoria Constructal pode prever a velocidade dos aviões, porque eles estão tentando se mover com relação à Terra e contra a gravidade e atrito. Portanto, o sistema animado e o sistema inanimado são considerados como regidos pelo mesmo princípio. Usando a lei Constructal pode ser prevista a taxa metabólica do animal, o tamanho dos órgãos de animais e os componentes de veículos. Uma vez que eles têm a mesma tendência básica para equilibrar imperfeições termodinâmicas, para gerar canais para superar os obstáculos e reduzir as imperfeições [Bejan, 2012].

Assim, usando a lei Constructal podemos explicar ou relacionar fenômenos, porque eles têm semelhanças na forma como cada um deles desenvolve e reorganiza continuamente seu design.

3.1.1 Aplicação do Constructal Design

Uma variedade ampla de configurações de fenômenos naturais pode ser prevista pela Teoria Constructal em ambos os sistemas inanimados (por exemplo, seções transversais de dutos, seções transversais de canal aberto, estruturas de fluxo turbulento, circulação global e

clima) e os sistemas animados (por exemplo, leis alométricas de tamanho de corpo e atividades como voar, correr, nadar e respirar), além de aplicações na engenharia (por exemplo, condução de calor, trocadores de calor e escoamento de fluidos) [Rocha et al. 2013].

A Teoria Constructal tem sido aplicada no design de inserções de alta condutividade nos sistemas de geração de calor (num volume de tamanho fixo com duas regiões: uma região com material de condutividade baixa e uma segunda região com material de condutividade alta que é usado para conduzir o calor gerado ao exterior), com o objetivo de minimizar a resistência do fluxo de calor. Esta aplicação não é só para condução de calor, ela cobre uma variedade ampla de problemas, onde a resistência de fluxo de uma entidade determinada pode ser minimizada. Essa entidade pode ser energia em forma de calor, fluidos, agregados de organismos, ou mesmo as pessoas [Souza e Ordonez, 2013].

Biserni et al., 2007 e Rocha et al., 2010, aplicaram teoria Constructal para otimizar a geometria de cavidades de forma C e H respectivamente, localizadas dentro de uma parede condutora sólida a fim de minimizar a resistência térmica entre o sólido e a cavidade.

Em fluxo de tensões de placas finas, que são estruturas amplamente usadas na construção de prédios, pontes, navios, aviões e automóveis, Isoldi et al., 2013, apresenta um estudo para obter a geometria ótima que minimiza a concentração de tensões ao longo da placa ou suportar a mais alta carga de deformação na placa.

Em redes de distribuição de água potável [Bieupoude et al., 2013], a Teoria Constructal é empregada para otimizar o uso da energia minimizando a potência de bombeamento (através da otimização da geometria da rede), a qual é uma questão crítica em países em desenvolvimento que estão em necessidade de grandes esforços para a construção de áreas urbanas. O estudo é dirigido à criação de novas áreas urbanas de cidades em processo de expansão onde os planejadores estão desenvolvendo novos locais de prédios.

Lorente, 2013, apresenta uma aplicação da teoria Constructal na transferência electrocinética (que resulta de aplicar uma corrente elétrica ou um campo elétrico a um meio para acelerar e controlar a transferência das espécies carregadas). Algumas das aplicações desta técnica são descontaminação nuclear e descontaminação de cloreto. O estudo demonstra que a maximização da transferência iônica não só aumenta aprimorando a transferência electrocinética no tempo, mas também com uma geometria do sistema aprimorada.

Em medicina a lei Constructal tem sido aplicada ao tratamento de câncer. A propagação do câncer pode ser controlada mantendo a temperatura do tecido normal circundante ao tumor abaixo de certo limite, de modo a não danificar o tecido. Em Wang et

al., 2007, se apresenta um modelo e um método numérico baseado na Teoria Constructal para a obtenção de uma distribuição da temperatura ideal numa estrutura de três camadas de pele encaixada com vasos sanguíneos multi-nível.

Em economia, a Teoria Constructal mostra que o custo do transporte pode ser minimizado otimizando as rotas de transporte de bens e produtos desde uma área a outra numa forma dendrítica a fim de obter a distância mais curta e fácil [Bejan et al., 2000].

3.1.2 Constructal Design aplicado aos conversores de energia das ondas do mar

Constructal Design é um método que recentemente tem sido aplicado com sucesso na modelagem numérica de conversores de energia das ondas do mar, tanto para conversores tipo CAO quanto Galgamento para aprimorar seu desempenho.

Para aplicar o Constructal Design é necessário definir uma função objetivo que é a quantidade a ser aprimorada, os graus de liberdade (que são variados para analisar a influência das dimensões da geometria no desempenho do dispositivo) e as restrições do problema ou parâmetros constantes.

A função objetivo nos estudos desenvolvidos em conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica tem sido maximizar a potência hidropneumática. Os graus de liberdade e restrições são definidos segundo o tipo de dispositivo conversor a ser aprimorado.

Em Lopes et al., 2012 e Dos Santos et al., 2013 Constructal design é empregado para aprimorar a geometria de um dispositivo CAO, variando o grau de liberdade L/l (razão entre o comprimento da câmara e o comprimento de chaminé) para maximizar a vazão mássica de ar na chaminé. Além disso, em Machado et al., 2011 e Dos Santos et al., 2013 o Constructal Design é aplicado com o propósito de aprimorar a geometria de um dispositivo do tipo Galgamento considerando como grau de liberdade a relação entre a altura da rampa e o seu comprimento. Ambos os estudos confirmam a aplicabilidade da Teoria Constructal para aprimorar as geometrias dos conversores de energia das ondas.

Em Oliveira et al., 2012, é aplicado Constructal Design para aprimorar as dimensões da câmara de ar de um dispositivo do tipo CAO. A proposta consiste em investigar a relação H_1/L (relação entre a altura e o comprimento da câmara de CAO), que possibilita extrair a máxima potência disponível na onda incidente. Na Figura 3.1 é possível verificar os graus de liberdade indicados.

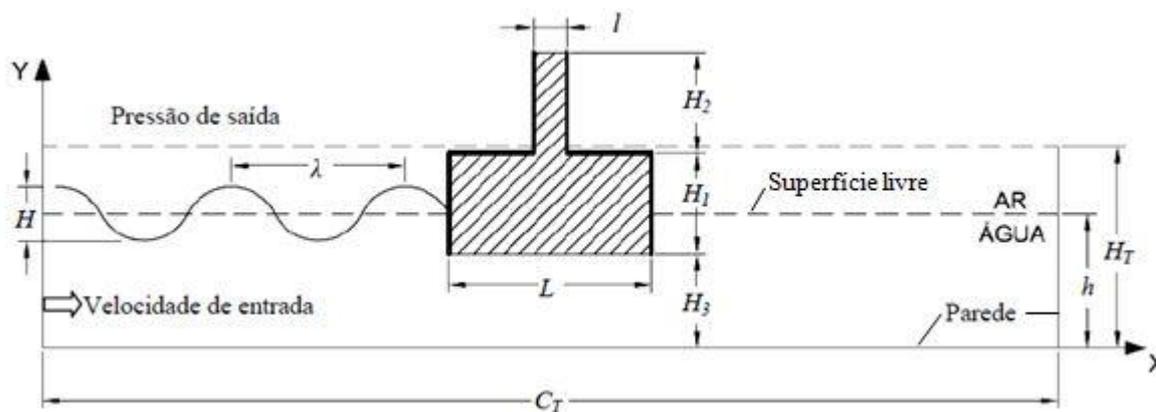


Figura 3.1 – Domínio Computacional Bidimensional do dispositivo CAO.

Em Gomes et al., 2012b, o estudo é desenvolvido com localização *offshore* para o dispositivo. Uma onda em escala de laboratório, com período de 0,8 s e comprimento de onda de 1,0 m, é empregada. O grau de liberdade variado é H_1/L . Os resultados mostram a utilidade do método ao melhorar a potência hidropneumática cerca de 10 vezes entre a melhor e a pior geometria simulada. Em Gomes et. al., 2013a, é empregada uma onda na escala real com período de 5 s. Os graus de liberdade H_1/L e H_3 (Profundidade de submersão) são variados e aprimorados. Enquanto em Gomes et al., 2013b, empregando Constructal Design, é realizada uma comparação entre as localizações *offshore* e *onshore* para o dispositivo CAO, submetido a uma onda na escala real. Além disso, o grau de liberdade H_1/L é variado.

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

Em Santos et al., 2014, é abordado um dispositivo conversor de energia das ondas do mar cujo princípio de funcionamento é o galgamento. Um estudo numérico é realizado para otimizar geometricamente, empregando Constructal Design, o conversor submetido a diversas profundidades relativas.

De forma geral, pode-se observar a aplicabilidade de Constructal Design em problemas relacionados com a busca de uma geométrica aprimorada dos dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, onde, com umas redistribuições nas dimensões da geometria, é possível obter resultados que conduzem a melhores desempenhos em termos da potência hidropneumática.

3.1.3 Formulação matemática com Constructal Design para dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo CAO

Neste trabalho é apresentado um estudo numérico bidimensional que tem como função objetivo, maximizar a potência hidropneumática convertida num dispositivo tipo Coluna d'Água Oscilante (CAO). Para fazer isto, a geometria e a profundidade de submersão do dispositivo são aprimoradas, ou seja, diversas dimensões são estudadas até encontrar aquelas que permitem obter uma potência hidropneumática mais elevada.

Considera-se um clima de ondas na escala real com período de 5 s e comprimento de onda de 37,6 m. Além disso, é considerado escoamento laminar. Três graus de liberdade são variados e aprimorados: H_1/L (razão entre a altura e comprimento da câmara do dispositivo), H_2/l (razão entre a altura e o comprimento da chaminé) e H_3 (profundidade de submersão do dispositivo CAO).

As restrições do problema (ou parâmetros constantes) são a área da câmara do dispositivo CAO A_1 e a área total do dispositivo CAO A_2 , que são definidas como:

$$A_1 = H_1 L \quad (3.1)$$

$$A_2 = H_1 L + H_2 l \quad (3.2)$$

A partir da Equação 3.1 pode-se conhecer o valor do comprimento L e a altura H_1 da câmara CAO:

$$L = \left(\frac{A_1}{H_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

$$H_1 = L \left(\frac{H_1}{L} \right) \quad (3.4)$$

E com a Equação 3.2, calculam-se os valores para o comprimento l e altura H_2 da chaminé do dispositivo CAO:

$$l = \left(\frac{A_2 - A_1}{\frac{H_2}{l}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

$$l = \left(\frac{A_2 - A_1}{\frac{H_2}{l}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

Para definir os valores iniciais da geometria e os valores das áreas do dispositivo CAO, são consideradas as características da onda incidente. Então para o valor do comprimento L é selecionado o valor do comprimento de onda equivalente a 37,6 m, enquanto para a altura H_1 considera-se o valor da altura da onda incidente H . Além disso, o valor de H também é levado em conta na variação do H_3 .

O valor da área da câmara do dispositivo A_1 é de 37,60 m² que é igual ao comprimento de onda. O valor da área A_1 , é considerada como o 70% da área total A_2 , logo, $A_2 = 53,71$ m². Para analisar a influência das dimensões geométricas são variados os graus de liberdade H_1/L , H_2/l para valores de H_3 de 10,25 m; 10,00 m; 9,75 m; 9,5 m; 9,25 m; 9,00 m. É importante destacar que H_3 é variado em relação à altura da onda H , que é igual a 1,00 m em todos os casos.

As Tabelas 3.1 e 3.2 exibem as dimensões do dispositivo CAO para cada valor de H_1/L e H_2/l respectivamente.

Tabela 3.1 – Dimensões de H_2 e l .

Caso	H_2/l	l [m]	H_2 [m]
1	2,3	2,6469	6,0879
2	2,5	2,5388	6,3471
3	3,0	2,3176	6,9529
4	4,0	2,0071	8,0285
5	6,0	1,6388	9,8328

Tabela 3.2 – Dimensões de H_1 e L .

Caso	H_1/L	L [m]	H_1 [m]
1	0,0226	37,5969	1,0000
2	0,0399	30,6978	1,2248
3	0,0598	25,0646	1,5001
4	0,0897	20,4652	1,8372
5	0,1346	16,7100	2,2500
6	0,2019	13,6434	2,7558
7	0,3029	11,1398	3,3752
8	0,4544	9,0956	4,1338
9	0,6817	7,4265	5,0629
10	1,0225	6,0637	6,2007

3.2 Introdução à Teoria das Ondas Oceânicas

As ondas oceânicas são deformações na superfície do mar resultantes da transferência de quantidade de movimento entre dois fluidos de densidades diferentes causadas pelo efeito da viscosidade do vento com a camada superficial do oceano. A força de gravidade restabelece o equilíbrio na superfície da água contribuindo com a movimentação da mesma. A quantidade de energia transferida do vento para a superfície do mar depende da intensidade do vento, do tempo de atuação desse vento e da área sobre a qual ele está atuando. A densidade de energia presente nas ondas em regiões costeiras diminui devido à interação com o fundo do mar [Cruz e Sarmiento, 2004].

As ondas são geradas pela ação dos ventos e da gravidade nos oceanos. Elas são caracterizadas pelos seus períodos entre 0,25 e 30 s e seu correspondente comprimento de onda de 0,1 até 1500 m (em águas profundas).

A Figura 3.2 apresenta as dimensões e características que descrevem uma onda oceânica. O período T é o tempo decorrente da passagem destas cristas ou mesmo das cavas; a frequência f é o inverso do período; a altura de onda H é a distância vertical entre uma crista e uma cava; a profundidade local h é a distância do fundo do mar até o nível médio da água (superfície livre); a elevação do nível do mar η representa a distância instantânea da superfície livre ao plano médio do nível da água; o comprimento de onda λ é a distância horizontal entre duas cristas (ou cavas) de ondas sucessivas.

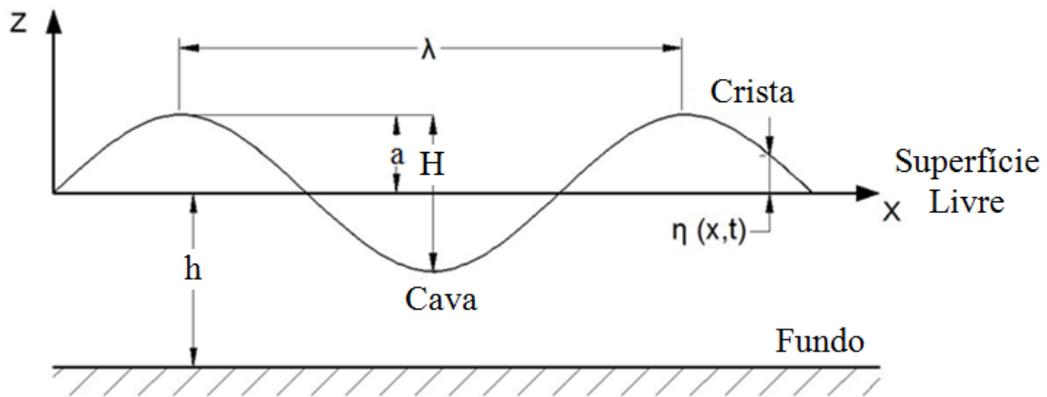


Figura 3.2 – Características das ondas oceânicas.

O comprimento de onda λ pode-se calcular da seguinte forma [Gomes, 2014],

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \quad (3.7)$$

3.2.1 Teoria Linear

As ondas do oceano de acordo com Holthuijsen, 2007, são aleatórias e sua descrição na *Teoria Linear* é baseada na noção de somatória de um grande número de ondas harmônicas independentes. A Teoria Linear baseia-se em duas equações fundamentais e algumas condições de contorno simples, descrevendo alguns aspectos da cinemática e dinâmica das ondas. Quando as equações junto às condições de contorno são linearizadas para a propagação livre, a solução da linearização é descrita pelas ondas harmônicas.

O caráter linear implica que as ondas não se afetam entre elas, enquanto elas viajam juntas em toda a superfície da água. O principal requisito para aplicar a Teoria Linear é que as amplitudes das ondas sejam pequenas, isto é, ondas com comprimentos de onda e profundidade baixas.

A Teoria Linear, também é conhecida como a *Teoria de onda de Airy* e a onda harmônica envolvida é, por conseguinte chamada de onda de Airy. A Teoria Linear de ondas de gravidade e superfície tem sido a teoria básica das ondas oceânicas por cerca de 150 anos.

3.2.1.1 Equações básicas

Na Teoria Linear, a água é considerada um fluido ideal, ou seja, incompressível, com massa específica constante e sem viscosidade, onde a força da gravidade é a única força que controla o movimento das partículas.

As equações de balanço usuais em mecânica de fluidos são consideradas na Teoria Linear. A solução destas equações é feita através do conceito da função do potencial de velocidade $\phi = \phi(x, y, z, t)$, o qual é definido como uma função onde as derivadas parciais são iguais às velocidades das partículas de água. Assim a equação de continuidade torna-se a equação de Laplace,

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \rightarrow \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.8)$$

A linearização das equações de momento na direção x fica,

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz \right) = 0 \quad (3.9)$$

o termo gz representa a força do peso na direção z e não altera o significado da equação para x e y , pois quando for feita a derivada o termo desaparece.

As equações de momento na direção y e z ficam respectivamente,

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz \right) = 0 \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz \right) = 0 \quad (3.11)$$

Segundo as Equações 3.9 – 3.11, a soma dos termos no parêntesis demonstra que não é função de x , y e z . Portanto ela pode ser uma função que depende do tempo $f(t)$ e que é igual a 0 , para obter a equação de Bernoulli,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + gz = 0 \quad (3.12)$$

3.2.1.2 Condições de contorno

As condições de contorno na Teoria Linear estão relacionadas aos movimentos das partículas da água (condições de contorno cinemáticas) e às forças que atuam sobre elas (condições de contorno dinâmicas).

Os contornos laterais, no topo e no fundo do domínio x , são controlados pela suposição que a onda é periódica com crista longa infinita na direção y . Isso faz com que a onda seja descrita como bidimensional (na direção x e na direção z).

As condições de contorno cinemáticas são na superfície e no fundo. Na condição de contorno na superfície, a velocidade da partícula de água normal à superfície é igual à velocidade da superfície nessa direção. Para $z=0$,

$$u_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (3.13)$$

η é a elevação da superfície, medida verticalmente para cima de $z=0$.

A condição de contorno no fundo é para $z=-d$,

$$u_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (3.14)$$

A condição de contorno dinâmica baseia-se na equação linearizada de Bernoulli em $z=0$, e com $P=0$,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \quad (3.15)$$

Uma solução da equação de Laplace com as condições de contorno cinemáticas é uma onda harmônica ($a \ll h$; $ak \ll 2\pi$) que se propaga na direção x ,

$$\eta(x,t) = a \cos(\omega t - kx) \quad (3.16)$$

onde a é a amplitude da onda, ω é a frequência e k é o número de onda, que são respectivamente iguais a,

$$a = \frac{H}{2}; \omega = \frac{2\pi}{T}; k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.17)$$

A função de potencial de velocidade fica expressa assim,

$$\phi = \hat{\phi} \cos(\omega t - kx) \quad (3.18)$$

onde $\hat{\phi}$ é igual a,

$$\hat{\phi} = \frac{\omega a \cosh[k(h+z)]}{k \sinh(kh)} \quad (3.19)$$

As velocidades podem ser obtidas a partir da derivada espacial do potencial de velocidade,

$$u_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \omega a \frac{\cosh[k(h+z)]}{\sinh(kh)} \sin(\omega t - kx) \quad (3.20)$$

$$u_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \omega a \frac{\sinh[k(h+z)]}{\sinh(kh)} \cos(\omega t - kx) \quad (3.21)$$

A teoria de ondas mais simples é a teoria Linear de ondas. As teorias não lineares conseguem obter uma representação mais próxima das ondas reais, embora, em estudos anteriores [Barreiro 2009; Machado et al., 2011; Ramalhais, 2011; Gomes, 2014] foi empregada a teoria Linear das ondas com sucesso, na otimização de conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica.

4 MODELO COMPUTACIONAL

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) é a análise dos sistemas que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor e reações químicas, por meio de simulações computacionais. Esta ferramenta é aplicada em muitas áreas industriais e não industriais como: aerodinâmica de aeronaves e veículos, plantas de energia com motores de combustão interna ou turbinas de gás, engenharia marinha, engenharia ambiental, hidrologia, oceanografia, meteorologia, engenharia biomédica. O CFD tem como vantagens a redução substancial de tempo e o custo de novos designs, a habilidade para estudar sistemas onde é difícil ou impossível fazer experimentos, a habilidade para estudar sistemas com condições perigosas e, além disso, não tem limite no nível de detalhe dos resultados [Versteeg e Malasekera, 2007].

Uma análise por CFD consiste de três etapas: o pré-processamento, o processamento e o pós-processamento. No pré-processamento define-se o domínio computacional, a geração da malha, o número de elementos (ou células), a seleção dos fenômenos físicos ou químicos que precisam ser modelados, a definição das propriedades dos fluidos e a especificação das condições de contorno. No processamento, as técnicas de solução numérica comumente usadas são: Diferenças Finitas, Elementos Finitos e Volumes Finitos. Os três métodos seguem os seguintes passos: aproximação das variáveis de fluxo desconhecidas através de funções simples, discretização das equações governantes e solução das equações algébricas. A principal diferença dos métodos está na forma como eles fazem a aproximação das variáveis e o processo de discretização. O pós-processamento refere-se à interpretação dos resultados, elaboração de gráficos, vídeos, tabelas, etc. [Versteeg e Malasekera, 2007].

A modelagem computacional realizada no presente trabalho foi desenvolvida empregando o método dos Volumes Finitos (Seção 4.4). Para cada variação dos graus de liberdade, isto é, a variação das dimensões da geometria e da profundidade de submersão, é desenvolvida a malha, a solução numérica e o processamento dos resultados para determinar a potência, a vazão mássica e a pressão. O tempo empregado é de aproximadamente 5 horas por caso, num computador que possui 4 GB de memória RAM e um processador de 4 núcleos.

4.1 Domínio computacional

Para representar o princípio de funcionamento do dispositivo CAO é necessário utilizar modelagem computacional. Cabe destacar que nesse estudo a perda de carga da turbina não foi considerada. A seguir serão apresentados os diferentes aspectos envolvidos no desenvolvimento desse modelo computacional.

O esquema do domínio computacional bidimensional apresentado na Figura 3.1, é composto pelo dispositivo CAO inserido num tanque de ondas. As dimensões do dispositivo são, a altura da câmara H_1 , o comprimento da câmara, a altura da chaminé H_2 , o comprimento da chaminé l e a profundidade de submersão do dispositivo H_3 . λ , H e h são, respectivamente, o comprimento de onda, a altura da onda e a profundidade.

Para minimizar o efeito da reflexão das ondas, a altura do tanque H_T foi definida como a profundidade de propagação h mais 3 vezes a altura da onda. Enquanto o comprimento do tanque C_T é 5 vezes o comprimento da onda λ . As dimensões do tanque e as características da onda são apresentadas na Tabela 4.1. As características da onda, tais como, a altura e o período, foram definidos levando em conta as características das ondas no Brasil.

Tabela 4.1 – Dimensões do tanque e características da onda incidente.

Dimensões	Valores
Período da onda (T)	5 s
Comprimento da onda (λ)	37,6 m
Altura da onda (H)	1 m
Profundidade (h)	10 m
Comprimento do tanque (C_T)	188 m
Altura do tanque (H_T)	13 m

4.2 Condições de contorno

Para simular a geração das ondas no domínio computacional e a variação da velocidade das mesmas (lado esquerdo do tanque, até a altura h , nível médio da água ou profundidade de propagação), é empregada uma função definida pelo usuário UDF no software FLUENT, desenvolvida por Gomes et al. (2009) (Anexo A). A função contém uma

variação da velocidade de entrada que depende do espaço e do tempo com base na Teoria Linear de ondas.

As outras condições de contorno consistem em pressão atmosférica na superfície superior do tanque e na saída da chaminé, e, condições de não deslizamento e impermeabilidade para o fundo e o lado direito do tanque.

4.3 Geração da malha

A solução de um problema de escoamento (avaliando velocidade, pressão, temperatura) numa malha, é definida nos nós dentro de cada célula. A aproximação de uma solução em CFD é governada pelo número de células no domínio computacional (na malha). Na maioria das vezes, um maior número de células garante uma maior exatidão na solução. A precisão e o custo em termos de capacidade do hardware e tempo de simulação dependem do refinamento da malha. As malhas ótimas são frequentemente não uniformes: refinadas em áreas onde ocorrem variações significativas de ponto a ponto e mais grossas em regiões com pouca mudança [Versteeg e Malasekera, 2007].

O método de malha *estruturada* utiliza elementos quadrados em 2D e hexaédricos em 3D. O método possibilita um maior nível de precisão dos esquemas numéricos. Enquanto ao método de malha *não estruturada*, ele não segue padrão algum, pois utiliza triângulos em 2D e tetraedros em 3D, seu benefício é o de permitir a geração de malha para geometrias complexas [Versteeg e Malasekera, 2007].

Neste estudo, a malha utilizada é 2D estruturada por tratar-se de uma geometria simples, além da possibilidade de obter maior precisão nos resultados. A proposta da malha é baseada nos estudos desenvolvidos por Barreiro, 2009 e Gomes et al., 2012a, com malhas tipo *stretched*, ou seja, malhas que têm um refinamento especial na zona de interesse, que é, a zona da superfície livre, onde ocorre a propagação da onda, para encontrar um número de elementos ótimo que permite um equilíbrio entre a precisão dos resultados e o tempo de simulação. Para fazer isto, o domínio computacional é dividido em regiões. Na Figura 4.2 é possível observar o domínio computacional composto pelo tanque de ondas e pelo dispositivo CAO parcialmente submerso. Na direção *y* o tanque de ondas está dividido em três regiões: A, B e C. onde a região B tem um refinamento maior porque é onde se localiza a superfície livre. O estudo consiste em variar o número de volumes de cada região, logo, encontrar a solução numérica da geração da onda. A verificação da geração da onda é realizada através de uma

comparação com a solução analítica dada pela Equação 3.16 e proposta pela Teoria Linear das Ondas. Como resultado do estudo, nas regiões A e C é adotado um refinamento de 10 e 90 volumes respectivamente. Na região B, o refinamento é de 40 volumes (o tamanho desse intervalo fica em $H/20$). Na direção x , tem-se 50 volumes por comprimento de onda. Para a discretização do dispositivo CAO, são empregados quadrados de lados iguais a 0,1 m.

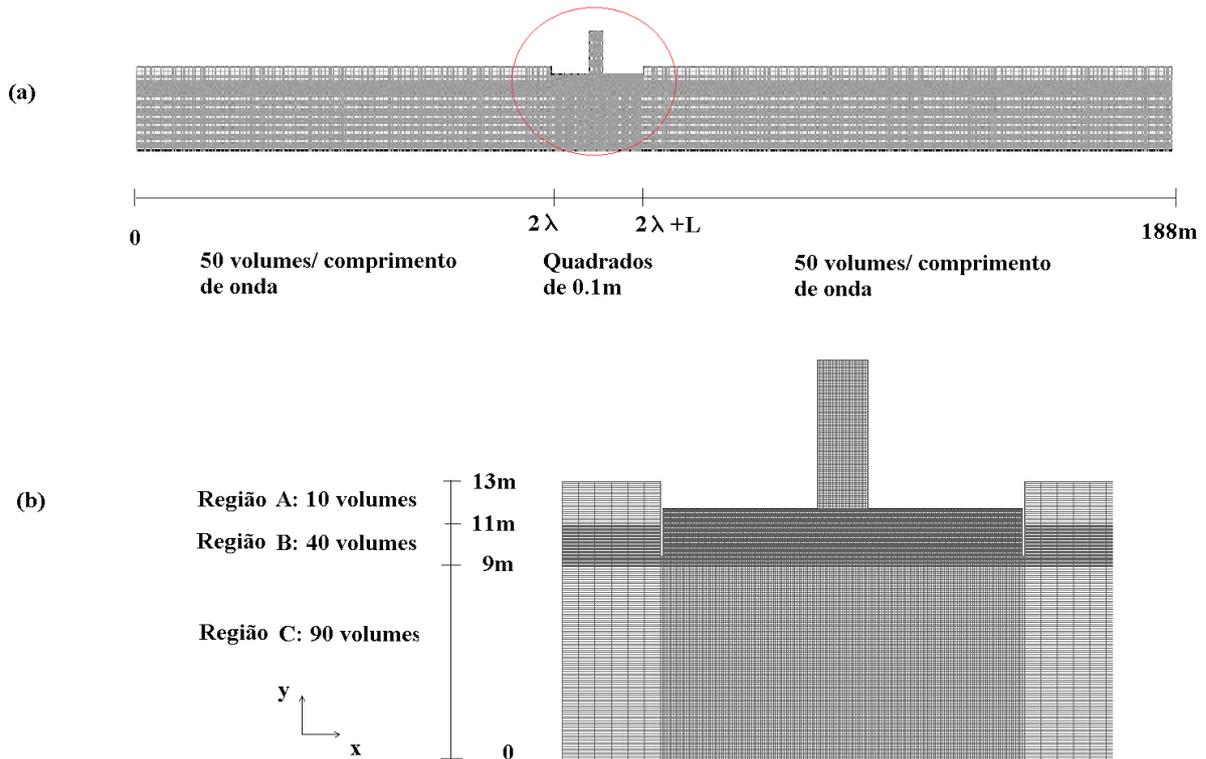


Figura 4.1 – Discretização do domínio computacional (a) e detalhe do dispositivo CAO (b).
Refinamento da malha: Gomes et al., 2012.

No estudo de Gomes et al., 2012, é utilizado o software Ansys Gambit 2006, mas, no presente trabalho, a malha é desenvolvida em Ansys Icem 2013, com o objetivo de atualizar a versão do software e aproveitar as novas ferramentas disponíveis que permitem ao usuário progredir rapidamente e produzir uma superfície ou volume de alta qualidade com mínimo esforço [Ansys, 2014].

4.4 Solução do Modelo Numérico

O programa selecionado para desenvolver o estudo numérico foi Ansys Fluent, o qual é baseado no método dos Volumes Finitos. O método dos Volumes Finitos foi originalmente

desenvolvido como uma formulação especial de Diferenças Finitas. O algoritmo numérico é composto pela integração das equações governantes do escoamento do fluido sobre todos os volumes de controle do domínio computacional, a geração do sistema de equações algébricas através da discretização dos termos das equações integrais e a solução das equações algébricas com o método iterativo. A integração do volume de controle é o que diferencia o método se comparado com as outras técnicas de CFD. As expressões resultantes manifestam a conservação das propriedades relevantes para cada célula computacional (volume de controle). A conservação de uma variável qualquer de fluxo β , a velocidade do componente ou entalpia dentro do volume de controle pode ser expressa como um balanço entre os processos que tem a tendência de se incrementar ou diminuir, ou seja,

$$\left(\begin{array}{c} \text{Taxa de variação} \\ \text{de } \beta \text{ no volume} \\ \text{de controle em} \\ \text{relação ao tempo} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Fluxo líquido de} \\ \beta \text{ devido a} \\ \text{convecção no vc} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Fluxo líquido de} \\ \beta \text{ devido a} \\ \text{difusão no vc} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Taxa líquida de} \\ \text{criação de } \beta \\ \text{dentro de vc} \end{array} \right) \quad (4.1)$$

Os códigos de CFD contém técnicas de discretização apropriadas para o tratamento dos fenômenos de transporte, convecção e difusão, além do termo fonte e a taxa de variação em relação ao tempo. Os códigos comerciais apresentam uma seleção mais recente destas técnicas [Versteeg e Malasekera, 2007].

O software Ansys Fluent é selecionado para desenvolver o modelo numérico devido a sua capacidade para modelar o escoamento entre as fases, além da sua precisão e rapidez, para obter os resultados.

4.4.1 Modelo VOF para problemas multifásicos

Na atualidade existem duas abordagens para os problemas multifásicos, Euler-Lagrange e Euler-Euler. O primeiro tem uma fase fluida e uma fase dispersa, a qual ocupa uma fração de volume pequena, e está formada por partículas, gotas, bolhas (*bubbles*) e ocorrem trocas de quantidade de movimento, massa e energia com a fase fluida. Este método é apropriado para modelar secadores tipo spray, combustão de carvão e combustíveis líquidos, mas não é recomendado para misturas líquido-líquido, leite fluidizado, ou qualquer aplicação onde a fração de volume da segunda fase não possa ser desprezada. No método Euler-Euler empregado no presente trabalho, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra. As

frações volumétricas são consideradas funções contínuas no espaço e no tempo e sua somatória é igual a 1. As equações de conservação para cada fase são derivadas para obter um grupo de equações as quais têm estruturas similares para todas as fases [Theory Guide Ansys, 2009].

Em Ansys Fluent, tem-se três modelos multifásicos: o modelo *Volume of Fluid (VOF)*, modelo *Mixture*, e o modelo *Eulerian*. O modelo *Mixture* é indicado para resolver problemas de escoamentos com partículas carregadas com carga elétrica baixa (*particle-laden flows*), fluxos borbulhantes (*bubbly flows*), sedimentação e separadores de ciclone, e, o modelo *Eulerian* é empregado para coluna de bolhas, tirantes (*risers*), suspensão das partículas e leito fluidizado. Enquanto ao modelo *VOF*, desenvolvido por Hirt e Nichols, 1981, está definido para dois ou mais fluidos imiscíveis onde a posição da interface dos fluidos é de interesse. Um único conjunto de equações de quantidade de movimento é compartilhado pelos fluidos e a fração volumétrica de cada um dos fluidos em cada célula computacional é monitorada em todo o domínio. O modelo VOF tem sido empregado na simulação numérica dos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica. Validações e verificações desta metodologia podem ser encontradas em Horko, 2007; Liu et al., 2008a; Liu et al., 2008b; Gomes et al., 2009; Gomes, 2010; Ramalhais, 2011; Liu et al., 2011 e Gomes et al., 2012.

4.4.1.1 Restrições do modelo VOF

As restrições associadas ao modelo VOF são:

- Usar com o modelo *pressure-based* (vide seção 4.4.2)
- Todos os volumes de controle (ou células) estão cheios de uma fase ou uma mistura das duas fases.

Em cada célula a soma das frações volumétricas de todas as fases é igual a 1. Para um fluido q , sua fração volumétrica está representada por α_q e tem três possibilidades,

- $\alpha_q=0$, a célula não contém fluido q
- $\alpha_q=1$, a célula está cheia de fluido q
- $0<\alpha_q<1$, a célula contém a interface entre o fluido q e um ou mais fluidos.

4.4.1.2 Equação da fração volumétrica

O rastreamento da interface se faz através da equação de continuidade da fração volumétrica de uma ou mais fases. Para a fase ou fluido q , tem-se,

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) \quad (4.2)$$

onde m_{qp} é a transferência de massa da fase q à fase p e m_{pq} é a transferência de massa da fase p à fase q . Normalmente o termo S_{α_q} é zero, mas pode ser especificada uma fonte de massa constante ou definida pelo usuário para cada fase.

Lembrando a restrição do método, a equação de fração volumétrica é resolvida levando em conta que,

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (4.3)$$

A equação de fração volumétrica pode ser resolvida com o esquema implícito ou o esquema explícito. O método implícito emprega esquemas baseados em diferenças finitas para resolver os fluxos em todos os volumes incluindo os volumes perto da interface. A equação de fração volumétrica discretizada fica,

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^{n+1} + U_f^{n+1} + \alpha_{q,f}^{n+1}) = \left[\sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) + S_{\alpha_q} \right] V \quad (4.4)$$

onde $n+1$ é o passo de tempo atual, n o passo de tempo anterior, $\alpha_{q,f}$ o valor nominal da fração da fase q (que pode ser calculado com o método *Upwind* de primeira ou segunda ordem), V o volume da célula, e U_f o fluxo de volume através da face, com base na velocidade normal. Como esta equação precisa da fração volumétrica do passo de tempo atual, uma equação escalar de transporte é resolvida iterativamente para cada fração de volume da fase secundária para cada passo de tempo.

No esquema explícito, um esquema de interpolação de diferenças finitas é aplicado aos valores da fração volumétrica que foram computados no passo de tempo anterior,

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q + U_f^n + \alpha_{q,f}^n) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{\alpha_q} \right] V \quad (4.5)$$

Esta formulação não precisa da solução iterativa da equação de transporte durante cada passo de tempo. Quando este esquema é utilizado para a discretização do tempo, os fluxos da fase podem ser interpolados usando reconstrução da interface (como *Geo reconstruct* ou *Dono Aceptor*). Os esquemas de discretização disponíveis para *VOF* com formulação explícita são *Upwind* de primeira e segunda ordem, entre outros [Theory Guide Ansys, 2009]. Neste trabalho foi empregado o esquema explícito com *Upwind* de primeira ordem e *Geo reconstruct* que serão expostos na Seção 4.4.2.4 (b e c respectivamente).

4.4.2 Métodos de solução

Os métodos numéricos de solução são: *Pressure-Based solver*, que é empregado para escoamento de fluidos incompressíveis de baixa velocidade e *Density-Based Solver*, que é utilizado para fluidos compressíveis a alta velocidade. O método *VOF* está acoplado ao solver baseado na pressão. A técnica do método consiste em [Theory Guide Ansys, 2009],

- Divisão do domínio em volumes de controle discretos usando a malha.
- Integração das equações governantes em cada volume de controle para obter equações algébricas, para as variáveis discretas dependentes como a velocidade, pressão, temperatura, etc.
- Linearização das equações algébricas e solução do sistema de equações lineares resultantes, para produzir valores das variáveis dependentes.

O *Pressure-Based solver* tem dois algoritmos, o *segregado* e o *acoplado*. O algoritmo *acoplado* resolve um sistema de equações acoplado que compreende a equação de quantidade de movimento e a equação de continuidade. As outras equações são resolvidas de forma dissociada como no algoritmo *segregado*. A taxa de convergência da solução é melhor neste algoritmo, mas o requerimento da memória do computador aumenta duas vezes comparado com o algoritmo *segregado*, pois o sistema de todas as equações de quantidade de movimento e continuidade precisa ser armazenado para resolver os campos de pressão e velocidade.

Entretanto o algoritmo *segregado*, empregado neste trabalho, usa um algoritmo de solução onde as equações governantes são resolvidas sequencialmente ou segregadas a partir de outra equação. A solução é efetuada iterativamente até obter convergência. O algoritmo é considerado eficiente para a memória do computador, pois as equações só precisam ser armazenadas na memória uma por cada vez [Theory Guide Ansys, 2009].

4.4.2.1 Solução do sistema de equações

Para resolver o sistema de equações discretizadas, é usado o solver de equação linear de ponto implícito (Gauss Seidel) junto com o método Multigrid Algébrico (AMG). O método AMG é usado para acelerar a convergência do solver, computando correções em uma série de níveis de malha grossa. O uso deste método reduz o número de iterações e o tempo da CPU para obter a convergência da solução, especialmente quando se tem um grande número de volumes de controle [Theory Guide Ansys, 2009].

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

4.4.2.2 Acoplamento pressão-velocidade

Para o fechamento do problema (número de equações = número de variáveis) é necessário uma equação para pressão que satisfaça a equação de continuidade. Os algoritmos disponíveis para o *Pressure-Based solver* e o algoritmo *segregado* são: *Simple*, *Simplec* e *Piso*. Os métodos *Simple* e *Simplec* são usados na condição de estado estável, enquanto o *Piso* é usado em estado transiente, que é o caso deste estudo. Detalhes dos métodos podem ser encontrados em Patankar, 1980.

4.4.2.3 Avaliação do gradiente

O gradiente é utilizado na discretização das equações e ele contribui na construção dos valores da variável nas faces do volume de controle. O gradiente de uma variável conhecida é empregado para discretizar os termos da convecção e difusão nas equações de conservação. Os métodos disponíveis são, *Green Gauss Cell Based*, *Green Gauss Node Based* e *Least Squares Cell Based*. No método *Green Gauss Cell Based* (o selecionado) o valor da variável é tomado de uma média aritmética dos valores dos volumes de controle mais próximos. Detalhes deste método podem ser encontrados em Theory Guide Ansys, 2009.

4.4.2.4 Esquemas de discretização

a) Pressão: Para dar solução à equação de quantidade de movimento, é necessário calcular o campo de pressões e a vazão mássica no volume de controle. Um sistema de colocação é utilizado, segundo o qual, a pressão e a velocidade são armazenadas no centro dos volumes. Os valores de pressão no volume de controle são determinados através de um esquema de interpolação. Neste estudo é empregado o esquema PRESTO (*Pressure Staggering Option*) que utiliza o balanço discreto da continuidade para um volume de controle inercial, para computar a pressão no volume de controle [Theory Guide Ansys, 2009].

b) Equação de Quantidade de movimento: Para a discretização da equação de quantidade de movimento, são associados valores discretos da variável no centro do volume de controle, mas para as faces dele, os esquemas de discretização Upwind de primeira ordem, Upwind de segunda ordem, Power Law e Quick estão disponíveis.

- Upwind de primeira ordem assume que o valor da variável no centro do volume de controle pode ser considerado como o valor médio de todo o volume.
- Power Law faz uma interpolação usando a solução exata da equação de convecção-difusão para uma dimensão. Logo de fazer a integração, a equação fica em função do número de Peclet.
- Em Upwind de segunda ordem a solução para as faces é obtida usando uma expansão de série de Taylor a partir da solução do centro do volume de controle.
- O esquema Quick é baseado na média ponderada de Upwind de segunda ordem e uma interpolação central da variável.

O esquema selecionado foi Upwind de primeira ordem.

c) Fração volumétrica: O esquema *Geo reconstruct*, que é utilizado neste trabalho, é o esquema mais preciso e é geralmente aplicável para malhas incluindo as não-estruturadas. Ele assume que a interface entre dois fluidos tem uma inclinação linear dentro de cada célula, o que é utilizado para calcular a advecção do fluido através das faces da célula.

Primeiramente, é calculada a interface linear relativa ao centro de cada célula parcialmente cheia, baseado na informação da fração do volume e as suas derivadas na célula. Logo, é calculada a quantidade de fluido advectiva, através de cada face, usando a representação da interface linear computada e a informação da distribuição da velocidade tangencial e normal na face. Por ultimo, é calculada a fração volumétrica em cada célula usando o balanço de fluxos calculado no passo anterior.

4.4.2.5 Formulação transiente

No presente trabalho, a modelagem computacional foi desenvolvida no estado transiente. Na discretização das equações em relação ao tempo, têm-se duas opções disponíveis, esquema de avanço de tempo iterativo e esquema de avanço de tempo não iterativo. No esquema iterativo todas as equações são resolvidas iterativamente para cada passo de tempo até conseguir a convergência. Com este método a não-linearidade das equações está totalmente contabilizada, eliminando o erro de divisão.

O passo de tempo (time step) empregado nas simulações é de 0,01 s. O tempo total para cada simulação é de 30 s, que é o tempo onde a propagação da onda torna-se estável e sem efeitos de reflexão.

4.5 Interpretação dos Resultados

Nesta seção apresenta-se o procedimento da interpretação dos resultados através das medições realizadas pelas superfícies de monitoramento (que são as sondas de medição ou superfícies distribuídas no domínio computacional para salvar os dados em cada iteração) e as equações para realizar os cálculos da potência hidropneumática, pressão e vazão mássica, além da verificação e validação do modelo computacional.

4.5.1 Superfícies de monitoramento e cálculos

O processo a seguir é verificar a geração da onda através das medições realizadas pelas superfícies de monitoramento estabelecidas no programa. Posteriormente é necessário validar o modelo considerando o escoamento do ar pela estrutura interna do dispositivo CAO.

Na Figura 4.3 são apresentadas as superfícies de monitoramento no domínio computacional. A posição das superfícies varia proporcionalmente à variação geométrica do dispositivo.

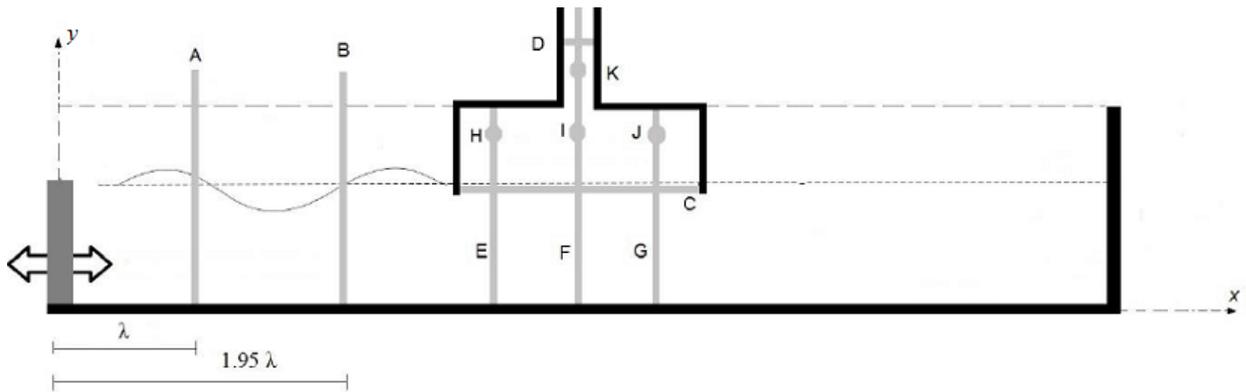


Figura 4.2 – Superfícies de monitoramento no domínio computacional [Gomes, 2014].

A função das linhas de monitoramento A , B , E , F , G é medir a elevação de água (superfície livre) através da seguinte integral,

$$\int \alpha dA = \sum_{i=1}^n \alpha_i |A_i| \quad (4.6)$$

onde α é a quantidade de água em cada volume, e A_i é a área de cada volume, mas, por se tratar de uma linha, representa o comprimento de cada volume de controle bidimensional.

A média aritmética da elevação da superfície livre medida nas linhas de monitoramento E , F e G , indica a elevação de água dentro da câmara CAO.

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

$$\int \bar{v} \cdot d\bar{A} = \sum_{i=1}^n \bar{v}_i \cdot \bar{A}_i \quad (4.7)$$

onde \bar{v} a velocidade na direção y e A a área da superfície que é atravessada pelo fluxo de ar.

Na linha de monitoramento D , localizada no centro da chaminé da câmara CAO, é medida a vazão mássica,

$$\int \rho_{ar} \vec{v} \cdot d\vec{A} = \sum_{i=1}^n \rho_{ar_i} \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \quad (4.8)$$

onde ρ_{ar} é a massa específica do ar.

Na linha D também é medida a pressão estática P_e ,

$$\frac{1}{A} \int P_e dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n P_{e_i} |A_i| \quad (4.9)$$

onde n é o número de volumes.

A pressão total P é calculada a seguir,

$$P = P_e + P_d \quad (4.10)$$

onde P_d é a pressão dinâmica, dada por,

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (4.11)$$

Por último, nos pontos de monitoramento H , I , J e K é medida a pressão total.

A potência hidropneumática é calculada por Dizadji and Sajadian, 2011:

$$P_{hid} = \left(P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (4.12)$$

onde P_{ar} é a pressão estática na chaminé (Pa), ρ_{ar} é a massa específica do ar (kg/m^3), \dot{m} é a vazão mássica de ar que passa através da chaminé (kg/s), v_{ar} é a velocidade do ar na chaminé (m/s) definida por:

$$v_{ar} = \frac{\dot{m}}{A \rho_{ar}} \quad (4.13)$$

onde A é a área de secção transversal da chaminé.

A potência hidropneumática, a pressão e a vazão mássica são apresentadas como valores médios, calculados pela equação da média para problemas transientes chamada de *Root Mean Square* (RMS) proposta por Marjani et al., 2006:

$$P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2 dt} \quad (4.14)$$

4.5.2 Verificação da geração da onda e validação do modelo computacional

Para verificar a geração das ondas no domínio computacional, é realizada uma comparação da solução numérica com a solução analítica dada pela Equação 3.16 da Teoria Linear de ondas, para a elevação da superfície livre numa posição determinada. A Figura 4.4 apresenta a comparação das soluções analítica e numérica na posição $x = 48$ m, localizada ao lado esquerdo do dispositivo CAO no domínio computacional. A verificação da solução numérica é realizada no intervalo entre 15 e 30 s, onde a onda numérica é estável e ainda não há reflexão da mesma. A diferença relativa entre as soluções numérica e analítica é medida instantaneamente. A média das diferenças é 1,47%, onde o valor mínimo é 0,00104% e o valor máximo 3,76%. Estes resultados indicam a precisão do modelo computacional com relação ao modelo matemático.

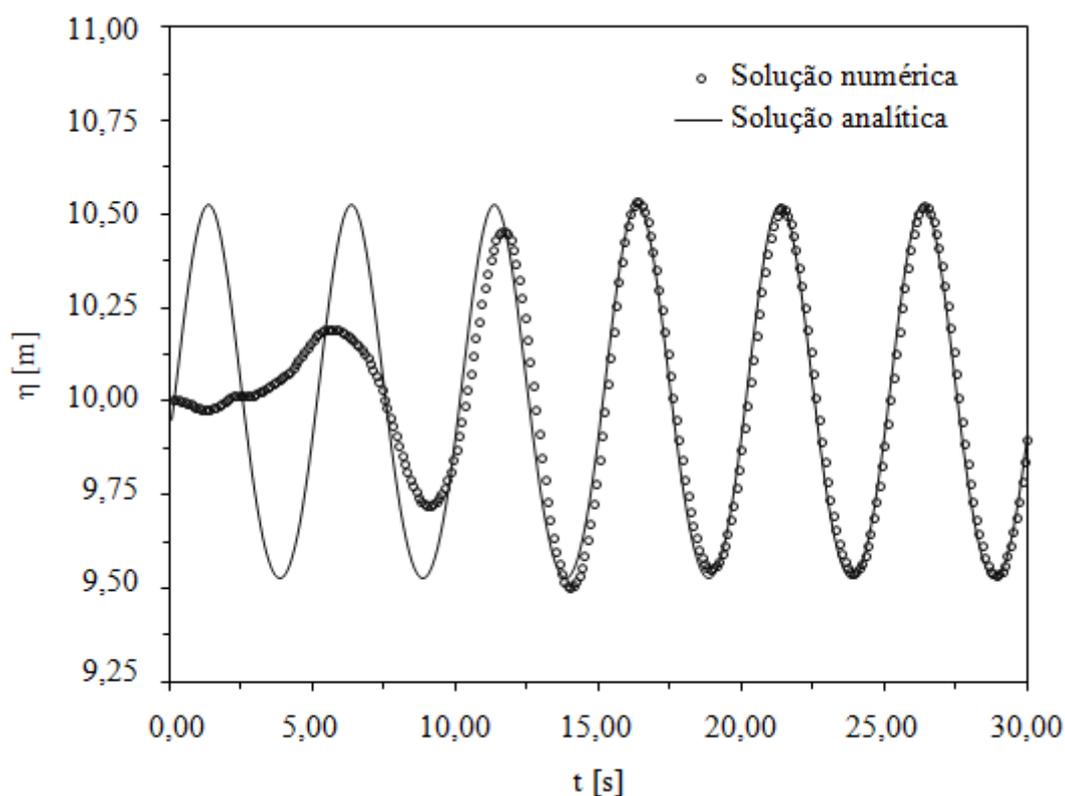


Figura 4.3 – Verificação do modelo computacional em $x = 48$ m.

O processo de validação do modelo computacional consiste numa comparação dos resultados numéricos com resultados de experimentos, considerando a interação entre a água, o ar e a estrutura do dispositivo CAO. Em Gomes, 2014, apresenta-se um estudo onde a solução numérica para a interação entre água e ar, a variação da pressão e da velocidade no interior da câmara CAO são comparadas com resultados experimentais, para uma geometria definida do dispositivo CAO que é submetida a ondas com diferentes períodos que variam entre 3,5 e 8,0 s. Os resultados da comparação indicam que as soluções numéricas para a amplitude relativa (relação entre a amplitude do movimento da superfície livre no interior do dispositivo CAO e a amplitude da onda incidente), a pressão máxima no interior da câmara CAO e a velocidade na chaminé de saída do dispositivo CAO têm o mesmo comportamento qualitativo comparado com os resultados experimentais.

Detalhes do procedimento da validação da modelagem computacional de conversores de energia das ondas podem ser vistos também em Horko, 2007; Liu et al., 2008a; Liu et al., 2008b; Gomes et al., 2009; Gomes, 2010; Ramalhais, 2011; Liu et al., 2011 e Gomes et al., 2012b.

4.5.3 Procedimento para aprimorar os graus de liberdade

O método utilizado consiste na busca exaustiva para os três graus de liberdade nos intervalos seguintes: $0,0226 < H_1/L < 1,0225$; $2,3 < H_2/l < 6,0$; $9,0 \text{ m} < H_3 < 10,25 \text{ m}$. Os diagramas nas Figuras 4.4 – 4.6 exemplificam o procedimento. Os valores testados para cada grau de liberdade podem ser vistos no Apêndice A.



Figura 4.4 – Variação de H_2/l .

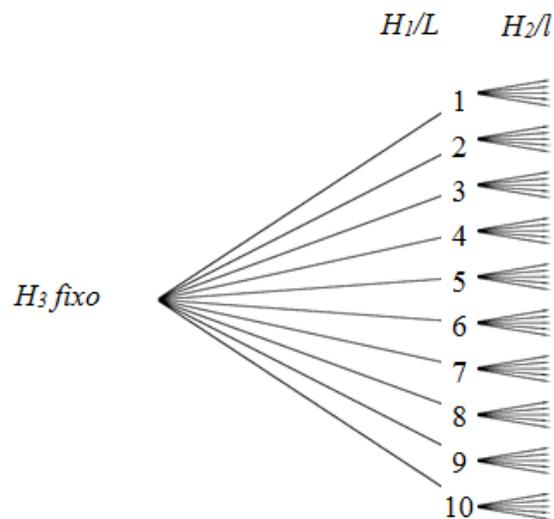


Figura 4.5 – Variação de H_1/L e H_2/l .

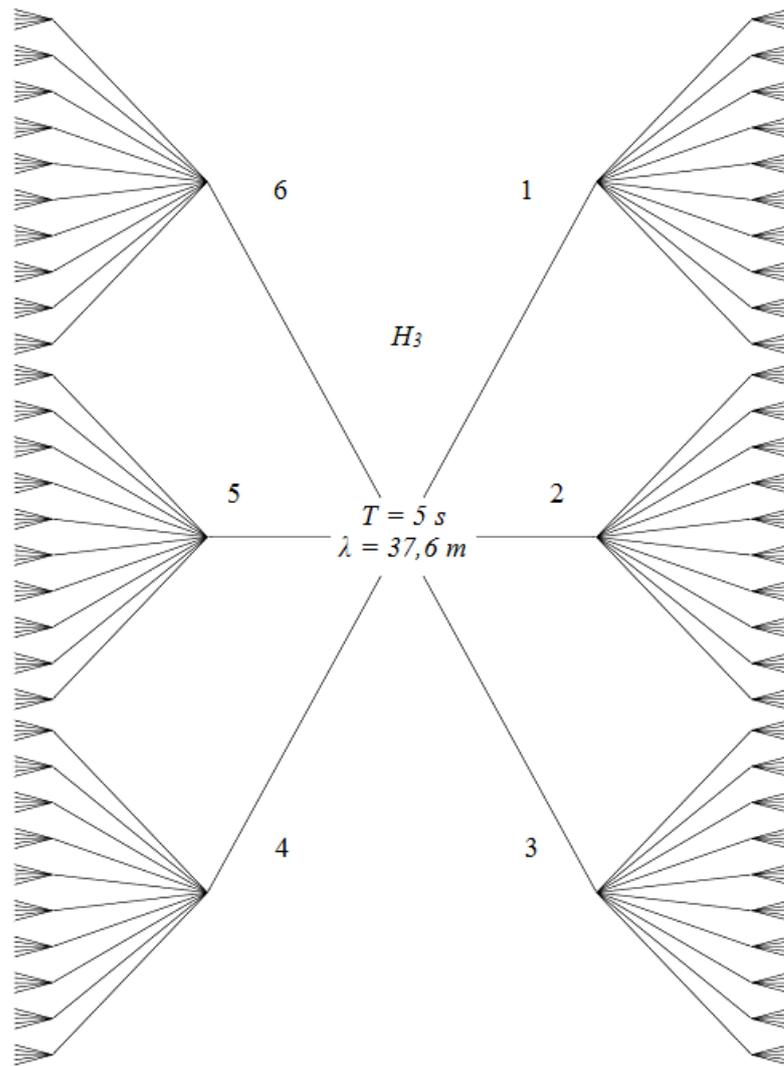


Figura 4.6 – Variação de H_1/L , H_2/l e H_3 .

Para cada combinação de H_1/L , H_2/l e H_3 é calculada a potência hidropneumática, a vazão mássica e a pressão. A solução considerada ótima é a que apresenta maior potência hidropneumática.

5 RESULTADOS

5.1 Resultados da variação de H_2/l

O primeiro grau de liberdade analisado foi H_2/l , o que corresponde às dimensões da chaminé do dispositivo CAO, para valores fixos de H_1/L e H_3 . Na Figura 5.1 são apresentados os resultados para a potência hidropneumática, a pressão e a vazão mássica. Na variação de H_2/l , observa-se um aumento da potência e da pressão na chaminé quando aumenta o valor de H_2/l .

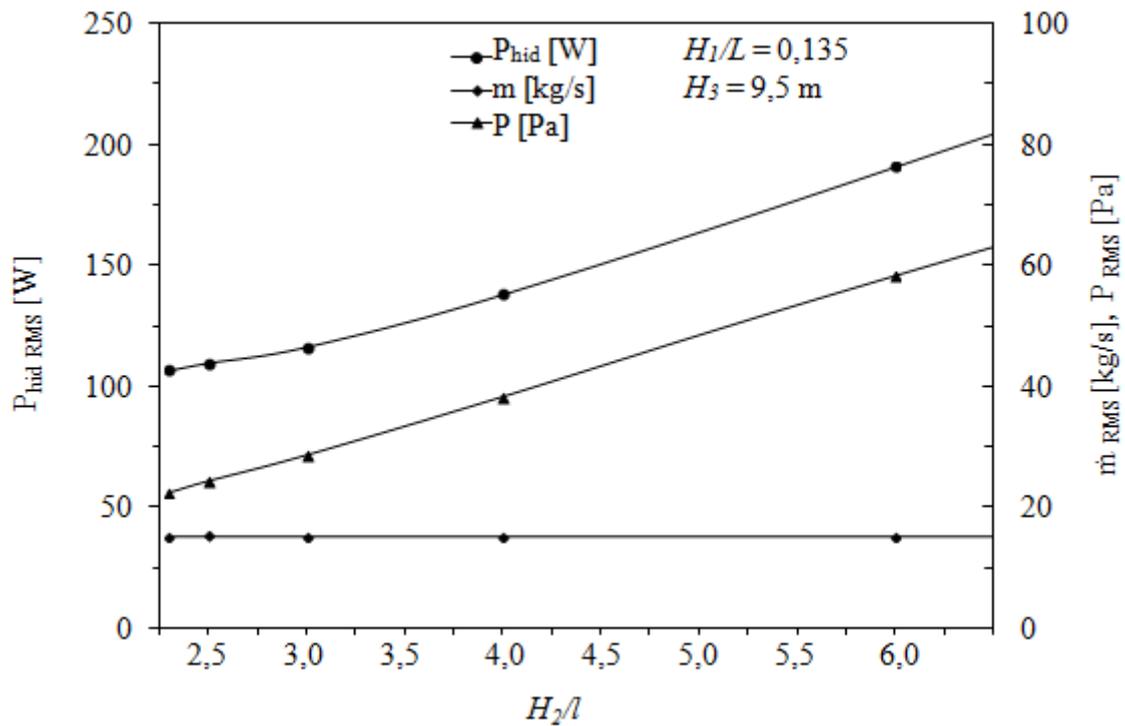


Figura 5.1 – Resultados da Potência hidropneumática, pressão e vazão mássica para H_2/l .

Na Figura 5.2 é apresentado o comportamento transiente da pressão do ar para as geometrias da chaminé que tiveram melhor e pior desempenho (em termos da potência hidropneumática), para valores fixos de $H_1/L = 0,135$ e $H_3 = 9,5$ m. A média RMS da pressão nestes dois casos foi calculada no período estável entre 15 s e 30 s. O melhor caso foi para $H_2/l = 6,0$ ($H_2 = 9,8328$ m e $l = 1,6388$ m) com $P = 58,3$ Pa e $P_{hid} = 190,8$ W; o pior caso foi para $H_2/l = 2,3$ ($H_2 = 6,0879$ m e $l = 2,6469$ m) com $P = 22,4$ Pa e $P_{hid} = 106,7$ W. O resultado

representa um aumento de 39% na pressão do ar na saída da chaminé e um aumento de 78,7% na potência hidropneumática.

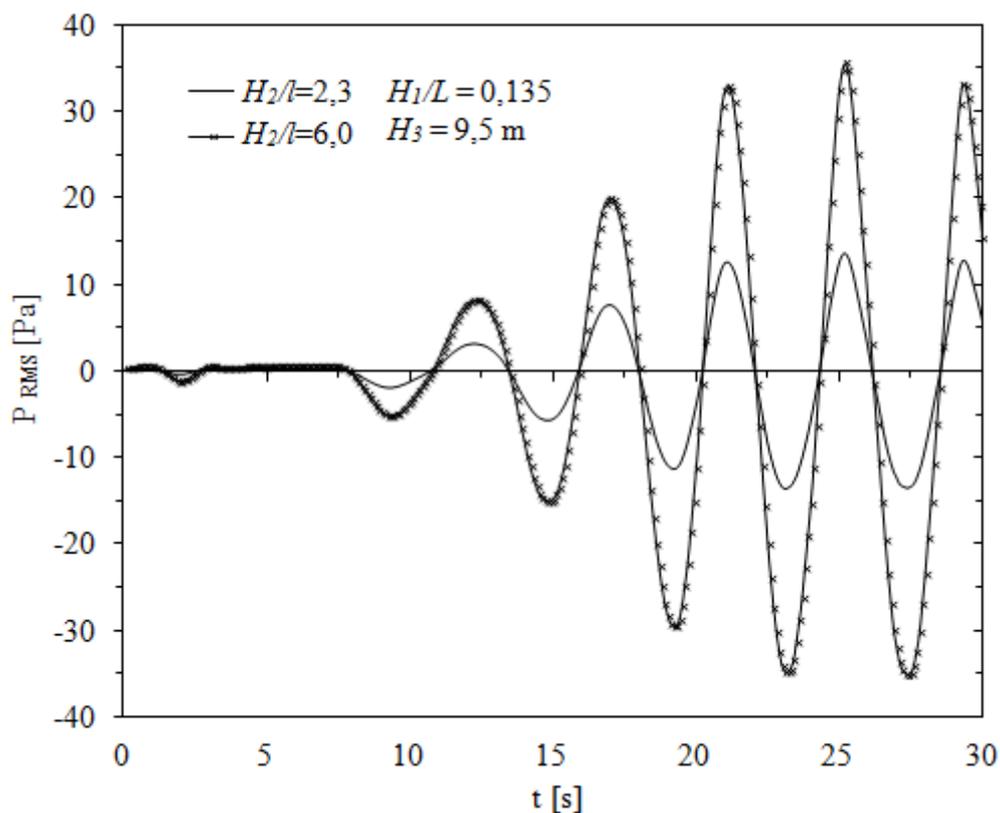


Figura 5.2 – Variação da pressão em relação ao tempo para H_2/l de 2,3 e 6,0.

Além disso, a redução de l (aumento de H_2/l) melhora o fluxo de ar através da chaminé, como pode ser visto na Fig. 5.3, onde são apresentados os vetores da velocidade no sexto período de propagação das ondas, para as geometrias da chaminé com o melhor ($H_2/l = 6,0$) e o pior ($H_2/l = 2,3$) desempenho. A variação de H_2/l aumenta a velocidade do ar, reduz sua recirculação e, portanto, o escoamento do ar se torna mais regular.

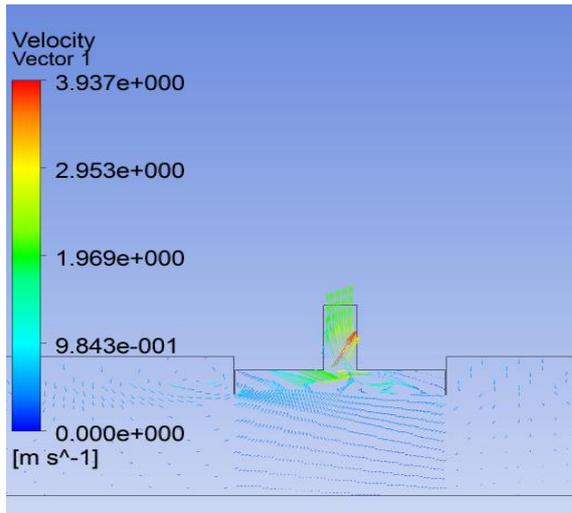
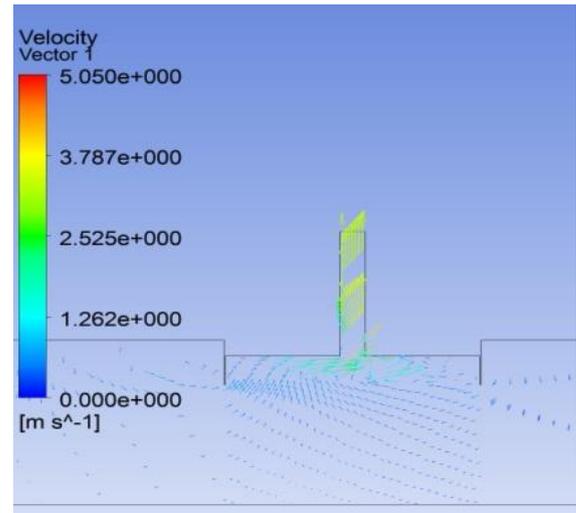
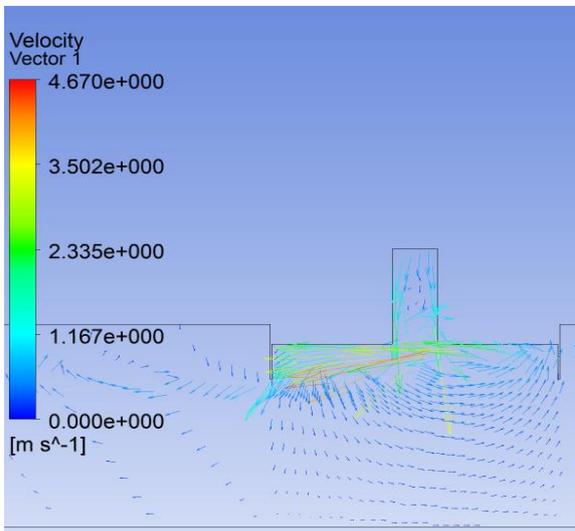
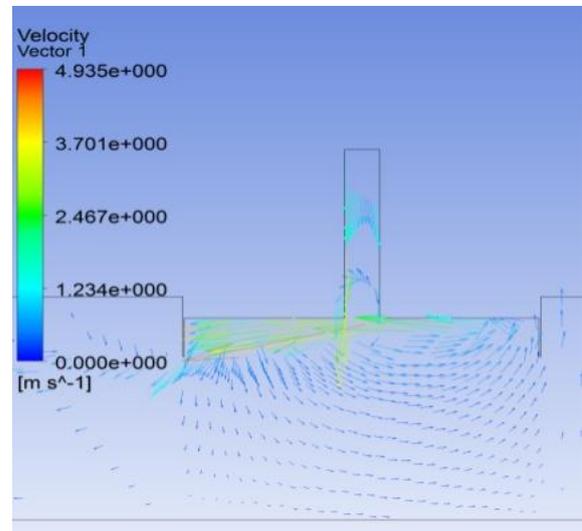
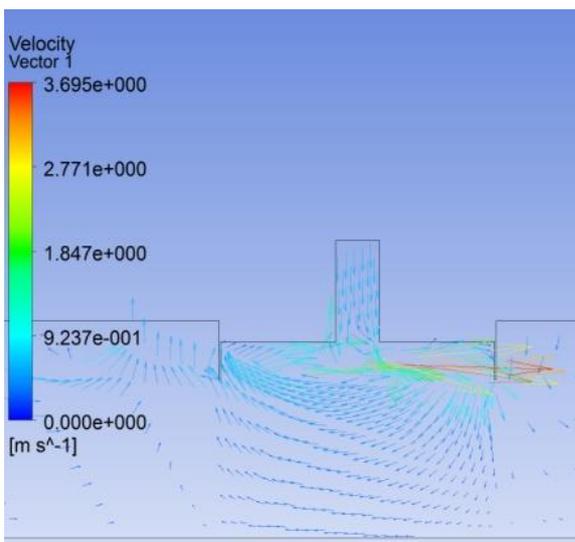
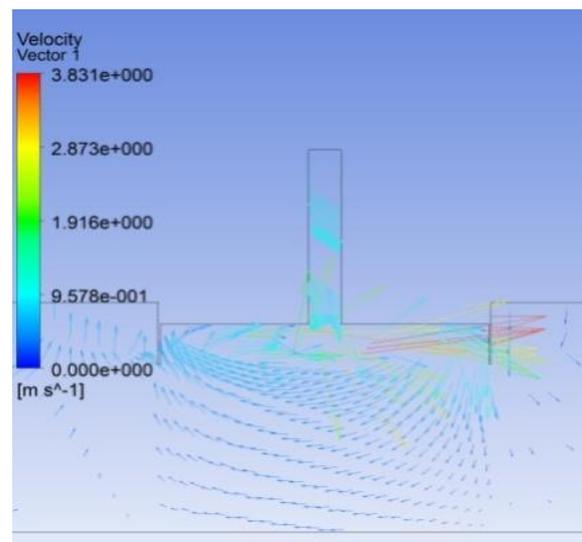
a) $H_2/l = 2.3$; $T = 26$ sb) $H_2/l = 6.0$; $T = 26$ sc) $H_2/l = 2.3$; $T = 28$ sd) $H_2/l = 6.0$; $T = 28$ se) $H_2/l = 2.3$; $T = 30$ sf) $H_2/l = 6.0$; $T = 30$ s

Figura 5.3 – Vetores da velocidade no sexto período (a),(c),(e) $H_2/l = 2,3$; (b),(d),(f) $H_2/l = 6,0$.

O aumento de H_2/l , que é causado pela redução do comprimento l da chaminé, provoca o aumento da pressão do ar e, em consequência, o aumento da potência hidropneumática através da chaminé, mas este fato vai continuar até que a dimensão de l permita o escoamento de ar pela chaminé. Como foi mostrado em Espinel et al., 2014a na Figura 5.4, a redução de l fez com que a pressão aumentasse, consequentemente a potência hidropneumática também aumentou até que o l era tão curto que o fluxo de ar foi obstruído, o que por sua vez causou, inclusive, um bloqueio na elevação da coluna de água dentro do dispositivo CAO. Este fenômeno ocorreu para um valor de H_2/l perto de 300, isto é, quando a altura H_2 e o comprimento l da chaminé foram de 69,5 m e 0,2 m, respectivamente. Mas estas dimensões não são viáveis para a geometria da chaminé de um dispositivo CAO, por isso, foi sugerido que o valor ótimo de H_2/l é de 6,0, onde $H_2 = 9,8328$ m e $l = 1,6388$ m.

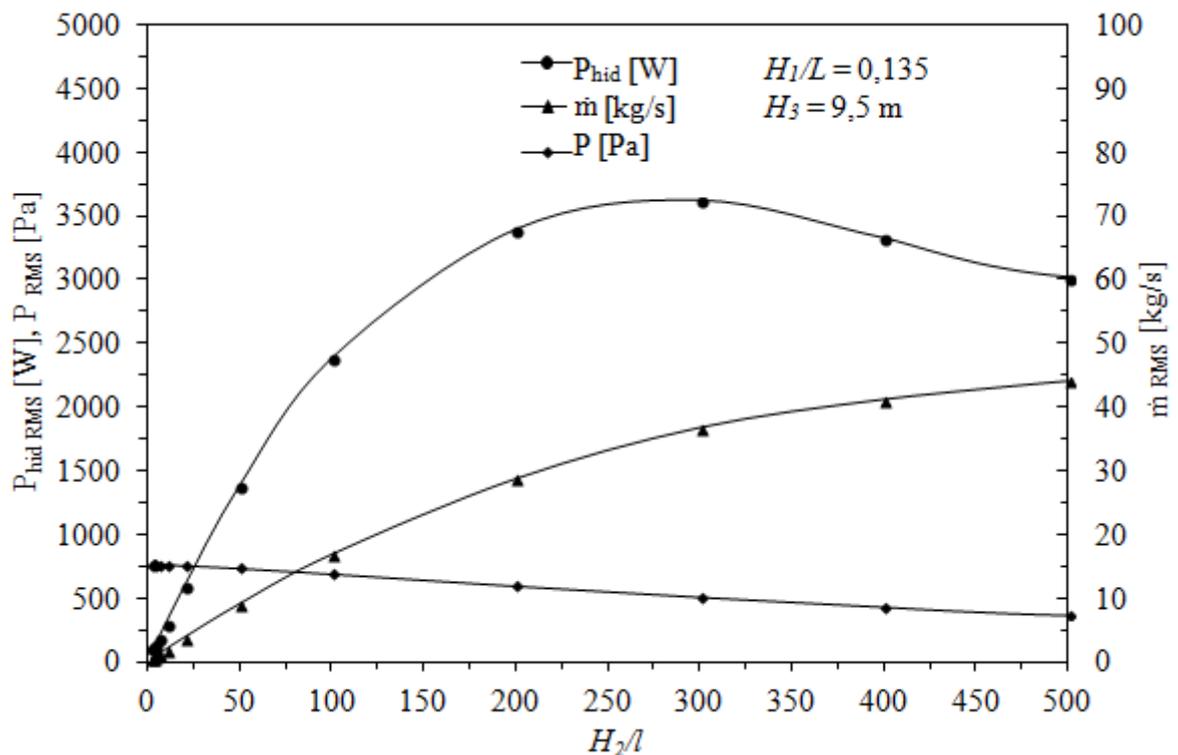


Figura 5.4 – Variação de P_{hid} , P e \dot{m} para valores elevados de H_2/l [Espinel, 2014].

5.2 Resultados da variação de H_1/L

O segundo grau de liberdade aprimorado é H_1/L , o que corresponde às dimensões da câmara do dispositivo CAO. Na Figura 5.5 são apresentados os resultados para a potência

hidropneumática para cada valor de H_1/L e um valor fixo de H_3 (9,5 m). Cada curva representa um valor diferente de H_2/l . É importante destacar, que existe um valor de H_1/L que maximiza a potência hidropneumática, independente da variação de H_2/l . Este valor é 0,135, o que significa 16,71 m para o comprimento L e 2,25 m para a altura H_1 da câmara CAO (o mesmo valor foi obtido anteriormente em Gomes et al., 2013).

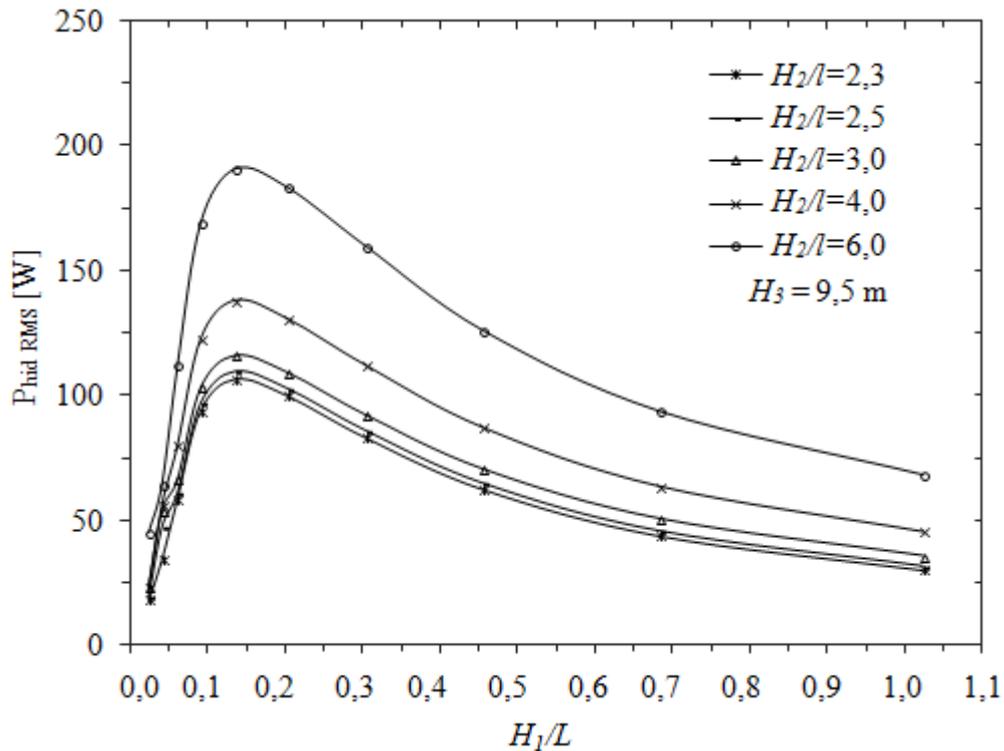


Figura 5.5 – RMS da potência hidropneumática relacionada com a variação de H_1/L .

A variação de H_1/L também aumenta o fluxo de ar através da câmara. A Figura 5.6 apresenta o comportamento transiente da vazão mássica de ar através do tempo no período estável da geração da onda entre os 15 s e os 30 s, para o melhor e o pior caso simulado com valores fixos dos outros graus de liberdade ($H_2/l = 6,0$ e $H_3 = 9,5$ m). O melhor caso foi para $H_1/L = 0,135$ ($H_1 = 2,25$ m e $L = 16,71$ m) com $\dot{m} = 15,2$ kg/s e $P_{hid} = 190,8$ W; o pior caso foi para $H_1/L = 0,0226$ ($H_1 = 1,0$ m e $L = 37,5969$ m) com $\dot{m} = 6,4$ kg/s e $P_{hid} = 45,06$ W. Isso representa um aumento de 42% da vazão mássica de ar e 323% da potência hidropneumática.

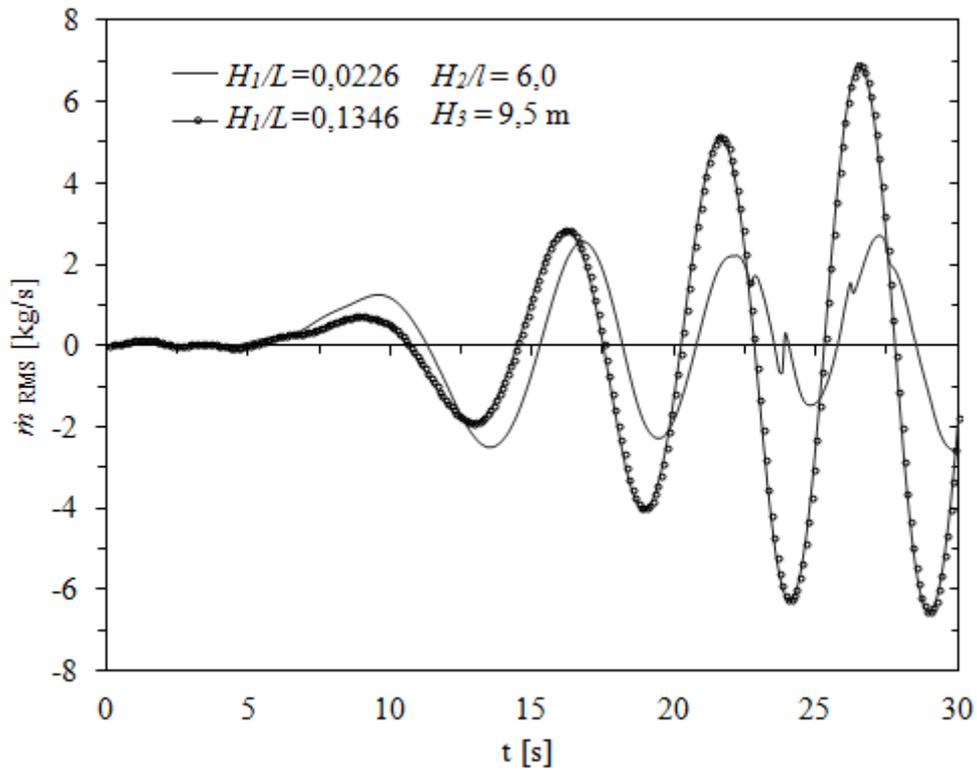


Figura 5.6 – Comportamento da vazão mássica de ar para H_1/L de 0,0226 e 0,1346.

Na variação de dois graus de liberdade, procurou-se relacionar o valor ótimo de H_1/L para cada valor de H_2/l . A Figura 5.7 apresenta a máxima potência obtida ($P_{hid,o}$) para cada valor de H_2/l . O valor H_3 foi mantido fixo (9,5 m). Além disso, na Figura 5.7 tem-se uma curva que representa o valor ótimo de H_1/L o qual maximiza a potência hidropneumática para cada valor de H_2/l . Particularmente, é o mesmo valor em todos os casos $(H_1/L)_o = 0,135$ o que evidencia que a otimização de H_2/l não afeta a vazão mássica de ar, mas, aumenta a pressão.

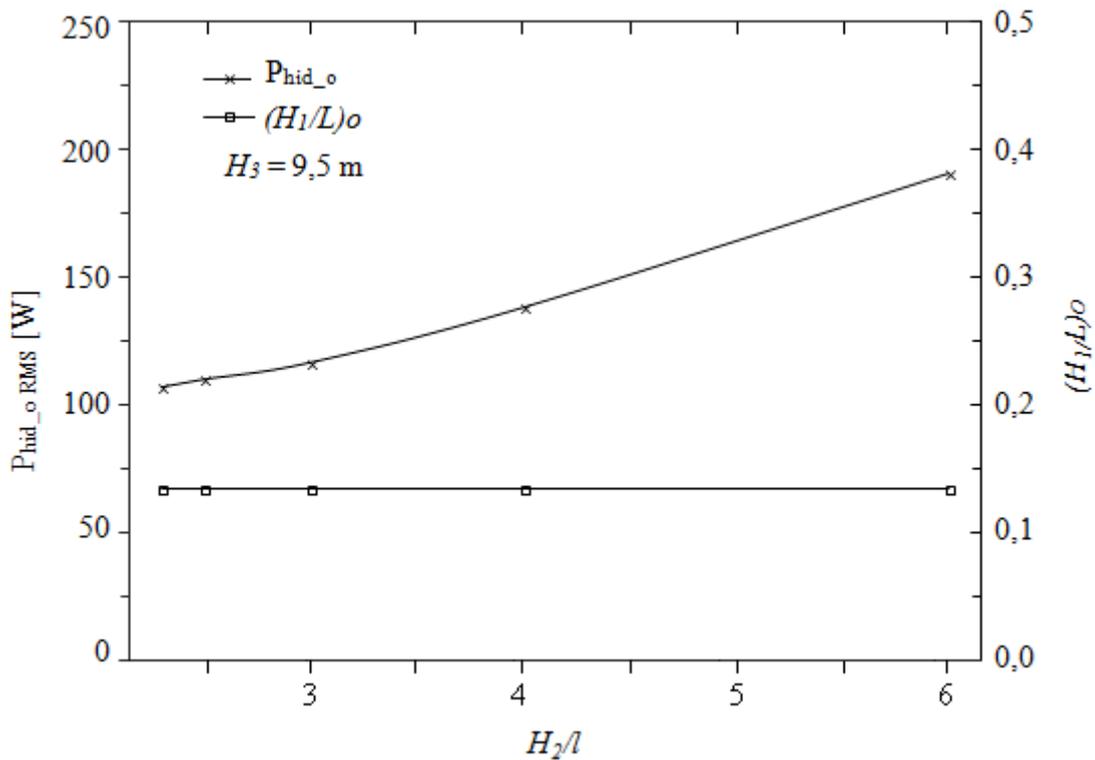


Figura 5.7 – RMS da máxima potência e H_1/L ótimo para H_2/l .

Como resultado da otimização de H_1/L e H_2/l , para um valor fixo de $H_3 = 9,5$ m, se obteve uma potência de 190 W com valores dos graus de liberdade $(H_1/L)_{oo}$ e $(H_2/l)_o$ de 0,135 e 6,0 respectivamente. Portanto, os valores ótimos da geometria, para $H_3 = 9,5$ m, são $H_1 = 2,25$ m, $L = 16,71$ m, $H_2 = 9,8328$ m, $l = 1,6388$ m.

5.3 Resultados da variação de H_3

O terceiro grau de liberdade não está relacionado com a geometria do dispositivo e sim com a profundidade de submersão. A variação de H_3 (profundidade de submersão) é apresentada nas Figuras 5.8 e 5.9. A máxima potência hidropneumática $(P_{hid})_{oo}$ obtida para cada valor de H_3 analisado é apresentada na Figura 5.8, e os valores associados de H_1/L e H_2/l , os quais permitem obter aquela potência podem ser observados na Figura 5.9.

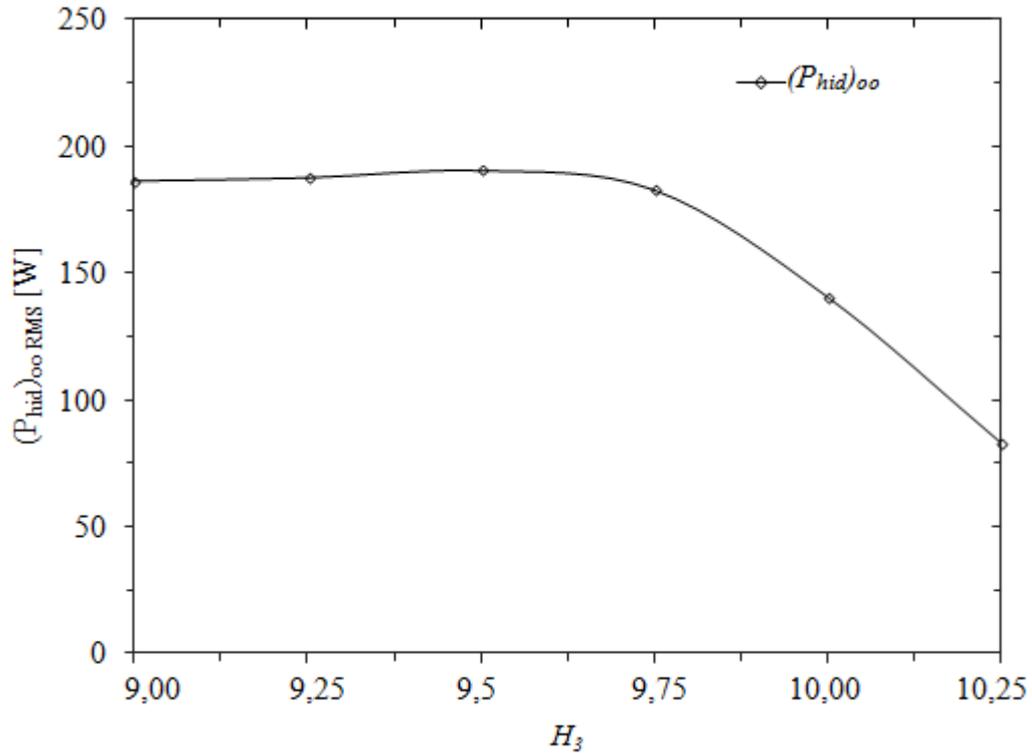


Figura 5.8 – Potência máxima para H_3 .

É possível ver que os maiores valores da potência hidropneumática são obtidos quando o dispositivo está mais submerso ($H_3 < 10$ m). Especificamente o melhor desempenho do dispositivo CAO é com valores de H_3 entre $9,0 \text{ m} < H_3 < 9,75 \text{ m}$ o que significa $(h - H) < H_3 < (h - H/4)$ em termos da profundidade da onda h e a altura da onda H . Isto quer dizer que o dispositivo vai trabalhar com alta eficiência para várias condições. Este fato é muito importante, pois a altura da superfície livre da água não é constante.

Ao mesmo tempo, na Figura 5.9 são mostrados os valores correspondentes para H_2/l e H_1/L que permitem obter o maior valor da potência para cada valor de H_3 analisado. Note-se que o valor ótimo de H_2/l é igual para todos os casos de H_3 . Ou seja, as dimensões da chaminé não dependem da profundidade de submersão. Por outro lado, há mais de um valor ótimo para H_1/L , mas o valor ótimo de H_1/L nos casos que obtiveram maior potência hidropneumática é 0,135.

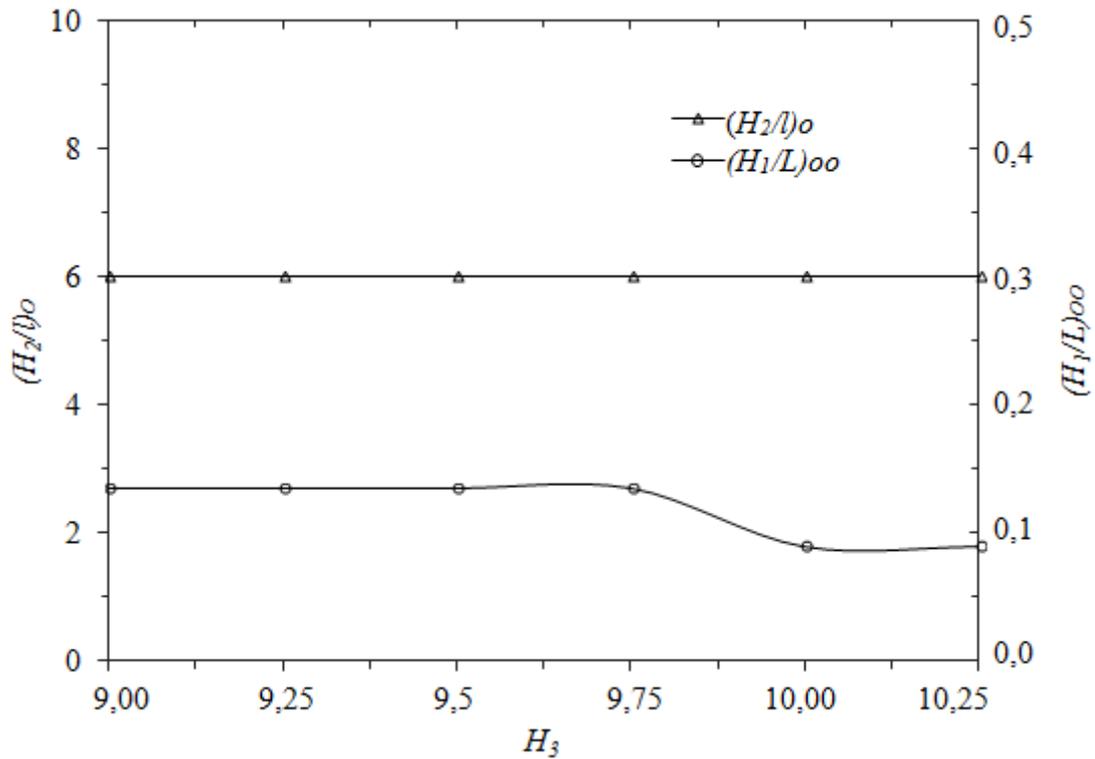


Figura 5.9 – Valores ótimos de H_1/L e H_2/l para H_3 .

Como resultado do processo de otimização dos três graus de liberdade, é obtido um valor máximo da potência hidropneumática $(P_{hid})_{ooo}$ igual a 190 W. Os valores ótimos das razões os quais podem ser enxergados nas Figuras 5.8 e 5.9, são $(H_1/L)_{ooo} = 0,135$; $(H_2/l)_{oo} = 6,0$ e $(H_3)_o = 9,5$ m.

É importante lembrar que o valor da área do dispositivo está relacionado com as características da onda incidente. Por isto, procura-se relacionar os resultados ótimos com estas características na escala real, para dar uma orientação teórica sobre a construção de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, do tipo Coluna d'Água Oscilante. Assim, apresenta-se uma relação entre os valores ótimos das dimensões da geometria do dispositivo CAO obtidos no presente estudo e o comprimento e a altura da onda. Têm-se os valores ótimos dos graus de liberdade $(H_1/L)_{ooo} = 0,135$; $(H_2/l)_{oo} = 6,0$ e $(H_3)_o = 9,5$ m. Então as dimensões ótimas da geometria são: $H_1 = 2,25$ m, $L = 16,71$ m, $H_2 = 9,8328$ m, $l = 1,6388$ m, o que significa $(H_1/L)_o = 4 \lambda / H$, $(H_2/l)_o = 200 \lambda / H$ e $(h - H) < H_3 < (h - H/4)$.

As tabelas dos resultados numéricos das simulações realizadas apresentam-se no Apêndice A.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho é apresentado um estudo numérico bidimensional que emprega o método Constructal Design para aprimorar o desempenho de um dispositivo do tipo Coluna d'água oscilante (CAO), maximizando a potência hidropneumática. Para fazer isto foram analisadas as dimensões do dispositivo e sua profundidade de submersão para um comprimento de onda e período definidos.

A modelagem computacional é desenvolvida com o código de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) Ansys Fluent versão 13.

Na avaliação da geometria e da profundidade de submersão, três graus de liberdade são variados: H_1/L (razão entre a altura e comprimento da câmara do dispositivo CAO), H_2/l (razão entre a altura da câmara e o comprimento da chaminé), e H_3 (profundidade de submersão do dispositivo CAO), para valores fixos da área da câmara A_1 e da área total do dispositivo A_2 .

A razão ótima de H_1/L que maximiza a potência hidropneumática é 0,135, o que significa $H_1 = 2,25$ m, $L = 16,71$ m e uma relação ótima de H_1/L e a razão entre o comprimento da onda incidente e a altura da onda de $(H_1/L)_o = 4 \lambda / H$.

A razão de H_2/l que permite obter os melhores resultados da potência hidropneumática é 6,0. Este valor representa $H_2 = 9,8328$ m, $l = 1,6388$ m e uma relação ótima de H_2/l e a razão entre o comprimento de onda incidente e a altura da onda de $(H_2/l)_o = 200 \lambda / H$.

Finalmente, o melhor desempenho do dispositivo com a variação de H_3 é obtido no intervalo de $9,0 \text{ m} < H_3 < 9,75 \text{ m}$, o que significa $(h - H) < H_3 < (h - H/4)$.

Os resultados mostram, também, que há uma potência hidropneumática máxima de 190 W quando as razões de H_1/L , H_2/l e H_3 são iguais a 0,135, 6,0 e 9,5 m respectivamente. Por outro lado, o menor valor da uma potência hidropneumática obtida é aproximadamente 11 W, mostrando que aprimorar a geometria também é um aspecto importante a ser considerado na utilização de dispositivos conversores de energia a partir de fontes de energia renováveis .

Deve notar-se que uma redistribuição da geometria empregando *Constructal Design* pode proporcionar um melhor desempenho do dispositivo. Além disso, as dimensões do dispositivo são relacionadas com o clima de ondas, para que o presente modelo computacional e o método *Constructal* possam ser empregados para fornecer informação teórica na construção do protótipo CAO e assim aproveitar o potencial da energia das ondas, em qualquer local com um clima de ondas apropriado.

6.1 Propostas de trabalhos futuros

Como sugestão, propõem-se os seguintes tópicos para continuar com este estudo,

1. Dado que o clima de ondas num lugar determinado é caracterizado por ondas com diferentes características, é necessário realizar esta modelagem computacional para ondas com diferentes comprimentos e períodos de onda.

2. Continuar com o desenvolvimento de estudos e a modelagem computacional para aperfeiçoar o desempenho do dispositivo CAO. Por exemplo, explorar diferentes valores da razão A_1/A_2 , pois neste estudo foi empregado um valor fixo igual a 0,7.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS Inc., 2013. Softwares FLUENT e ICEM.

Aquaret, Disponível em:

http://www.aquaret.com/index.php?option=com_content&view=article&id=137&Itemid=280&lang=pt

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.

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

Bejan, A., Badescu, V., De Vos, A., 2000, “Constructal Theory of Economics Structure Generation in Space and Time”. **Energy Conversion and Management** Vol. 41, pp. 1429-51.

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

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

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.

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

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

Bouali, B., Larbi, S., 2013, "Contribution to geometry optimization of an oscillating water column wave energy converter". **Energy Procedi.**, Vol. 36, pp. 565-573.

Brown, A., Müller, S., Dobrotková, Z., **Renewable Energy, Markets and Prospects by Technology**. International Energy Agency IEA, 2011.

Carvalho, J. T., 2010, "**Simulação da Distribuição de Energia das Ondas Oceânicas ao largo do Litoral Brasileiro**". Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil.

Conde, J. M. P., Gato, L. M. C., 2008, "Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter". **Renewable Energy**, Vol. 33, pp. 2637-2644.

Dizadji N., Sajadian S. E., 2011 "Modeling and optimization of the chamber of OWC system". **Energy**, Vol. 36, pp. 2360– 2366.

Dos Santos, E. D., Machado, B. N., Lopes, N., Souza, J. A., Teixeira P. R. de F., Gomes, M. N., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2013, "**Constructal Design of Wave Energy Converters**". In *Constructal Law and the Unifying the Principle of Design* –Rocha, L. A. O., Lorent, S., Bejan, A. (Editors), Springer, New York, USA.

European Marine Energy Centre LTD (EMEC ORKNEY), Disponível em: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>

European Renewable Energy Council (EREC). Disponível em: <http://www.erec.org/renewable-energy/ocean-energy.html>

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

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

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

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

Gomes, M. das N., 2010, **“Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna d'Água Oscilante de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica”**. Dissertação de Mestrado em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil.

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

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

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

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

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

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

Holthuijsen, H. L. **Waves in Oceanic and Coastal Waters**. Cambridge University Press, 2007. pp. 6-9, 25-27.

Horko, M., 2007, “**CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy Converter**” MSc. thesis, Mechanical Engineering School, Western University, Australia.

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, <http://www.coppenario20.coppe.ufrj.br/?p=805>

International Energy Agency IEA. Disponível em: <http://www.iea.org/topics/renewables/>

Isoldi, L.A., Real, M.V., Correia, A.L.G., Vaz, J., Dos Santos, E.D., Rocha, L.A.O., 2013 “**Flow of Stresses: Constructal Design of Perforated Plates Subjected to Tension or**

Buckling” In Constructal Law and the Unifying the Principle of Design - Rocha, L. A. O., Lorent, S., Bejan, A. (Editors), Springer, New York, USA.

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, No.1, 35-41.

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

Lopes, N., Sant'anna, F. S. P., Gomes, M. N., Souza, J. A., Teixeira, P. R. de F., Dos Santos, E. D., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2012, “**Constructal Design Optimization of the Geometry of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter (OWC-WEC)**”. In Proceedings Constructal law conference, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil.

Lorente, S. 2013, “**The Constructal Theory of Electrokinetic Transport Through a Porous System**”. In Constructal Law and the Unifying the Principle of Design - Rocha, L. A. O., Lorent, S., Bejan, A. (Editors), Springer, New York, USA.

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, Brazil.

Marjani, A. E., Castro, F., Bahaji, M., Filali, B., 2006, “**3D unsteady flow simulation in an OWC wave converter plant**”. In Proceedings of the International Conference on Renewable Energy and Power Quality, Majorca, Spain.

Marjani, A. E., Castro, F., Bahaji, M., Filali, B., 2008, “**Numerical modelling in wave energy conversion systems**”, Energy, Vol. 33, pp. 1246-1256.

McCormick, M. E., 1981. **Ocean Energy Conversion**. John Wiley & Sons, Nova York, pp. 179.

Ocean Energy System. Disponível em: <http://www.ocean-energy-systems.org/what-is-ocean-energy/waves/>

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 an oscillating water column wave energy device**”, In Proceedings of the 11th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, Brasov, Romania.

Patankar, Suhas, V., 1980, **Numerical heat transfer and fluid flow**, McGraw-Hill, Estados Unidos.

Pelamis Wave Power. Disponível em: <http://www.pelamiswave.com/global-resource>

Planeta Coppe, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal de Rio de Janeiro.
<http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=833>;
<http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=1736>.

Ramalhais, R. dos S., 2011 “**Estudo Numérico de um Dispositivo de Conversão da Energia das Ondas do Tipo Coluna de Água Oscilante (CAO)**”. Msc. thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisbon, Portugal.

Rocha, L.A.O., Lorenzini, E., Biserni, C., Cho, Y., 2010 “**Constructal Design of a Cavity Cooled by Convection**” International Journal of Design and Nature and Ecodynamics. Vol. 5, pp. 212-220.

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

Santos, E. D., Machado, B. N., Zanella, M. M., Gomes, M. das 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, Vol. 348, pp. 232-244.

Souza, J. A., Ordonez, J.C., 2013 "**Constructal Design of High-Conductivity Inserts**". In Constructal Law and the Unifying the Principle of Design - Rocha, L. A. O., Lorent, S., Bejan, A. (Editors), Springer, New York, USA.

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

Theory Guide Ansys Fluent 12. Ansys, Inc. Abril, 2009.

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

Wang, H., Dai, W., Bejan, A., 2007, “Optimal Temperature Distribution in a 3D Triple Layered Skin Structure Embedded with Artery and Vein Vasculature and Induced by Electromagnetic Radiation”. **International Journal of Heat Mass Transfer**, Vol. 50, pp. 1843-54.

Weber, J. W., Thomas, G. P., 2001, “**An investigation into the importance of the air chamber design of an oscillating water column wave energy device**”, ISOPE 2001, Staranger, Norway.

Zhang, Y., Zou, Q.P., Greaves, D., 2012, “Air-water two-phase flow modelling of hydrodynamic performance of an oscillating water column device”. **Renewable Energy**, Vol. 41, pp. 159-170.

APÊNDICE A – Resultados das simulações

Os resultados das simulações apresentam-se nas Tabelas A.1 – A.5. Para cada valor dos graus de liberdade H_1/L , H_2/l e H_3 foram calculadas a vazão mássica, a pressão e a potência hidropneumática.

Tabela A.1 – Resultados da vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para $H_2/l = 2,3$.

$H_3=9,00; H_2/l=2,3$				$H_3=9,25; H_2/l=2,3$			
H_1/L	m [Kg/s]	P [Pa]	P_{hyd} [W]	H_1/L	m [Kg/s]	P [Pa]	P_{hyd} [W]
0,0226	6,07	8,32	13,13	0,0226	6,96	18,21	28,06
0,0399	8,07	17,93	37,08	0,0399	9,24	18,66	41,01
0,0598	12,07	23,65	57,86	0,0598	12,63	33,77	107,46
0,0897	14,51	22,45	89,67	0,0897	14,65	21,50	91,47
0,1346	15,16	22,08	104,44	0,1346	15,25	22,27	104,96
0,2019	14,71	21,96	99,81	0,2019	14,71	22,20	99,51
0,3029	13,61	20,76	85,48	0,3029	13,52	20,76	84,47
0,4544	12,14	18,50	66,12	0,4544	11,95	18,25	63,74
0,6817	10,58	16,30	47,78	0,6817	10,40	16,01	45,80
1,0225	9,05	14,04	33,45	1,0225	8,86	13,70	31,66

$H_3=9,50; H_2/l=2,3$				$H_3=9,75; H_2/l=2,3$			
H_1/L	m [Kg/s]	P [Pa]	P_{hyd} [W]	H_1/L	m [Kg/s]	P [Pa]	P_{hyd} [W]
0,0226	6,39	14,12	18,26	0,0226	6,09	16,55	20,42
0,0399	9,18	17,50	34,70	0,0399	8,79	15,59	29,74
0,0598	12,52	18,69	58,91	0,0598	12,86	18,88	64,09
0,0897	14,78	21,23	94,17	0,0897	15,10	21,70	100,51
0,1346	15,29	22,46	106,73	0,1346	15,40	22,90	107,10
0,2019	14,69	22,38	99,99	0,2019	14,67	22,80	104,42
0,3029	13,42	20,65	83,25	0,3029	13,42	20,56	80,16
0,4544	11,83	18,09	62,56	0,4544	11,58	17,81	56,48
0,6817	10,23	15,73	43,99	0,6817	10,16	15,35	41,00
1,0225	8,70	13,40	30,33	1,0225	8,61	13,35	30,82

$H_3=10,00; H_2/l=2,3$				$H_3=10,25; H_2/l=2,3$			
H_1/L	m [Kg/s]	P [Pa]	P_{hyd} [W]	H_1/L	m [Kg/s]	P [Pa]	P_{hyd} [W]
0,0226	6,18	12,64	16,95	0,0226	6,26	11,52	15,02
0,0399	9,62	15,89	39,11	0,0399	8,74	13,13	25,74
0,0598	13,24	17,79	69,52	0,0598	11,70	15,61	49,32
0,0897	14,40	26,68	95,59	0,0897	12,62	18,02	62,45
0,1346	14,34	27,86	91,77	0,1346	12,47	18,22	60,61
0,2019	13,58	26,95	81,66	0,2019	11,88	17,58	53,41
0,3029	12,57	24,72	72,12	0,3029	10,96	16,48	45,23
0,4544	11,23	21,87	58,41	0,4544	9,71	14,71	34,75
0,6817	9,67	19,40	42,17	0,6817	8,63	12,91	26,98
1,0225	8,28	16,10	30,43	1,0225	7,54	11,23	20,41

Tabela A.2 – Resultados da vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para $H_2/l = 2,5$.

$H_3=9,00; H_2/l=2,5$				$H_3=9,25; H_2/l=2,5$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]	H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	5,84	8,66	12,62	0,0226	6,87	21,86	33,90
0,0399	8,01	18,93	37,87	0,0399	9,23	20,51	43,43
0,0598	12,03	25,30	59,84	0,0598	12,61	35,49	110,67
0,0897	14,51	24,19	92,91	0,0897	14,64	23,24	94,45
0,1346	15,16	23,96	107,46	0,1346	15,25	24,18	107,99
0,2019	14,71	23,86	102,75	0,2019	14,71	24,12	102,44
0,3029	13,61	22,56	88,26	0,3029	13,52	22,57	87,27
0,4544	12,14	20,11	68,64	0,4544	11,95	19,84	66,27
0,6817	10,59	17,73	50,05	0,6817	10,40	17,50	48,00
1,0225	9,05	15,26	35,27	1,0225	8,86	14,90	33,44

$H_3=9,50; H_2/l=2,5$				$H_3=9,75; H_2/l=2,5$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]	H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	6,38	15,22	19,72	0,0226	5,98	20,41	17,96
0,0399	9,02	24,96	47,69	0,0399	8,81	15,52	31,36
0,0598	12,51	20,24	61,36	0,0598	12,87	20,36	66,76
0,0897	14,78	23,03	97,09	0,0897	15,10	23,53	103,26
0,1346	15,29	24,38	109,79	0,1346	15,38	24,84	109,73
0,2019	14,69	24,32	102,91	0,2019	14,66	24,75	107,19
0,3029	13,42	22,44	86,13	0,3029	13,42	22,35	82,58
0,4544	11,83	19,66	65,06	0,4544	11,76	19,41	60,68
0,6817	10,23	17,10	46,09	0,6817	10,18	16,80	43,21
1,0225	8,70	14,56	32,04	1,0225	8,61	14,50	32,44

$H_3=10,00; H_2/l=2,5$				$H_3=10,25; H_2/l=2,5$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]	H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	6,18	13,76	18,49	0,0226	6,22	12,58	16,13
0,0399	9,37	16,91	37,40	0,0399	8,68	14,14	27,34
0,0598	13,08	20,62	72,94	0,0598	11,45	18,25	51,26
0,0897	14,57	22,85	91,50	0,0897	12,48	19,33	62,72
0,1346	14,50	23,91	87,91	0,1346	12,32	19,59	60,85
0,2019	13,72	22,92	78,02	0,2019	11,75	18,94	53,78
0,3029	12,60	20,90	67,41	0,3029	10,87	17,78	45,98
0,4544	11,28	18,57	56,67	0,4544	9,80	15,87	36,73
0,6817	9,69	16,39	38,09	0,6817	8,59	13,95	28,05
1,0225	8,28	13,65	27,07	1,0225	7,40	11,96	20,79

Tabela A.3 – Resultados da vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para $H_2/l = 3,0$.

$H_3=9,00; H_2/l=3,0$				$H_3=9,25; H_2/l=3,0$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]	H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	5,36	9,45	12,04	0,0226	6,80	29,49	35,90
0,0399	7,94	22,04	42,53	0,0399	9,21	21,60	45,15
0,0598	11,92	27,93	62,96	0,0598	12,57	39,83	119,73
0,0897	14,49	27,85	100,07	0,0897	14,63	27,04	101,61
0,1346	15,15	28,23	115,10	0,1346	15,24	28,53	115,62
0,2019	14,71	28,20	110,25	0,2019	14,71	28,52	109,90
0,3029	13,61	26,69	95,34	0,3029	13,52	26,70	94,39
0,4544	12,14	23,80	74,96	0,4544	11,96	23,49	72,58
0,6817	10,59	20,99	55,35	0,6817	10,41	20,62	53,28
1,0225	9,06	18,07	39,65	1,0225	8,86	17,64	37,70

$H_3=9,50; H_2/l=3,0$				$H_3=9,75; H_2/l=3,0$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]	H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	6,40	17,61	23,27	0,0226	6,00	16,38	20,40
0,0399	8,97	27,12	54,23	0,0399	8,82	18,73	35,27
0,0598	12,44	23,24	66,45	0,0598	12,91	23,62	73,52
0,0897	14,71	26,91	103,38	0,0897	15,03	27,69	110,22
0,1346	15,23	28,66	116,42	0,1346	15,33	29,22	116,39
0,2019	14,62	28,63	109,51	0,2019	14,63	29,21	114,68
0,3029	13,36	26,45	92,48	0,3029	13,42	26,49	88,95
0,4544	11,78	23,19	70,68	0,4544	11,77	23,27	66,47
0,6817	10,19	20,15	50,80	0,6817	10,17	19,94	47,56
1,0225	8,66	17,20	35,88	1,0225	8,86	17,36	36,42

$H_3=10,00; H_2/l=3,0$				$H_3=10,25; H_2/l=3,0$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]	H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	6,20	16,33	22,02	0,0226	6,13	14,93	19,11
0,0399	9,37	17,89	38,57	0,0399	8,51	16,24	29,66
0,0598	12,99	24,01	78,10	0,0598	11,20	21,12	53,83
0,0897	14,40	26,68	95,59	0,0897	12,15	22,20	63,63
0,1346	14,34	27,86	91,77	0,1346	11,99	22,61	61,85
0,2019	13,58	26,95	81,66	0,2019	11,47	22,00	55,04
0,3029	12,57	24,72	72,12	0,3029	10,66	20,69	48,01
0,4544	11,23	21,87	58,41	0,4544	9,66	18,44	39,13
0,6817	9,67	19,40	42,17	0,6817	8,50	16,33	30,51
1,0225	8,28	16,10	30,43	1,0225	7,60	14,48	25,15

Tabela A.4 – Resultados da vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para $H_2/l = 4,0$.

$H_3=9,00; H_2/l=4,0$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	4,60	10,81	11,15
0,0399	7,73	31,73	55,35
0,0598	11,81	34,75	78,68
0,0897	14,46	35,82	117,58
0,1346	15,14	37,45	135,19
0,2019	14,70	37,60	130,36
0,3029	13,61	35,63	114,10
0,4544	12,15	31,81	91,11
0,6817	10,60	28,06	68,56
1,0225	9,06	24,17	50,06

$H_3=9,25; H_2/l=4,0$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	6,81	25,45	42,40
0,0399	9,09	29,81	54,72
0,0598	12,51	42,61	114,17
0,0897	14,61	35,52	119,63
0,1346	15,23	37,92	135,87
0,2019	14,70	38,00	130,01
0,3029	13,52	35,65	113,27
0,4544	11,97	31,40	80,61
0,6817	10,42	27,58	66,29
1,0225	8,87	23,60	47,77

$H_3=9,50; H_2/l=4,0$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	6,04	22,50	23,88
0,0399	8,97	27,85	56,72
0,0598	12,46	30,16	80,36
0,0897	14,75	35,71	122,72
0,1346	15,27	38,30	138,10
0,2019	14,69	38,30	130,70
0,3029	13,43	35,46	112,17
0,4544	11,84	31,13	87,29
0,6817	10,24	37,07	63,94
1,0225	8,71	23,09	45,87

$H_3=9,75; H_2/l=4,0$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	6,12	31,32	33,00
0,0399	8,82	23,04	43,29
0,0598	12,84	30,90	87,19
0,0897	14,92	36,31	127,84
0,1346	15,25	38,62	134,92
0,2019	14,59	38,70	132,78
0,3029	13,41	35,70	106,80
0,4544	11,78	30,57	80,76
0,6817	10,19	26,79	58,90
1,0225	8,89	25,33	60,83

$H_3=10,00; H_2/l=4,0$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	5,94	21,24	28,51
0,0399	9,29	23,48	48,18
0,0598	12,78	31,14	90,78
0,0897	14,09	34,75	108,06
0,1346	14,08	36,34	104,33
0,2019	13,36	35,98	93,49
0,3029	12,42	32,41	84,63
0,4544	11,12	29,94	71,25
0,6817	9,63	25,94	52,21
1,0225	8,28	21,38	38,37

$H_3=10,25; H_2/l=4,0$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	5,81	19,99	24,31
0,0399	8,28	21,15	35,96
0,0598	10,73	27,07	61,37
0,0897	11,56	28,21	68,94
0,1346	11,43	29,00	67,58
0,2019	11,01	28,44	60,89
0,3029	10,31	26,95	54,80
0,4544	9,42	23,92	45,06
0,6817	8,36	21,19	36,86
1,0225	7,50	19,09	31,39

Tabela A.5 – Resultados da vazão mássica, pressão e potência hidropneumática para $H_2/l = 6,0$.

$H_3=9,25; H_2/l=6,0$				$H_3=9,25; H_2/l=6,0$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]	H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	3,72	13,37	10,68	0,0226	6,55	34,95	48,88
0,0399	7,33	38,37	59,86	0,0399	9,06	43,69	71,49
0,0598	11,72	47,14	103,96	0,0598	12,41	49,20	119,45
0,0897	14,41	53,67	162,00	0,0897	14,60	53,82	164,91
0,1346	15,11	57,04	186,69	0,1346	15,20	57,75	187,94
0,2019	14,69	57,42	182,18	0,2019	14,70	58,04	182,05
0,3029	13,62	54,59	161,81	0,3029	13,53	54,62	161,27
0,4544	12,16	48,84	130,91	0,4544	11,98	48,22	127,80
0,6817	10,61	43,13	100,01	0,6817	10,44	42,39	97,13
1,0225	9,08	37,17	74,11	1,0225	8,89	36,30	70,96

$H_3=9,50; H_2/l=6,0$				$H_3=9,75; H_2/l=6,0$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]	H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	6,32	34,85	45,06	0,0226	5,82	27,76	31,53
0,0399	8,90	40,21	64,66	0,0399	8,77	54,86	98,93
0,0598	12,41	45,21	112,22	0,0598	12,68	46,87	123,45
0,0897	14,70	54,34	169,14	0,0897	14,70	54,47	171,55
0,1346	15,25	58,29	190,80	0,1346	15,10	58,22	183,15
0,2019	14,68	58,49	183,27	0,2019	14,52	58,41	173,94
0,3029	13,44	54,34	159,76	0,3029	13,41	55,15	152,72
0,4544	11,86	47,79	125,98	0,4544	11,81	47,61	118,54
0,6817	10,26	41,63	93,75	0,6817	10,20	41,22	86,19
1,0225	8,73	35,54	68,30	1,0225	8,94	36,88	68,04

$H_3=10,00; H_2/l=6,0$				$H_3=10,25; H_2/l=6,0$			
H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]	H_1/L	\dot{m} [Kg/s]	P [Pa]	P_{hid} [W]
0,0226	6,13	31,37	41,37	0,0226	5,73	29,29	34,00
0,0399	9,08	35,19	69,02	0,0399	7,78	30,67	47,86
0,0598	12,36	45,34	119,03	0,0598	9,93	31,69	78,23
0,0897	13,59	51,50	140,76	0,0897	10,62	40,08	82,95
0,1346	13,65	53,88	137,36	0,1346	10,55	41,27	82,27
0,2019	13,02	56,59	125,89	0,2019	10,31	42,41	77,22
0,3029	12,18	48,31	116,75	0,3029	9,79	39,68	72,05
0,4544	11,00	44,93	100,98	0,4544	9,08	35,15	62,05
0,6817	9,60	39,97	76,18	0,6817	8,16	31,45	51,67
1,0225	8,32	32,56	56,81	1,0225	7,26	27,87	43,43

APÊNDICE B – Trabalhos publicados

<i>Titulo</i>	<i>Publicado em</i>	<i>Autores</i>	<i>Ano</i>
Numerical Modeling and Constructal Design Applied to the Performance Improvement of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter	ENCIT	Maria Fernanda Espinel Lara, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Elizaldo Domingues dos Santos, Liércio André Isoldi	2014
Modelagem Computacional e Otimização da Conversão da Energia com Constructal Design de um Dispositivo do Tipo Coluna de Água Oscilante	CILAMCE	Maria Fernanda Espinel Lara, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Elizaldo Domingues dos Santos, Liércio André Isoldi	2014
Numerical Approach of the Main Physical Operational Principle of Several Wave Energy Converters: Oscillating Water Column, Overtopping and Submerged Plate	Defect and Diffusion Forum	Mateus das Neves Gomes' Maria Fernanda Espinel Lara' Silvana Letícia Pires Iahnke, Bianca Neves Machado, Marcelo Moraes Goulart, Flávio Medeiros Seibt, Elizaldo Domingues dos Santos, Liércio André Isoldi, Luiz Alberto Oliveira Rocha	2015
Constructal Design Applied to the Study of the Geometry and Submergence of an Oscillating Water Column	International Journal of Heat and Technology	Maria Fernanda Espinel Lara, Luiz Alberto Oliveira Rocha, Mateus das Neves Gomes, Elizaldo Domingues dos Santos, Liércio André Isoldi	Aceito para publicação

ANEXO A – Função definida pelo usuário (UDF)

A UDF é utilizada para a geração das ondas no domínio computacional, as equações da velocidade das ondas estão definidas pela Teoria Linear de Ondas.

```
#include "udf.h"

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

DEFINE_PROFILE(x_velocity,thread,position)
{
real PI=3.14159265; /*constant*/
real GRAV=9.81;
real H=1.0; /*wave height*/
real D=10.0; /*waterdepth*/
real T=5.0; /*wave período*/
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);
CC=sinh(k*D);
DD=cos(PI/2.0-2.0*PI*(t/T));
EE=cos(2.0*(PI/2.0-2.0*PI*(t/T)));
FF=cosh(2.0*k*D);
GG=cosh(2.0*(k*(ZZ+D)));

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

LL=D+(H*DD/2.0)+(PI*H*H/(8.0*L))*(BB/pow(CC,3.0))*(2.0+FF)*EE;
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+0.75*PI*PI*H*H/(L*T)*
GG*EE/pow(CC,4.0);
```

```
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+0.75*PI*PI*H*H/(L*T)*F
F*EE/pow(CC,4.0);
```

```
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=1.0; /*wave height*/
```

```
real D=10.0; /*waterdepth*/
```

```
real T=5.0; /*wave period*/
```

```
real L=37.5; /*wave length*/
```

```
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;
```

```
MM=sinh(k*(ZZZ+D));
```

```
NN=cosh(k*D);
```

```
OO=cos(PI/2.0-(2.0*PI*t/T));
```

```
WW=cos(2.0*(PI/2.0-2.0*PI*(t/T)));
```

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

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

```
RR=sinh(k*D);
```

```
SS=cosh(2.0*k*D);
```

```
TT=sinh(2.0*(k*(ZZZ+D)));
```

```
UU=sinh(2.0*k*D);
```

```
PP=D+(H*OO/2.0)+(PI*H*H/(8.0*L))*(NN/pow(RR,3.0))*(2.0+SS)*WW;
```

```
if(y<=D)
```

```
F_PROFILE(f,thread,position)=H/2.0*(GRAV*T/L)*RR*VV/NN+0.75*PI*PI*H*H/(L*T)*  
UU*QQ/pow(RR,4.0);
```

```
else
```

```
F_PROFILE(f,thread,position)=0;
```

```
}
```

```
end_f_loop(f,thread)
```

```
}
```