

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

DESIGN CONSTRUTAL DE UM DISPOSITIVO DE GALGAMENTO *ONSHORE* EM ESCALA
REAL PARA DIFERENTES ÁREAS DE CONSTRUÇÃO E ONDAS MONOCROMÁTICAS

por

Jaifer Corrêa Martins

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, Junho de 2016

“DESIGN CONSTRUTAL DE UM DISPOSITIVO DE GALGAMENTO *ONSHORE* EM ESCALA REAL PARA DIFERENTES ÁREAS DE CONSTRUÇÃO E ONDAS MONOCROMÁTICAS”

JAIFER CORRÊA MARTINS

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Tendo sido aprovado em sua forma final pela Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica.

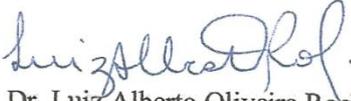

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Coordenador do Programa

Banca Examinadora


Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Orientador (PPGEO/FURG)


Prof. Dr. Ljército André Isoldi
Co-Orientador (PPGEO/FURG)


Prof. Dr. Jeferson Avila Souza
Professor convidado (PPGEO/FURG)


Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
Membro externo (PROMEC/UFRGS)

AGRADECIMENTOS

A CAPES por financiar a bolsa de estudos;

A Universidade Federal do Rio Grande (FURG);

Ao Orientador Prof. Doutor Elizaldo Domingues dos Santos pela confiança e pelas várias horas dedicadas no auxílio da elaboração deste trabalho;

Ao Co-Orientador Prof. Doutor Liércio André Isoldi pelas dicas e ajuda em detalhes de grande importância para realização deste trabalho;

Ao Mestre Marcelo Moraes Goulart pelo tempo dedicado ao esclarecimento de dúvidas relativas ao seu trabalho;

A todos que, direta ou indiretamente contribuíram, para a realização deste trabalho, porém, não tiveram seu nome mencionado.

RESUMO

Dispositivos de conversão de energia das ondas em energia elétrica (WEC – do inglês: *Wave Energy Converter*) vêm sendo estudados nas últimas décadas como uma alternativa para suprir a demanda energética mundial. O dispositivo de galgamento é um dos diversos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica e seu princípio de funcionamento consiste em uma rampa que guia a água das ondas incidentes para um reservatório localizado acima do nível médio do mar. A água acumulada no reservatório escoava através de uma turbina de baixa queda gerando energia elétrica. No presente trabalho é realizado um estudo numérico relacionado ao efeito da geometria da rampa (razão entre a altura e comprimento da rampa: H_1/L_1) e a submersão (S) da mesma sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real para duas ondas monocromáticas diferentes e três diferentes áreas construtivas (ϕ) do dispositivo, empregando o Design Construtal e a Busca Exaustiva. Mais especificamente, pretende-se avaliar a influência da razão entre altura e comprimento da rampa (H_1/L_1) que maximiza a potência disponível (P_d) obtida a partir da quantidade total de massa de água acumulada no reservatório para diferentes frações de área (ϕ), várias distâncias entre o fundo do dispositivo e o fundo do tanque (S) e diferentes ondas monocromáticas (T), com a finalidade de se determinar a geometria ótima do dispositivo. Neste trabalho, é avaliado apenas o princípio físico de funcionamento do dispositivo. Consequentemente, as geometrias ótimas obtidas aqui servem como uma recomendação teórica para futuros estudos e construções desse tipo de conversor de energia das ondas. Neste estudo, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica são resolvidas com o método dos volumes finitos (MVF). O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é empregado para abordar a mistura água e ar. O emprego do Design Construtal permitiu um aumento no desempenho fluidodinâmico do dispositivo para todos os casos simulados. Os resultados mostraram que as melhores geometrias são obtidas para as menores razões de H_1/L_1 para todas as profundidades. Estes indicaram ainda que o efeito da razão H_1/L_1 sobre P_d foi semelhante para dois diferentes períodos de onda T . Além disso, conforme esperado, a diminuição do período (T) conduziu a uma diminuição da potência disponível (P_d).

Palavras-chave: Galgamento, Modelagem Computacional, Design Construtal, *Volume of Fluid* (VOF), Energia das Ondas do Mar.

ABSTRACT

Devices to convert wave energy into electrical (WEC) have been studied in last decades as an alternative to supply the world energy demand. Therefore, the overtopping device is one of several wave energy converters into electrical energy and their operational principle consists of a ramp which guides the incoming waves into a reservoir raised slightly above the sea level. The accumulated water in the reservoir flows through a low head turbine generating electricity. In the present work it is performed a numerical study concerned with the effect of ramp geometry (ratio between the height and length of ramp: H_1/L_1) and the submergence S over the performance of an onshore overtopping device in real scale for two different monochromatic waves and three different construction areas (ϕ) of the device, by means of Constructal Design and the Exhaustive Search. The main purpose here is to verify the ratio between the height and length of ramp (H_1/L_1) which maximizes the available power (P_d) for several area fraction (ϕ), several distances from the bottom of the tank to the bottom of device (S) and monochromatic waves (T), for the purpose to determinates the optimal geometry of the device. In this work, it is evaluated only the main operational principle of device. Consequently, the optimal geometries achieved here serve as a theoretical recommendation for future studies and constructions of this kind of wave energy converter. In the present simulations, the conservation equations of mass, momentum and one equation for the transport of volumetric fraction are solved with the finite volume method (FVM). To tackle with water-air mixture, the multiphase model Volume of Fluid (VOF) is used. Constructal Design allowed a strong improvement of device fluid dynamic performance for all simulated cases. Results showed that the best shapes were achieved for the lowest ratios of H_1/L_1 for all analyzed depths. They also indicated that the effect of the ratio H_1/L_1 over P_d was similar for two different wave periods T . Furthermore, as expected, a decrease of period (T) resulted in a decrease of available power (P_d).

Keywords: Overtopping, Computational Modeling, Constructal Design, Volume of Fluid (VOF), Ocean Wave Energy.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	13
1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Motivação	16
1.2 Estado da Arte	18
1.3 Objetivos	25
1.3.1 Objetivos gerais	25
1.3.2 Objetivos específicos	26
1.3.3 Organização do texto	26
2. FUNDAMENTOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS	29
2.1 Potencial de Energia das Ondas	29
2.2 Classificação dos Equipamentos	31
2.2.1 Dispositivo de Galgamento	33
2.2.2 Corpo Oscilante	34
2.2.3 Coluna de Água Oscilante (CAO)	35
2.3 Teoria das Ondas	36
2.3.1 A Formação das Ondas	36
2.4 Teoria de Stokes de 2ª Ordem	43
3. FUNDAMENTOS DO DESIGN CONSTRUTAL	45
3.1 Fundamentação Teórica	45
3.2 Principais Aplicações na Literatura	46
3.3 Método de Otimização: Busca Exaustiva	49
4. MODELAGEM MATEMÁTICA	51
4.1 Design Construtal Aplicado ao Dispositivo de Galgamento	51
4.2 O Modelo Multifásico <i>Volume Of Fluid</i> (VOF)	55
5. MODELAGEM NUMÉRICA E PROCEDIMENTOS NUMÉRICOS	58
5.1 Modelagem Numérica	58
5.2 Método dos Volumes Finitos (MVF)	60
5.3 Discretização Temporal das Equações de Conservação	66

5.4 Tratamento dos Termos Advectivos das Equações de Conservação.....	69
5.5 Resolução de Equações Aplicando o Método de Solução Segregado.....	71
5.6 Acoplamento Pressão-Velocidade.....	72
5.7 Método Geo-Reconstruction	73
5.8 Procedimentos Numéricos.....	74
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79
6.1 Resultados para Período de Onda Igual $T = 5,0$ S.....	82
6.2 Resultados para Período de Onda Igual A $T = 7,5$ S.....	87
6.3 Avaliação do Efeito das Diferentes Áreas de Construção Sobre o Desempenho e Forma Geométrica do Dispositivo.....	92
7. CONCLUSÕES.....	100
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Matriz elétrica brasileira (Adaptado de Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia, 2015).....	16
Figura 1.2 – Matriz elétrica OCDE (Adaptado de Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia, 2015).....	17
Figura 1.3 – Matriz elétrica mundo (Adaptado de Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia, 2015).....	17
Figura 1.4 – Utilização de fontes renováveis na matriz energética em 2014 (Adaptado de Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia, 2015).....	18
Figura 1.5 – Wave Dragon (Tedd e Kofoed, 2009).	20
Figura 1.6 – Esquema do dispositivo de galgamento (Liu <i>et al.</i> , 2008a).....	20
Figura 1.7 – Dispositivo de galgamento circular (Nam <i>et al.</i> , 2008).....	21
Figura 1.8 – <i>Sea Slot-cone Generator</i> (SSG) (Margheritini <i>et al.</i> , 2009).....	22
Figura 1.9 – Distribuição dos equipamentos <i>Wave Dragon</i> (Adaptado de Beels <i>et al.</i> , 2010)	22
Figura 1.10 – Esquema 2D do dispositivo de galgamento (Iahnke, 2010)	23
Figura 1.11 – Dispositivo de galgamento circular (Jin <i>et al.</i> , 2012).....	24
Figura 1.12 – Quebra-mar com dispositivo de galgamento (Vicinanza <i>et al.</i> , 2014)	24
Figura 1.13 – Dispositivo de galgamento em escala real com dois graus de liberdades (Goulart <i>et al.</i> , 2015).....	25
Figura 2.1 – Potencial de energia das ondas ao redor do mundo (Ghosh e Praelas, 2011).	30
Figura 2.2 – Localização dos dispositivos conversores de energia das ondas (López <i>et al.</i> , 2013). .	31
Figura 2.3 – Tecnologias de conversores de energia das ondas (Adaptado de Fadaeenejad <i>et al.</i> , 2014).....	32
Figura 2.4 – Dispositivo <i>Tapchan</i> : a) Ilustração do esquema de funcionamento, b) imagem real do equipamento (Pereira, 2010).....	33
Figura 2.5 – <i>Wave Dragon</i> (Kofoed <i>et al.</i> , 2006).	33
Figura 2.6 – <i>Wave Plane</i> (López <i>et al.</i> , 2013).	34
Figura 2.7 – SSG: a) Vista lateral, b) Ilustração da instalação do dispositivo (Margheritini <i>et al.</i> , 2009).....	34
Figura 2.8 – Pelamis (Bahaj, 2011).....	35
Figura 2.9 – Esquema de funcionamento de um sistema CAO (Adaptado do Grupo de Investigação Reconhecimento - GIR, 2011).....	36
Figura 2.10 – Representação Esquemática da Energia Contida em Ondas Oceânicas Conforme Seu Tipo (Adaptado de Alfredini, 2000).	38
Figura 2.11 – Elementos da Onda (Carneiro, 2007).	39
Figura 2.12 – Teoria das ondas (Carneiro, 2007).	41
Figura 2.13 – Aplicabilidade das teorias de ondas (Chakrabarti, 2005).	42
Figura 3.1 – Domínio bidimensional trapezoidal com geração de calor constante (Rocha <i>et al.</i> , 2005).....	47
Figura 3.2 – Domínio da placa com perfuração (Da Silva <i>et al.</i> , 2015)	48
Figura 3.3 – Domínio do dispositivo CAO (Gomes, 2014).....	49
Figura 3.4 – Ilustração do processo de otimização aplicado ao dispositivo de galgamento com dois graus de liberdade (Goulart <i>et al.</i> , 2015).	50

Figura 4.1 – Domínio computacional de um dispositivo de galgamento em escala real com dois graus de liberdades.	52
Figura 4.2 – Ilustração do processo de otimização aplicado ao dispositivo de galgamento com dois graus de liberdade.	53
Figura 5.1 – Métodos de resolução para problemas físicos (Adaptado de Maliska, 2004).	59
Figura 5.2 – Técnica de discretização (Maliska, 2004).	61
Figura 5.3 – Volume de controle típico (Maliska, 2004).	62
Figura 5.4 – Volume de controle empregado em MVF para um domínio bidimensional (Adaptado de Patankar, 1980).	66
Figura 5.5 – Conexão espacial e temporal do volume P (Maliska, 2004).	67
Figura 5.6 – Tipos de formulações no tempo (Adaptado de Maliska, 2004).	69
Figura 5.7 – Obtenção de ϕ_f em uma face do volume de controle (Adaptado de Dos Santos 2011).	70
Figura 5.8 – Algoritmo de solução segregada (Adaptado de Fluent, 2007).	72
Figura 5.9 – (a) Interface Real e (b) Interface Geo-Reconstruction (Adaptado de Fluent, 2007).	74
Figura 5.10 – Discretização espacial aplicada ao dispositivo de galgamento <i>onshore</i> em escala real... ..	75
Figura 5.11 – Teste de independência do passo de tempo para as simulações realizadas.	76
Figura 5.12 – Verificação da solução numérica com solução analítica obtida pela teoria de Stokes de 2ª Ordem: a) $T = 5,0$ s; b) $T = 7,5$ s	77
Figura 6.1 – Comportamento instantâneo da água no dispositivo de galgamento para três razões de H_1/L_1 : a) Vazão mássica, b) Altura da água acumulada no interior do reservatório.	80
Figura 6.2 – Comportamento transiente hidrodinâmico do escoamento da água para $S = 4,5$ m, $\phi = 0,006$ and $T = 7,5$: a) razão ótima $(H_1/L_1)_o = 0,49$; b) pior razão $H_1/L_1 = 0,60$	81
Figura 6.3 – Efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível P_d ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,006$ e $T = 5,0$ s.	82
Figura 6.4 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada $((H_1/L_1)_o)$ para $\phi = 0,006$	83
Figura 6.5 – Efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível P_d ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,012$ e $T = 5,0$ s.	84
Figura 6.6 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada $((H_1/L_1)_o)$ para $\phi = 0,012$	85
Figura 6.7 – Efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível P_d ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,024$ e $T = 5,0$ s.	86
Figura 6.8 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada $((H_1/L_1)_o)$ para $\phi = 0,024$	87
Figura 6.9 – Efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível P_d ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,006$ e $T = 7,5$ s.	88
Figura 6.10 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada $((H_1/L_1)_o)$ para $\phi = 0,006$	88
Figura 6.11 – Efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível P_d ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,012$ e $T = 7,5$ s.	90
Figura 6.12 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada $((H_1/L_1)_o)$ para $\phi = 0,012$	90
Figura 6.13 – Efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível P_d ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,024$ e $T = 7,5$ s.	91

Figura 6.14 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$) para $\phi = 0,024$	92
Figura 6.15 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) para $\lambda = 36,6$ m e $T = 5,0$ s.	93
Figura 6.16 – Comportamento transiente hidrodinâmico do escoamento da água para $T = 5,0$ s e $\phi = 0,006$: a) $S = 3,5$ m e $(H_1/L_1)_o = 0,62$, b) $(S)_o = 4,5$ m e $(H_1/L_1)_{oo} = 0,46$, c) $S = 6,5$ m e $(H_1/L_1)_o = 0,21$	94
Figura 6.17 – Efeito de S sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada $(H_1/L_1)_o$ para $\lambda = 36,6$ m e $T = 5,0$ s.	95
Figura 6.18 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) para $\lambda = 65,4$ m e $T = 7,5$ s.	96
Figura 6.19 – Comportamento transiente hidrodinâmico do escoamento da água $T = 7,5$ s e $S = 3,5$ m: a) $\phi = 0,006$ e $H_1/L_1 = 0,65$, b) $\phi = 0,012$ e $H_1/L_1 = 0,33$, c) $\phi = 0,024$ e $H_1/L_1 = 0,16$	96
Figura 6.20 – Efeito de S sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$).....	97
Figura 6.21 – Efeito da fração de área (ϕ) sobre a potência disponível duas vezes maximizada (P_{dmm}) para dois períodos de onda (T) diferentes.	98
Figura 6.22 – Efeito da fração de área (ϕ) sobre a submersão uma vez otimizada (S_o) e sobre a razão duas vezes otimizada $(H_1/L_1)_{oo}$ para dois períodos de onda (T) diferentes.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Distribuição das simulações para $T = 5,0$ s	54
Tabela 4.2 – Distribuição das simulações para $T = 7,5$ s	54
Tabela 5.1 – Valores de ϕ , I^ϕ e S^ϕ usados na Equação (5.9).....	64
Tabela 5.2 – Valores de altura da superfície livre da onda (η) no tempo de 15,0 s para os passos de tempo estudados e suas variações.....	76

LISTA DE SÍMBOLOS

A_r	Área da rampa	[m ²]
A_T	Área do tanque de ondas	[m ²]
a	Amplitude da onda	[m]
C	Celeridade da onda	[m.s ⁻¹]
\bar{F}	Forças externas por unidade de volume	[N.m ⁻³]
g	Aceleração do campo gravitacional	[m.s ⁻²]
h	Distância do fundo do mar até o nível médio da água	[m]
h_a	Altura de água acumulada no reservatório	[m]
H_R	Altura do reservatório	[m]
H	Altura da onda	[m]
H_1	Altura da rampa	[m]
H_T	Altura total do tanque	[m]
k	Número de onda	[m ⁻¹]
L_I	Comprimento da rampa	[m]
L_R	Comprimento do reservatório	[m]
L_T	Comprimento total do tanque	[m]
\dot{m}	Vazão mássica instantânea	[kg/s]
m	Massa de água que entra no reservatório	[kg]
P_d	Potência disponível	[W]
p	Pressão	[Pa]
P_{abs}	Pressão atmosférica	[Pa]
P_{man}	Pressão manométrica	[Pa]
S	Distância entre o fundo do dispositivo e o fundo do tanque	[m]
t	Tempo	[s]
T	Período de onda	[s]
U_R	Número de Ursell [$\lambda^2 H/h^3$]	
\vec{v}	Vetor velocidade	[m/s]
W	Coordenada espacial perpendicular ao dispositivo	[m]
x	Coordenada espacial	[m]
z	Coordenada espacial	[m]

u_x	Componente da velocidade na direção x	[m/s]
u_z	Componente da velocidade na direção z	[m/s]

Símbolos gregos

μ	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
α_q	Fração volumétrica das duas fases (ar e água)	
$\alpha_{\text{água}}$	Fração volumétrica da fase água	
α_{ar}	Fração volumétrica da fase ar	
η	Elevação da superfície livre	[m]
λ	Comprimento de onda	[m]
ρ	Massa específica	[kg.m ⁻³]
ϕ	Razão entre área da rampa e a área do tanque de ondas	
σ	Frequência da onda	[s ⁻¹]
$\bar{\tau}$	Tensor taxa de deformação	[Pa]
Δ	Variação da componente em relação ao tempo ou ao espaço	

Sub-índices

e	Face leste do volume de controle
f	Face
n	Face norte do volume de controle
s	Face sul do volume de controle
w	Face oeste do volume de controle
min	Mínimo
$máx$	Máximo
() _o	Uma vez otimizado
() _{oo}	Duas vezes otimizado
() _m	Uma vez maximizado
() _{mm}	Duas vezes maximizado

LISTA DE ABREVIATURAS

CAO	Coluna de Água Oscilante
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
EDP	Equação Diferencial Parcial
Eq.	Equação
Fig.	Figura
MDF	Método de Diferenças Finitas
MEF	Método de Elementos Finitos
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
Mtep	Milhões de Toneladas Equivalente de Petróleo
MVF	Método dos Volumes Finitos
NAE	Nível Estático (ou Nível Médio) da Água
OCDE	Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico
PIB	Produto Interno Bruto
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
PRESTO	<i>Pressure Staggering Option</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
SSG	<i>Sea Slot-cone Generator</i>
UDF	Função Definida pelo Usuário (<i>User Defined Function</i>)
VC	Volume de Controle
VOF	<i>Volume of Fluid</i>
WD	<i>Wave Dragon</i>
WEC	<i>Wave Energy Conversion</i>
WPP	<i>Wave Plane Production</i>
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O crescimento populacional e industrial juntamente com o imediatismo de consumo de bens materiais, tem aumentado significativamente a demanda de energia nos últimos anos. Conforme estudo realizado pela Exxonmobil (2014), a demanda energética no mundo aumentará em 35% até 2040.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (Empresa de Pesquisa Energética, 2015), em 2014 no Brasil a demanda total de energia atingiu aproximadamente 305,6 Mtep (Milhões de toneladas equivalente de petróleo), registrando um crescimento de 3,1% ante o PIB nacional de 0,1%. Além disso, houve um aumento de 2,9% no consumo de energia elétrica no país.

Desta forma, se faz cada vez mais necessário o desenvolvimento de alternativas renováveis para suprir a demanda energética crescente. Entre as alternativas com estudos avançados e alguns deles até mesmo já sendo produzidos em escala comercial estão: as fontes de energia solar, eólica e, pode-se citar ainda, as usinas de cogeração de biomassa conforme o Greenpeace (2010).

As Figuras 1.1, 1.2 e 1.3 mostram, respectivamente, a distribuição da matriz elétrica do Brasil, da OCDE (Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico – composto por 34 países, entre eles: Alemanha, França, Estados Unidos, Japão) e de outras partes do mundo, no ano de 2014.

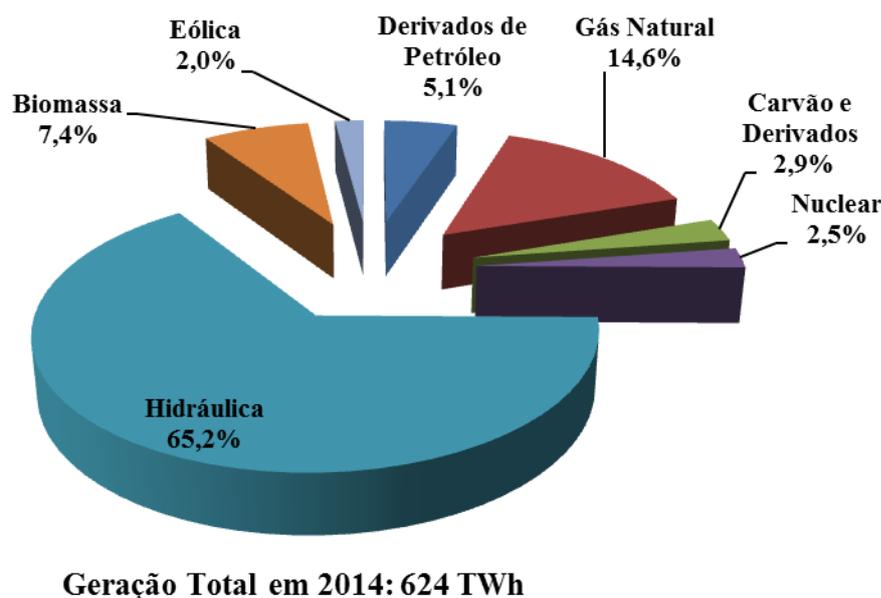


Figura 1.1 – Matriz elétrica brasileira (Adaptado de Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia, 2015).

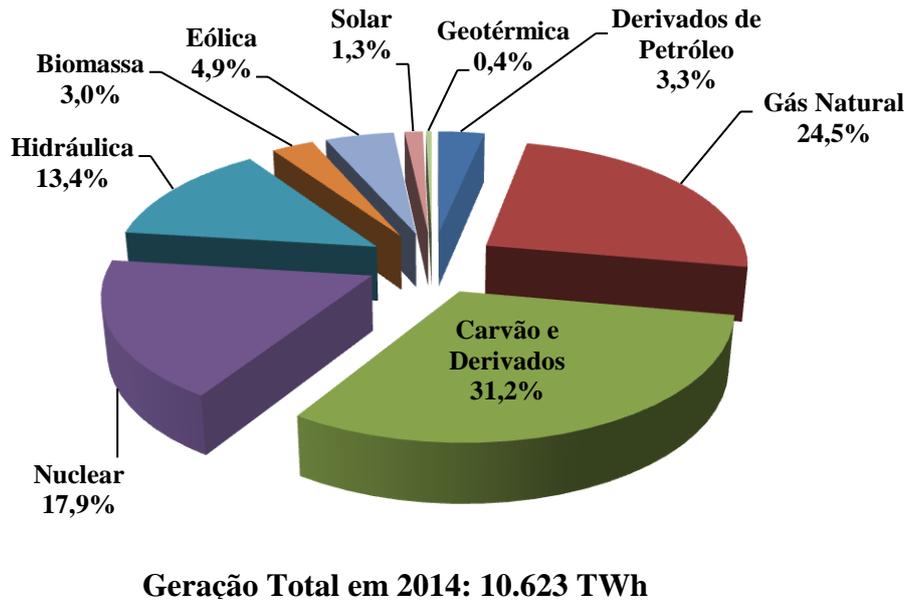


Figura 1.2 – Matriz elétrica OCDE (Adaptado de Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia, 2015).

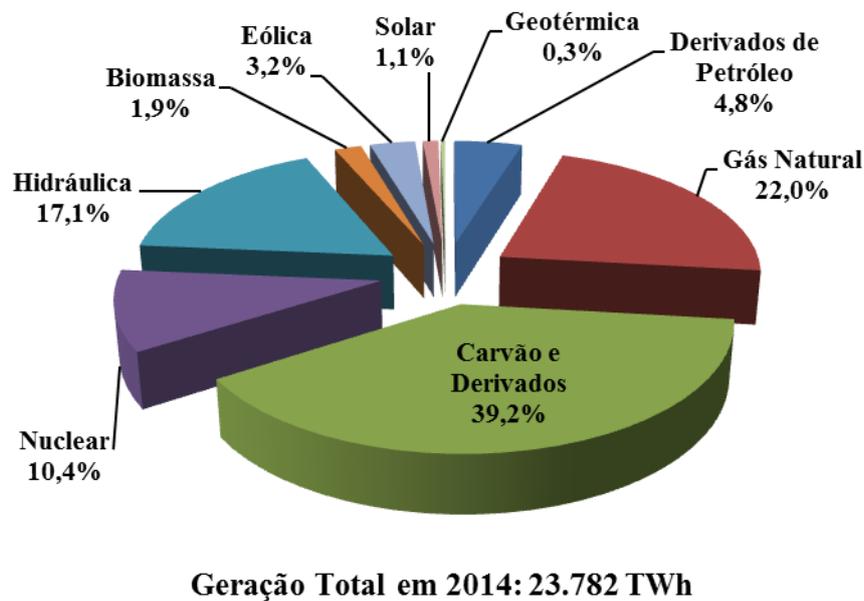


Figura 1.3 – Matriz elétrica mundo (Adaptado de Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia, 2015).

Assim, se comparado a outros lugares do mundo, o Brasil apresenta uma significativa diferença na participação da energia hidráulica, de 65,2% em 2014, contra apenas 13,4% na OCDE, e de 17,1% nos outros países. Na biomassa, o Brasil também se destaca, com 7,4% de participação, principalmente como resultado da geração por bagaço de cana.

Portanto, o Brasil é o país com maior utilização de fontes renováveis em sua matriz energética como pode ser visto na Fig. 1.4.

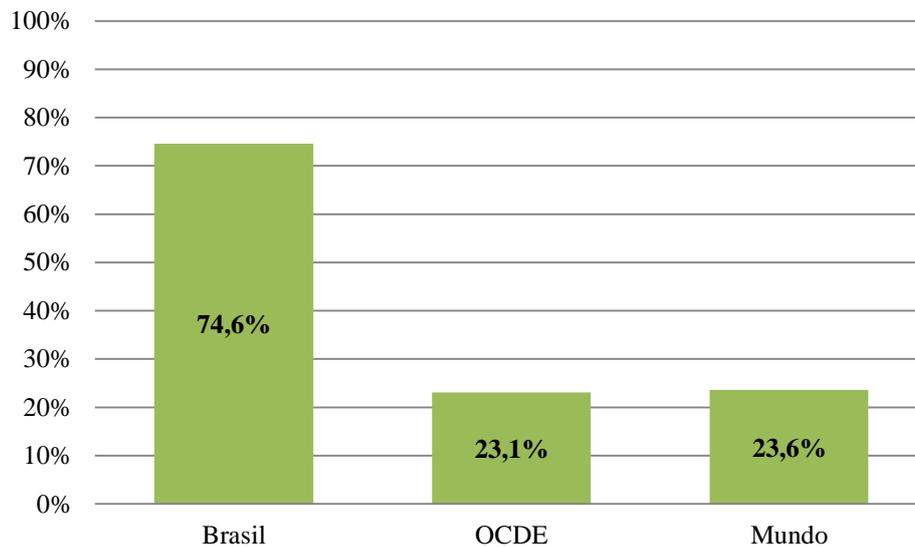


Figura 1.4 – Utilização de fontes renováveis na matriz energética em 2014 (Adaptado de Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia, 2015)

Assim, devido a alterações climáticas sentidas nos últimos anos, responsáveis por períodos de seca em alguns períodos, é interessante a busca por alternativas para complementar a matriz energética do país. Uma possibilidade é o aproveitamento da energia proveniente das ondas do mar para geração de energia elétrica.

Entre algumas das possibilidades de dispositivos para o aproveitamento da energia das ondas, um em especial chama atenção por seu princípio de funcionamento aparentemente simples, o dispositivo de galgamento. Este dispositivo é constituído por uma rampa que é galgada pelas ondas do mar e, posteriormente, é armazenada em um reservatório. Após a ocorrência do galgamento, a água acumulada no reservatório escoar através de uma turbina de baixa queda gerando energia elétrica (Fleming, 2012).

1.2 Estado da Arte

Alguns estudos sobre um melhor entendimento do funcionamento do dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo galgamento em energia elétrica, vem sendo realizados. De acordo com Tedd e Kofoed (2009), grande parte da literatura existente sobre galgamento (*overtopping*) investigou os escoamentos sobre quebra-mares e barragens. Estas estruturas de defesa costeira tem a superfície livre do dispositivo maior do que a altura da crista da onda para que a

passagem de água sobre ela seja a menor possível. Entretanto, para a obtenção de energia a partir das ondas, maiores vazões mássicas de água sobre a estrutura são desejadas e, portanto, estruturas de altura menor são necessárias.

Dentre os trabalhos realizados sobre o dispositivo de galgamento como forma de se obter energia elétrica a partir das ondas do mar, há uma maior concentração no desenvolvimento de estudos experimentais para avaliação de parâmetros construtivos do dispositivo de galgamento. Entretanto, o número de estudos numéricos tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. Os estudos mais relevantes encontrados na literatura são apresentados a seguir.

Kofoed (2002) realizou um estudo desenvolvendo orientações para o cálculo de descargas da água no galgamento para uma grande variedade de layouts de rampa por meio de experimentos em laboratório. Ambas as estruturas com reservatório individual e com diferença de nível são examinadas. A influência de vários parâmetros geométricos tais como: a inclinação da rampa, diferença de altura entre a borda do topo da rampa e a superfície livre da água e a saída livre da água na descarga do galgamento foram investigados. O efeito do uso de múltiplos reservatórios com diferença de nível do galgamento também foram quantificados. Kofoed (2002) analisou a ênfase na otimização da geometria ideal com a finalidade de maximizar a energia potencial da água acumulada no galgamento. O autor baseou-se nos dados experimentais para prever procedimentos da descarga da água no galgamento acima da encosta (nos dispositivos *onshore*). Determinou através dos seus experimentos que a eficiência hidráulica global de conversores de energia das ondas, com base no princípio de galgamento, está entre 20% e 35% quando um único reservatório é utilizado, e até 45% - 50% para uma estrutura com quatro níveis nos reservatórios.

Kofoed *et al.* (2006) realizaram no período 1998-2001 extensos testes em um tanque de ondas em um protótipo em escala reduzida de 1:50 na Universidade de Aalborg na Dinamarca. Em um segundo momento um novo protótipo em escala reduzida de 1:4,5 do Wave Dragon, foi colocado em Nissum Bredning, na Dinamarca, sendo ligado à rede em maio 2003. Este é considerado como o primeiro conversor de energia das ondas *offshore* do mundo. No período de maio de 2003 a janeiro de 2005, um amplo programa de medição foi realizado para monitorar a potência, o clima de ondas, as forças nos sistemas de fixação, tensões na estrutura e movimentos do protótipo, resultando em plano de estudos com a finalidade de determinar a ideal concepção para a estrutura e o planejamento para implantação de uma unidade de produção de energia de 4 MW. Uma ilustração da configuração do Wave Dragon pode ser vista na Fig. 1.5.

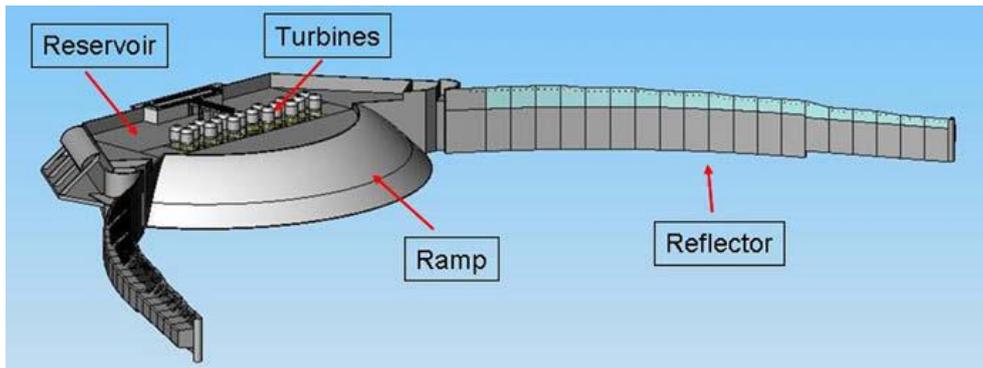


Figura 1.5 – Wave Dragon (Tedd e Kofoed, 2009).

Em Liu *et al.* (2008a) é apresentada a modelagem computacional de um dispositivo do tipo de galgamento utilizando a metodologia VOF (*Volume of Fluid*) para a interação entre ar e água no dispositivo. Para isso, geometrias diferentes para o conversor foram analisadas empregando modelos computacionais 2D (bidimensional). As equações de conservação foram resolvidas com o método de volumes finitos, mais precisamente com o software FLUENT. Várias condições das ondas incidentes e geometrias do dispositivo foram analisadas, resultando em recomendações sobre a inclinação da rampa do dispositivo. Contudo, não foi empregado o método Design Construtal para a definição da avaliação geométrica da rampa. Relações fixas de altura por comprimento da rampa de 1:1, 1:2 e 2:3 foram investigadas. Um esquema do dispositivo de galgamento é apresentado na Fig. 1.6.

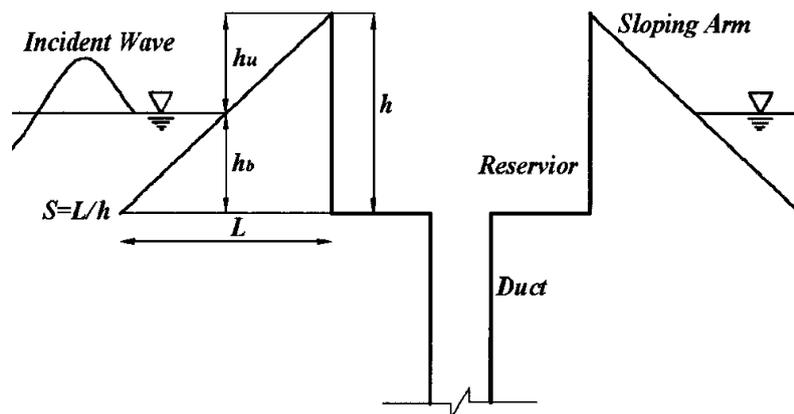


Figura 1.6 – Esquema do dispositivo de galgamento (Liu *et al.*, 2008a).

Nam *et al.* (2008) realizam um estudo numérico de um dispositivo de galgamento circular, onde foram inseridas aletas igualmente espaçadas na área da rampa para guiar a água incidente, com o objetivo de determinar os parâmetros geométricos ótimos que maximizam a quantidade de água galgada. Para a realização deste estudo foi utilizado o *software FLOW3D*, sendo

simulados casos *2D* e *3D*. Nas *2D* foram testados diferentes ângulos e formas da rampa. Já as simulações *3D* tiveram o objetivo de compreender o comportamento do escoamento da água sobre o dispositivo de galgamento, além do efeito causado com o acréscimo de aletas sobre a rampa. A Fig. 1.5 mostra um desenho do funcionamento do dispositivo. Como resultado, os parâmetros ótimos obtidos para os casos *2D* e *3D*, não foram os mesmos.

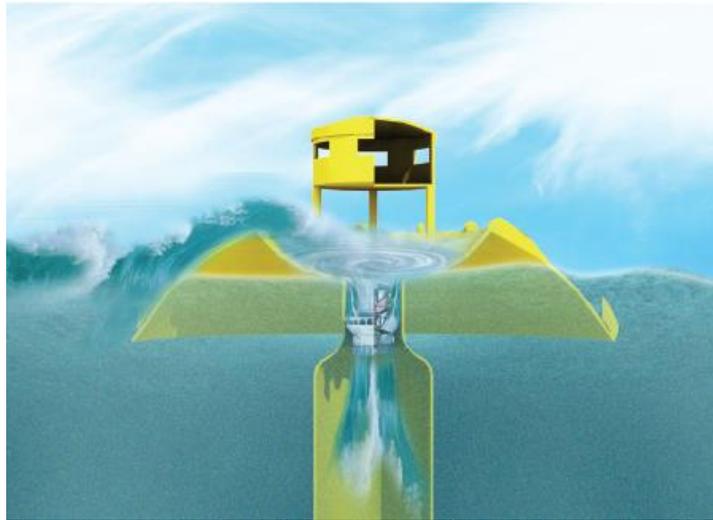


Figura 1.7 – Dispositivo de galgamento circular (Nam *et al.*, 2008)

Margheritini *et al.* (2009) analisaram um dispositivo denominado Sea Slot-cone Generator (SSG), como pode ser visto na Fig. 1.8. Conforme os autores, as vantagens do SSG são seu baixo custo da construção da estrutura e a sua robustez. No estudo é descrito o conceito do conversor de energia das ondas SSG e os estudos por trás do processo que leva à sua construção. A planta piloto é um módulo *onshore* em escala real com três níveis de altura para o reservatório. Os resultados dos testes de laboratório foram usados para projetar uma planta piloto e para definir suas características construtivas. Já em Margheritini *et al.* (2012), é realizada uma análise de viabilidade de implementação do SSG no porto de *Hanstholm* na Dinamarca. Desta forma, um estudo numérico de otimização geométrica do SSG foi realizado por meio do *software WOPSim*, o qual foi desenvolvido pela Universidade de Aalborg especificamente para a determinação de parâmetros do SSG.

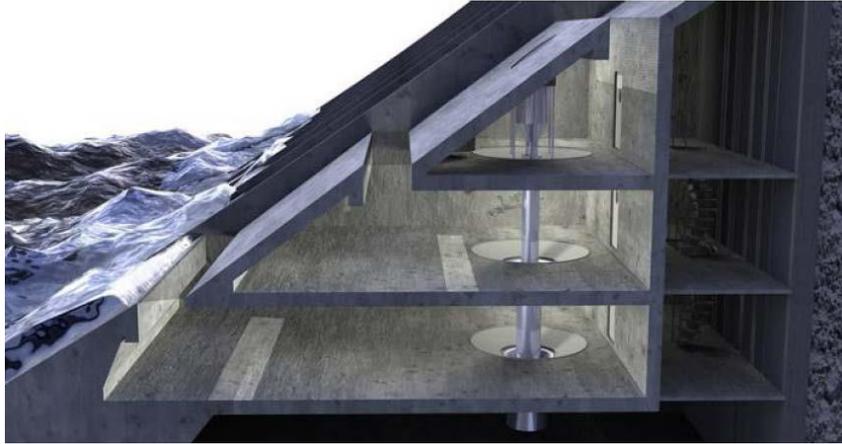


Figura 1.8 – *Sea Slot-cone Generator* (SSG) (Margheritini *et al.*, 2009)

Ainda no âmbito numérico, Beels *et al.* (2010) utilizaram o modelo *MILDwave*, o qual emprega as equações de declividade suave (*mild-slope equations*) e descreve a transformação de ondas irregulares com uma estreita faixa de frequência conforme a variação batimétrica. Além disso, é capaz de simular processos de transformação da onda tais como: refração, empolamento, reflexão e difração. Entretanto, a quebra da onda (rebentação) e a energia de dissipação por atrito no fundo não foram considerados. O *MILDwave* pode simular ainda o efeito do vento sobre o crescimento da onda. Desta forma, o modelo numérico desenvolvido foi implementado em um único *Wave Dragon* e em diferentes formações do conjunto de dispositivos, variando a distância entre os equipamentos em D , $2D$ e $3D$ sendo D a medida da distância entre as duas pontas do refletor do *Wave Dragon* (260 m). Como resultado, os autores concluíram que uma fazenda de cinco conversores *Wave Dragon* instalados com um arranjo desalinhado, como pode ser visto na Fig. 1.9, torna-se mais eficiente para o aproveitamento do espaço, sem provocar interferências significativas no rendimento do conversor.

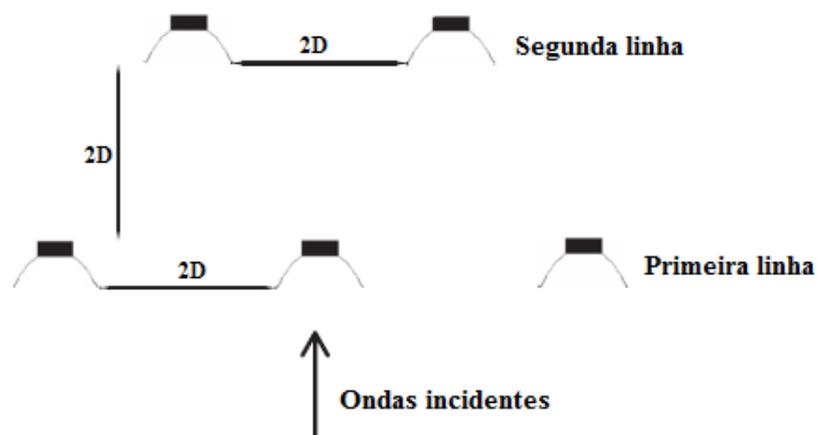


Figura 1.9 – Distribuição dos equipamentos *Wave Dragon* (Adaptado de Beels *et al.*, 2010)

Iahnke (2010) avaliou a inclinação da rampa de um dispositivo de galgamento em um escoamento bidimensional, conforme a Fig. 1.10, na qual são apresentadas as variáveis: h_u (altura entre o nível da água e a altura máxima da rampa), h_b (altura entre o nível da água e o fundo do reservatório), h_R (altura da rampa ou do reservatório) e L_R (largura da rampa). Sendo que $h_u = h_b = h_R / 2$. Considerou-se um clima de ondas, semelhante ao encontrado no sul do Brasil (cidade de Rio Grande, colocada em aproximadamente 32°S e 52°W). Nesse trabalho, observou-se que a melhor geometria foi obtida para um ângulo de 30°. Além disso, a área da rampa variava para cada caso, e não foi empregado o Design Construtal para avaliação das geometrias estudadas.

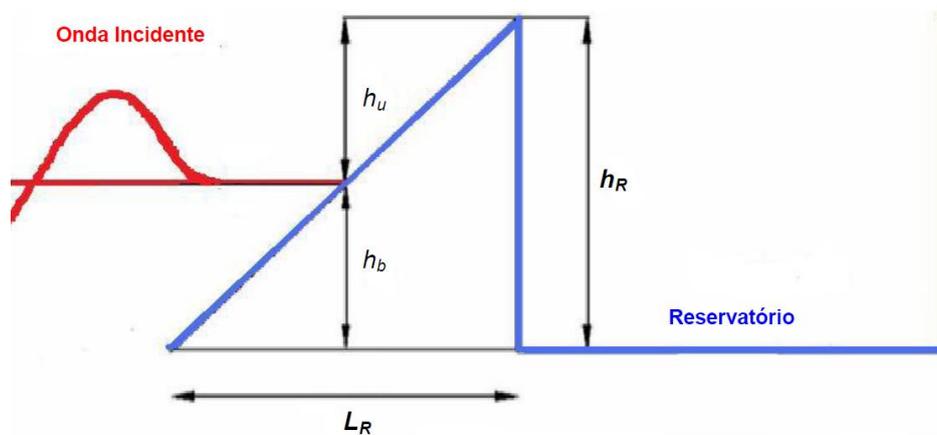


Figura 1.10 – Esquema 2D do dispositivo de galgamento (Iahnke, 2010)

Um dispositivo semelhante ao estudado em Nam *et al.* (2008a) foi analisado em Jin *et al.*, (2012), porém somente o efeito do número de aletas foi analisado. Neste estudo foi empregado o software comercial FLUENT para as simulações em 3D, conforme a ilustração do dispositivo apresentado na Fig. 1.11. As equações governantes empregam o RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) e o padrão $k-\epsilon$ aplicado como modelagem da turbulência. Com relação a mistura água-ar, a mesma foi abordada com o emprego do modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF). Os resultados preliminares mostraram que com um número maior de aletas há um aumento no volume de água galgado, entretanto não foi definido um número ótimo de aletas.

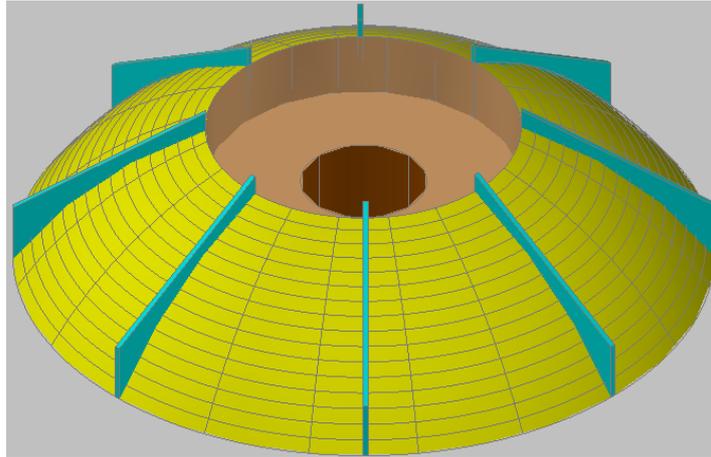


Figura 1.11 – Dispositivo de galgamento circular (Jin *et al.*, 2012)

Vicinanza *et al.* (2014) realizou um estudo experimental sobre o aproveitamento de estruturas de quebra-mares para instalação de dispositivos de galgamento com a finalidade de aproveitar o acúmulo de água no reservatório para geração de energia, determinar o comportamento hidráulico e as cargas as quais o dispositivo é submetido. Um esquema do dispositivo é apresentado na Fig. 1.12. O modelo testado foi em uma escala de 1/30 em relação ao protótipo. O canal onde o modelo foi testado tem comprimento de 25 m e altura de 1,5 m. As ondas geradas foram baseadas em três parâmetros do espectro *JONSWAP*. O modelo foi testado para duas diferentes configurações chamadas: baixa ($d_w = 2,25$ m) e alta ($d_w = 3,75$ m), dimensões relativas ao protótipo. Além disso, parâmetros como altura e largura do reservatório entre outros, foram modificadas, por valores predeterminados, durante o experimento a fim de determinar a geometria que melhor favorecia a entrada de água no reservatório. Os resultados obtidos foram comparados com um trabalho experimental realizado anteriormente, surgindo novas equações. Podendo estas serem utilizadas como uma primeira recomendação no projeto de quebra-mares providos de um dispositivo conversor de energia das ondas.

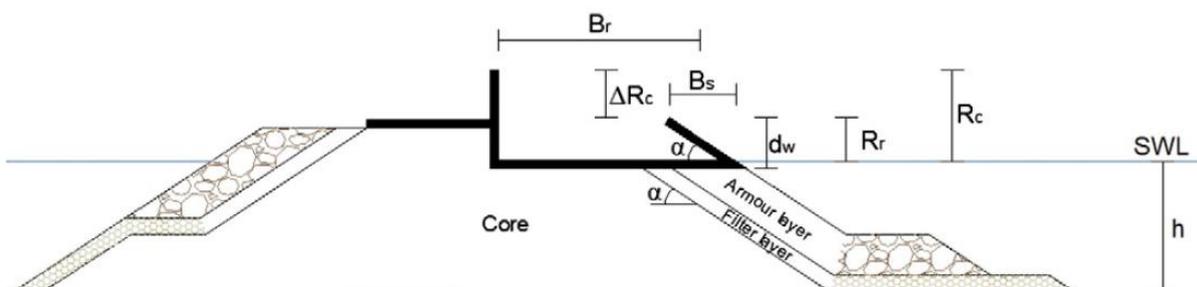


Figura 1.12 – Quebra-mar com dispositivo de galgamento (Vicinanza *et al.*, 2014)

Em Goulart *et al.* (2015) foi realizado um estudo numérico relacionado ao efeito da geometria da rampa sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real,

empregando o Design Construtal, conforme a configuração apresentada na Fig. 1.13. O objetivo principal foi avaliar a razão entre altura e comprimento da rampa (H_1/L_1) que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório do dispositivo para distâncias entre o fundo do dispositivo e o fundo do tanque de $S = 5,0$ m e $S = 6,0$ m. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica (modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF)) foram resolvidas com o método dos volumes finitos (MVF). Os resultados mostraram que as melhores geometrias foram obtidas para as menores razões de H_1/L_1 . Também foi observado que a diminuição de S levou a um aumento da massa de água máxima que entra no reservatório (m_m) e da razão H_1/L_1 ótima, $(H_1/L_1)_o$.

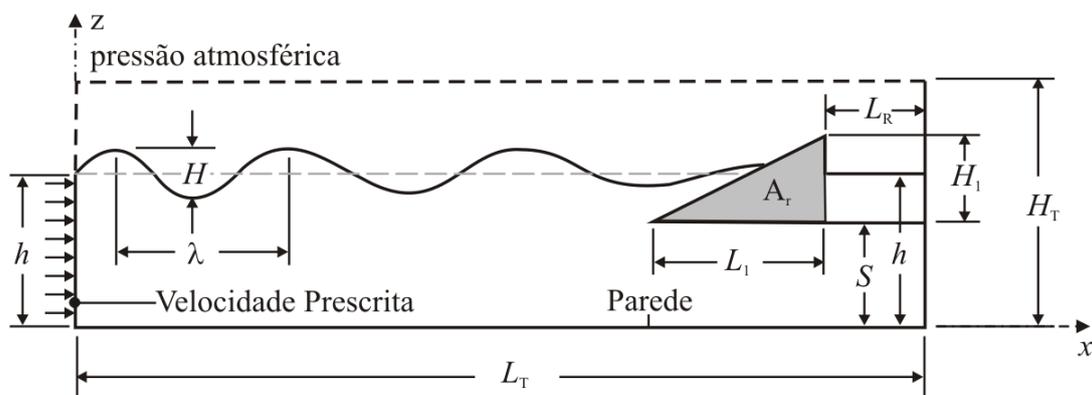


Figura 1.13 – Dispositivo de galgamento em escala real com dois graus de liberdades (Goulart *et al.*, 2015)

Existem ainda diversos recentes estudos, tanto experimentais como numéricos, sobre o galgamento em quebra-mares, entre eles pode-se citar: Tonelli e Petti (2013), Quang e Van (2014), Orszaghova *et al.* (2014), Capel (2015), LING *et al.* (2015), Moghim *et al.* (2015), Romano (2015), Hu *et al.* (2015), Doorslaer *et al.* (2015), Pan *et al.* (2015), Wu (2015). Por uma questão de simplicidade e por não estarem relacionados a conversão de energia das ondas os mesmos não serão detalhados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos gerais

No presente trabalho tem-se como objetivo estudar numericamente a geometria da rampa em forma triangular de um dispositivo de galgamento utilizando o método Design Construtal para avaliação geométrica e o método por Busca Exaustiva para otimização. Assim, é avaliada a

influência de diferentes frações de área da rampa, parâmetros de ondas monocromáticas e diferentes profundidades do dispositivo com relação ao fundo do tanque que conduzem ao melhor desempenho fluidodinâmico de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real.

O problema proposto possui dois graus de liberdade (razão entre altura e comprimento da rampa e a submersão) e duas restrições geométricas (área ocupada pela rampa do dispositivo (A_r) e a área do tanque de ondas simulado (A_T)). Vale destacar ainda que o presente trabalho realiza-se uma espécie de continuidade do trabalho de Goulart (2014), onde foi avaliada a influência da geometria da rampa para diferentes profundidades sobre a massa de água galgada no dispositivo, mantendo-se constantes a área de construção da rampa (ϕ) e os parâmetros de uma onda monocromática.

1.3.2 Objetivos específicos

No presente estudo se tem os seguintes objetivos específicos:

- avaliar a influência da razão H_1/L_1 (altura sobre comprimento da rampa) para um dispositivo *onshore* em escala real com uma rampa contínua sobre a potência disponível através do Design Construtal e a Busca Exaustiva;
- avaliar a influência da submersão (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada para diferentes frações de área da rampa (ϕ) e parâmetros de uma onda monocromática;
- avaliar a influência da submersão (S) sobre a geometria da rampa uma vez otimizada, $(H_1/L_1)_o$ para diferentes frações de área da rampa (ϕ) e parâmetros de uma onda monocromática;
- avaliar a influência da fração de área da rampa (ϕ) sobre a potência disponível duas vezes maximizada ($P_{d,mm}$);
- avaliar a influência da fração de área da rampa (ϕ) sobre a razão (H_1/L_1) duas vezes otimizada, $(H_1/L_1)_{oo}$ e da submersão S uma vez otimizada, $(S)_o$;
- avaliar a influência de duas diferentes ondas monocromáticas na potência disponível duas vezes maximizada ($P_{d,mm}$);
- avaliar a influência de duas diferentes ondas monocromáticas e da geometria da rampa sobre a potência disponível.

1.3.3 Organização do texto

A disposição do texto é estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução

O capítulo inicial é de introdução, onde é apresentada a motivação do trabalho, além de uma descrição sobre o atual estado do estado-da-arte sobre as tecnologias de aproveitamento da energia das ondas do mar, com foco nos dispositivos de galgamento e, por fim, os objetivos do presente trabalho e a sua organização.

Capítulo 2: Fundamentos de Conversão de Energia das Ondas

Neste capítulo é apresentado o potencial das ondas do mar em gerar energia, além de uma breve classificação dos equipamentos conversores de energia das ondas. Segue-se uma revisão bibliográfica sobre teoria de ondas oceânicas, começando por uma introdução à teoria das ondas, indicando os elementos de uma onda, e, finalmente, mostrando a teoria de Stokes de 2ª Ordem, empregada neste trabalho.

Capítulo 3: Fundamentos do Design Construtal

No capítulo 3 é exposta uma fundamentação teórica encontrada na bibliografia sobre o método Design Construtal. Em seguida são apresentadas algumas aplicações do método Design Construtal em problemas de engenharia de uma forma geral.

Além disso, mostra-se a definição do método de otimização por busca exaustiva e um exemplo de aplicação de tal método em um problema de engenharia.

Capítulo 4: Modelagem Matemática

Neste capítulo é apresentada a modelagem matemática empregada para modelar o fenômeno físico em análise e a aplicação do Design Construtal no dispositivo de galgamento, além do processo de otimização adotado pela Busca Exaustiva. São especificados os parâmetros empregados e as restrições impostas para a otimização do dispositivo. São apresentados, ainda, a descrição do domínio computacional do tanque de ondas e as respectivas condições de contorno impostas ao problema, bem como o modelo Multifásico *Volume of Fluid* (VOF) utilizado para a abordagem do escoamento bifásico de água e ar, além da interação desse fluido com a rampa do dispositivo. Por fim, são apresentadas as equações impostas para a geração das ondas.

Capítulo 5: Modelagem Numérica e Procedimentos Numéricos

São apresentados, de forma sucinta, aspectos relacionados à modelagem numérica das equações de conservação de massa e quantidade de movimento empregando o Método de Volumes Finitos (MVF). Também são apresentados os procedimentos numéricos empregados para as simulações numéricas realizadas. Entre outros itens uma verificação da superfície livre obtida com o modelo numérico empregado e o tipo de malha gerada para o domínio do problema, bem como seu estudo de independência de malha.

Capítulo 6: Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados referentes à otimização geométrica através da Busca Exaustiva do dispositivo de galgamento e avaliação geométrica utilizando o Design Construtal. Foram analisados dois graus de liberdade: a relação H_1/L_1 (relação entre a altura e o comprimento da rampa) e S (profundidade de submersão do dispositivo), além de diferentes razões de área (ϕ) e ondas monocromáticas.

Capítulo 7: Conclusões

São expostas as conclusões referentes ao estudo numérico da geometria de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real empregando Design Construtal e a Busca Exaustiva, além das contribuições desta pesquisa.

Capítulo 8: Referências Bibliográficas

Para finalizar, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

2. FUNDAMENTOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

2.1 Potencial de Energia das Ondas

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2008), uma das variáveis para definir o grau de desenvolvimento de um país, é a facilidade com que a população tem acesso aos serviços de infraestrutura, saneamento básico, transportes, telecomunicações e energia. Desta forma, investimentos no setor energético são de grande importância para o desenvolvimento de um país. Assim, devido ao crescimento da demanda de energia elétrica mundial, investimento no setor energético renovável tem aumentado significativamente.

Investimentos em novas formas de obtenção de energia levaram o homem a procurar novas fontes de geração. Com relação ao potencial energético disponível nos oceanos, pesquisas realizadas nas últimas décadas revelaram valores significativos disponíveis, com vantagens aos demais processos já existentes, como por exemplo, baixo impacto social e ambiental. Estima-se que o potencial energético dos mares disponível, principalmente em regiões costeiras, em escala global, esteja em torno de 2 TW tornando-se um campo importante para exploração (Cruz e Sarmento, 2004).

Ainda de acordo com Cruz e Sarmento (2004), a energia contida nos oceanos pode ter origens diferentes, o que gera diferentes classificações. As mais relevantes são: a energia das marés, fruto da interação dos campos gravitacionais da lua e do sol; a energia térmica dos oceanos, consequência direta da radiação solar incidente; a energia das correntes marítimas, cuja origem está nos gradientes de temperatura e salinidade e na ação das marés; e, finalmente, a energia das ondas, que resulta do efeito do vento na superfície do oceano. Esta última forma de energia pode ser considerada uma forma concentrada da energia solar, pois é esta que, pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, é responsável pelos ventos.

Segundo Dean e Dalrymple (1991), a energia total em uma onda é a combinação da energia potencial, devido ao deslocamento vertical da superfície da água, com a energia cinética, devido ao movimento oscilatório da onda. Uma vez criadas, as ondas podem viajar milhares de quilômetros no alto mar praticamente sem perdas de energia. Em regiões costeiras a densidade de energia presente nas ondas diminui devido à interação com o fundo do mar. A potência de uma onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude e ao seu

período. Ondas de elevada amplitude (cerca de 2 m) e de período elevado (7 a 10 s) excedem normalmente os 50 kW/m de frente de onda.

Portanto, nas últimas décadas os oceanos têm se tornado foco de estudos aprofundados sobre suas características e influências geográficas nas várias regiões do globo, com a finalidade de transformar a energia disponível nas correntes, marés e ondas, em energia elétrica disponível para o consumo (Falcão, 2010). Porém, as condições adversas do mar quanto à instalação e manutenção de dispositivos mostraram que a tarefa de converter essa energia abundante em energia elétrica não seria simples ou pelo menos similar as tecnologias já existentes como, por exemplo, uma hidroelétrica em uma região continental.

Além disso, é possível verificar que não existe uma forma, tecnologia ou dispositivo que se destaque como adequado para todos os fins e aplicações para todas as regiões do planeta (Falcão, 2010). Em uma simples análise da Fig 2.1 é possível perceber que nem mesmo o potencial das ondas em kW/m de frente de onda é uniforme em todas as regiões do mundo, apresentando valores mais significativos em regiões mais afastadas do equador. Contudo, na linha do equador, os fenômenos de marés são os mais intensos. Portanto, devem-se desenvolver equipamentos adequados para cada caso, a fim de obter, do fenômeno físico relacionado, a melhor eficiência energética (Zhang *et al.*, 2009).

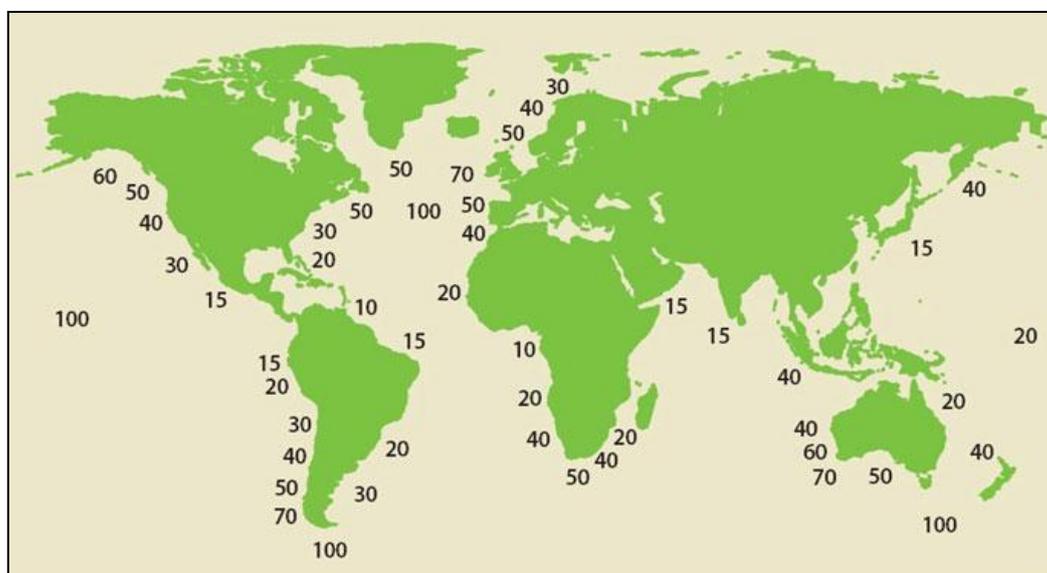


Figura 2.1 – Potencial de energia das ondas ao redor do mundo (Ghosh e Prells, 2011).

2.2 Classificação dos Equipamentos

Segundo Paredes (2008), os equipamentos de conversão de energia das ondas são classificados conforme sua forma construtiva, princípios de funcionamento e aplicação. Entretanto, embora o termo oceano forneça a ideia de mar aberto ou alto mar, regiões costeiras e linhas litorâneas de praia ou quebra mar são contempladas nas pesquisas desenvolvidas no tema.

Assim, a classificação é definida de acordo com a profundidade oceânica em que é aplicado o referido equipamento, podendo ser (Cruz e Sarmiento, 2004):

- dispositivos costeiros (*onshore* ou *shoreline*);
- dispositivos próximos da costa (*nearshore*);
- dispositivos afastados da costa (*offshore*).

A classificação de acordo com a localização do dispositivo com relação à costa é ilustrado na Fig. 2.2.

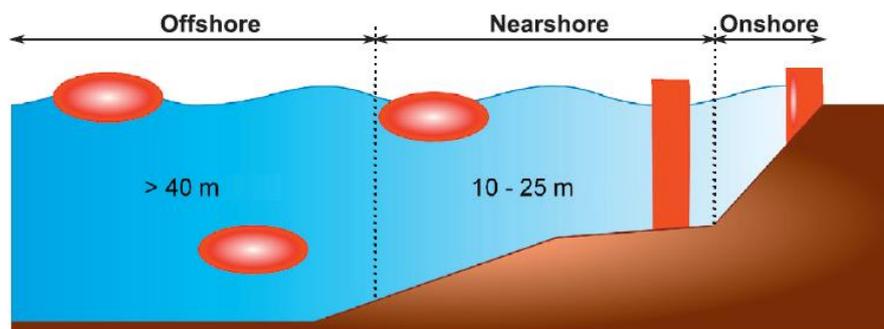


Figura 2.2 – Localização dos dispositivos conversores de energia das ondas (López *et al.*, 2013).

Os dispositivos costeiros (*onshore* ou *shoreline*) possuem acesso por terra, são chamados de primeira geração. Esses dispositivos permitem fácil acesso para construção, instalação e manutenção, além de poderem estar junto aos centros consumidores, permitindo uma fácil distribuição da energia gerada. Além disso, a obtenção da energia se dá através da ação das ondas ou dos efeitos de marés (Paredes, 2008).

Ainda segundo Paredes (2008), os dispositivos próximos da costa (*nearshore*), ou de segunda geração, aproveitam algumas vantagens das instalações sobre a costa, como a distância razoável para transporte e distribuição da energia produzida, estando localizadas em

uma região de maior potencial de ondas. Em função de sua distância em relação à costa, ainda apresentam alguns problemas com relação a impactos ambientais.

Já os dispositivos em alto mar (*offshore*), ou de terceira geração, aproveitam os altos potenciais de energia presente nas ondas em mar aberto. Contudo, apresentam dificuldades de acesso para instalação e manutenção, além da grande distância para transporte da energia gerada. Também podem apresentar problemas relativos à ancoragem e interferência com rotas de navegação (Paredes, 2008).

Segundo Cruz e Sarmento (2004), outra classificação possível está associada ao princípio de conversão de energia das ondas em energia elétrica, isto é, ao tipo de dispositivo. Assim, existem fundamentalmente três classes principais de conversores de energia das ondas, que são:

- Coluna d'Água Oscilante (*Oscillating Water Column - OWC*);
- Corpos Flutuantes (*Oscillating Devices*);
- Galgamento (*Overtopping devices*).

A Figura 2.3 apresenta a classificação de conversores de energia das ondas conforme princípio de funcionamento.

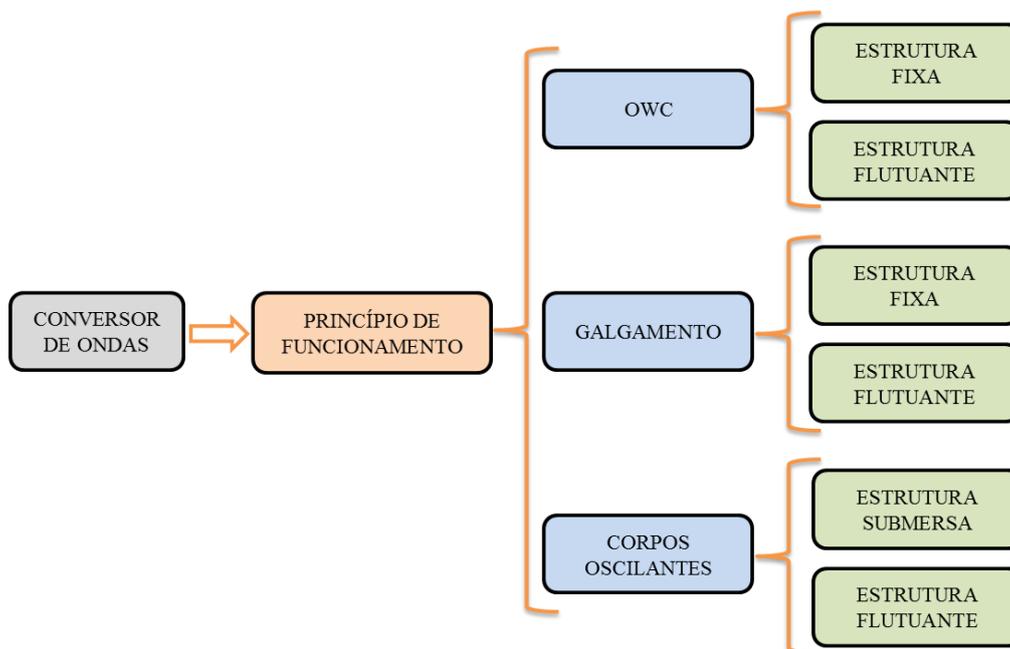


Figura 2.3 – Tecnologias de conversores de energia das ondas (Adaptado de Fadaeenejad *et al.*, 2014).

2.2.1 Dispositivo de Galgamento

Seu princípio de funcionamento baseia-se na acumulação de água em um reservatório sobrelevado em relação ao nível médio da superfície livre do mar. São tecnologias flutuantes ou fixas, para aplicação, respectivamente, em alto mar ou na costa. A água acumulada é devolvida ao mar através de turbinas hidráulicas de baixa queda (do tipo Kaplan) que acionam geradores elétricos de fabricação comum. A acumulação da água no reservatório sobrelevado é produzida através do galgamento da onda sobre uma rampa inclinada (WAVEC, 2004).

Alguns protótipos têm sido apresentados na literatura. Entre os dispositivos que foram construídos em escala real é possível citar: *Tapchan* (Pereira, 2010), *Wave Dragon* (Kofoed *et al.*, 2006), *Wave Plane* (López *et al.*, 2013) e o *Sea Wave Slot Cone Generator* (SSG) (Margheritini *et al.*, 2009). Estes equipamentos podem ser vistos, respectivamente, nas Figs. 2.4 – 2.7 apresentadas a seguir:

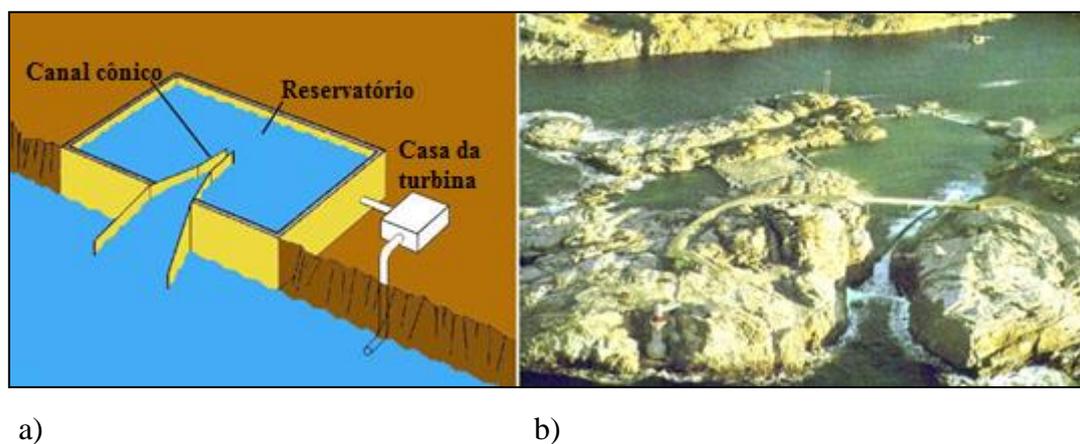


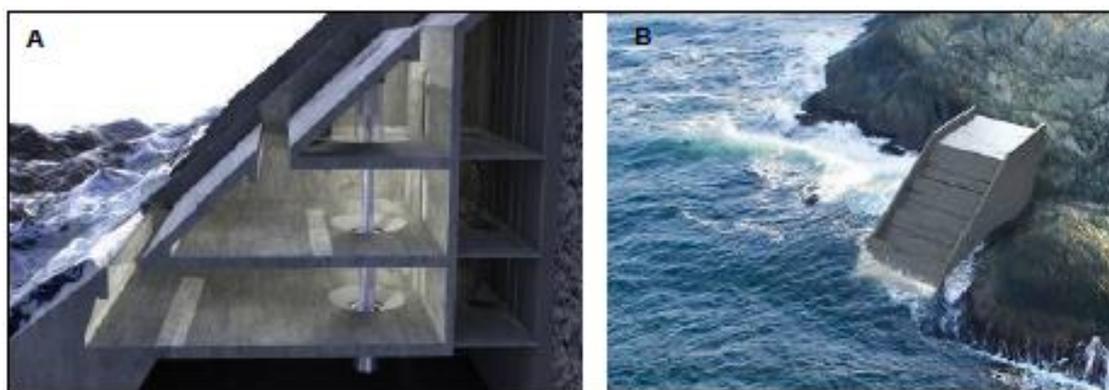
Figura 2.4 – Dispositivo *Tapchan*: a) Ilustração do esquema de funcionamento, b) imagem real do equipamento (Pereira, 2010).



Figura 2.5 – *Wave Dragon* (Kofoed *et al.*, 2006).



Figura 2.6 – Wave Plane (López *et al.*, 2013).



a)

b)

Figura 2.7 – SSG: a) Vista lateral, b) Ilustração da instalação do dispositivo (Margheritini *et al.*, 2009).

2.2.2 Corpo Oscilante

Podem ser de absorção pontual (*Point Absorbers*) ou progressivos (*Surging devices*). O projeto básico destes equipamentos envolve um corpo flutuante (Fig. 2.8) ou totalmente submerso em que as características hidrodinâmicas e de massa são definidas para o corpo de modo a entrar em ressonância com as ondas, sendo que a sua capacidade de extração de energia depende da sua dimensão. Alguns sistemas exploram os regimes de maior densidade energética localizados mais longe da costa. Estes dispositivos acarretam um desafio tecnológico mais elevado. O seu desenvolvimento enfrenta obstáculos como o acesso à

manutenção dos dispositivos, transferência para terra da energia elétrica produzida e sistemas de ancoragem (André, 2010; Falcão, 2010; Bahaj, 2011).



Figura 2.8 – Pelamis (Bahaj, 2011)

2.2.3 Coluna de Água Oscilante (CAO)

O dispositivo é apresentado sob a forma de uma estrutura parcialmente submersa, em que a passagem das ondas provoca, respectivamente, um aumento e uma diminuição do nível da água em seu interior. Consequentemente, há uma compressão e uma descompressão do ar que se encontra dentro desse compartimento. Esse ar passa por uma turbina que aciona um gerador, produzindo a eletricidade. Em relação à turbina, é recomendável que a mesma possua a propriedade de manter o sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento, como é o caso das turbinas do tipo *Wells* (Falcão, 2010).

A Figura 2.9 apresenta um esquema do princípio de funcionamento deste dispositivo. Quando a onda incidente atinge o equipamento, ocorre um aumento da superfície livre e aumento de pressão na câmara, Fig. 2.9, e no ciclo de descida da superfície livre na câmara há uma diminuição de pressão na câmara e o sentido do escoamento de ar na turbina se inverte.

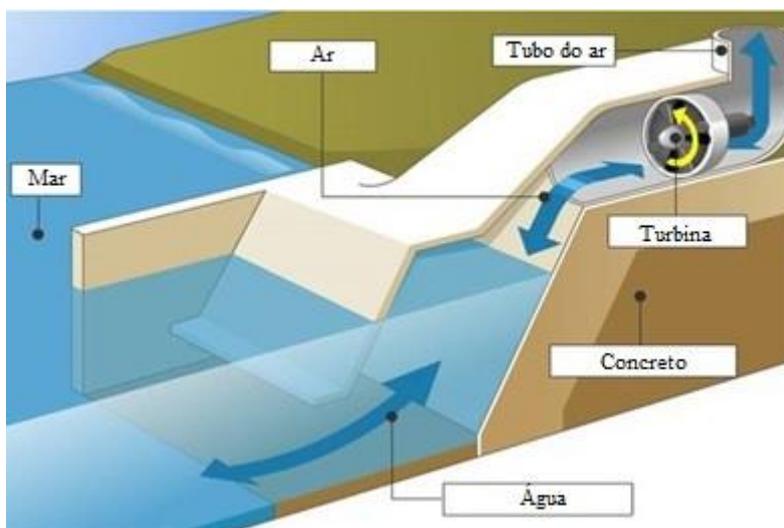


Figura 2.9 – Esquema de funcionamento de um sistema CAO (Adaptado do Grupo de Investigação Reconhecimento - GIR, 2011)

2.3 Teoria das Ondas

2.3.1 A Formação das Ondas

De acordo com McCormick (1973), quando um objeto é largado num tanque de água, um distúrbio é criado e então uma onda de superfície é formada. Os movimentos subsequentes na superfície são resultado da ação da gravidade fazendo com que a água retorne a sua posição sem distúrbio. Uma vez que estas ondas são resultado da gravidade elas são chamadas de ondas de gravidade. Segundo Dean e Dalrymple (1991), outro fator que pode causar um distúrbio na superfície livre é a ação dos ventos. Além disso, as ondas podem ocorrer de todos os tamanhos e formas, dependendo da magnitude das forças que agem sobre a água.

Portanto, a formação dos ventos se dá devido ao ar próximo das superfícies aquecidas expandirem com maior rapidez, de forma contrária ao que acontece com o ar que está próximo das superfícies em resfriamento. Formam-se, assim, zonas de baixas e de altas pressões, forçando o ar a se movimentar de uma local para outro, compensando diferenças ou desequilíbrios de pressão. Esse movimento ocorre das zonas de altas pressões para as zonas de baixas pressões, ao nível do solo, ocorrendo o movimento contrário nas camadas mais altas da atmosfera. A influência dos ventos sobre os oceanos permite com que a energia dos ventos

seja transmitida para a superfície da água formando as ondas (Dean e Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005).

Além disso, os mecanismos de transferência de energia do vento para as ondas são complexos. O ar que escoa sobre a superfície do mar transfere energia através da atuação das tensões cisalhantes, resultando na formação e crescimento das ondas. O escoamento turbulento do ar, próximo à superfície livre, gera uma intensa variação das tensões cisalhantes e do campo de pressões. Se estas oscilações entram em fase com as ondas já existentes ocorre uma intensificação no processo de geração das ondas e quando as ondas atingem um determinado tamanho, o vento pode exercer uma ação mais intensa na sua face, acarretando um crescimento ainda maior (Dean e Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005).

Assim, as ondas oceânicas são formadas pela superposição de diferentes ondas, justificando o seu comportamento aleatório e de difícil representação matemática. Porém, grandes ondas em uma série de ondas aleatórias podem ser determinadas na forma de ondas regulares, podendo então ser descritas através de teorias determinísticas (Chakrabarti, 2005).

A quantidade de energia transferida e a altura das ondas geradas pelo vento dependem não só da intensidade do vento, mas da dimensão da zona onde esse atua, que se designa por *fetch* ou comprimento de geração. Em cada uma destas etapas ocorre concentração de energia de modo que níveis de potência solar da ordem de 100W/m podem eventualmente se transformar em ondas com níveis de potência acima de 1000W/m (Thorpe, 1999).

De acordo com Gonçalves (2003), a superfície do mar apresenta-se bastante irregular devido a variação do vento na zona de geração das ondas ocasionadas por flutuações de pressão e tensões tangenciais provocadas pela ação do vento, formando assim ondas de diferentes comprimentos e direções. A agitação gerada, dessa forma, denomina-se vaga (*windsea*). As ondas que se propagam para fora da zona de geração recebem a denominação genérica de ondulação (*swell*).

De uma forma geral, as teorias de ondas são descritas relacionando-se três parâmetros básicos: a altura de onda H , o comprimento de onda λ e a profundidade h da lâmina d'água. Os demais parâmetros, como os campos de pressão, de velocidades e de acelerações das partículas do fluido são obtidos analiticamente em função destas quantidades básicas, fazendo-se uso das teorias disponíveis na literatura. Na abordagem do problema em questão, emprega-se a teoria de Stokes de 2ª ordem (Chakrabarti, 2005).

Para este trabalho, foram adotados parâmetros pré estabelecidos baseados nas características de ondas da região sul do estado do Rio Grande do Sul conforme estudos

realizados por Coli (2000). Desta forma, os períodos de ondas utilizados foram $T = 5,0$ s e $T = 7,5$ s e comprimentos de onda $\lambda = 36,6$ m e $\lambda = 65,4$ m. Foi considerado, também, uma altura de onda constante $H = 1$ m e profundidade de lâmina de água h de 10 m. A Figura 2.10 mostra a energia contida em uma onda oceânica de acordo com seu tipo, onde observa-se que as ondas de gravidade (compreendidas entre os períodos T de 1 a 30 segundos) são aquelas que apresentam maior energia (Dean e Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 2005).

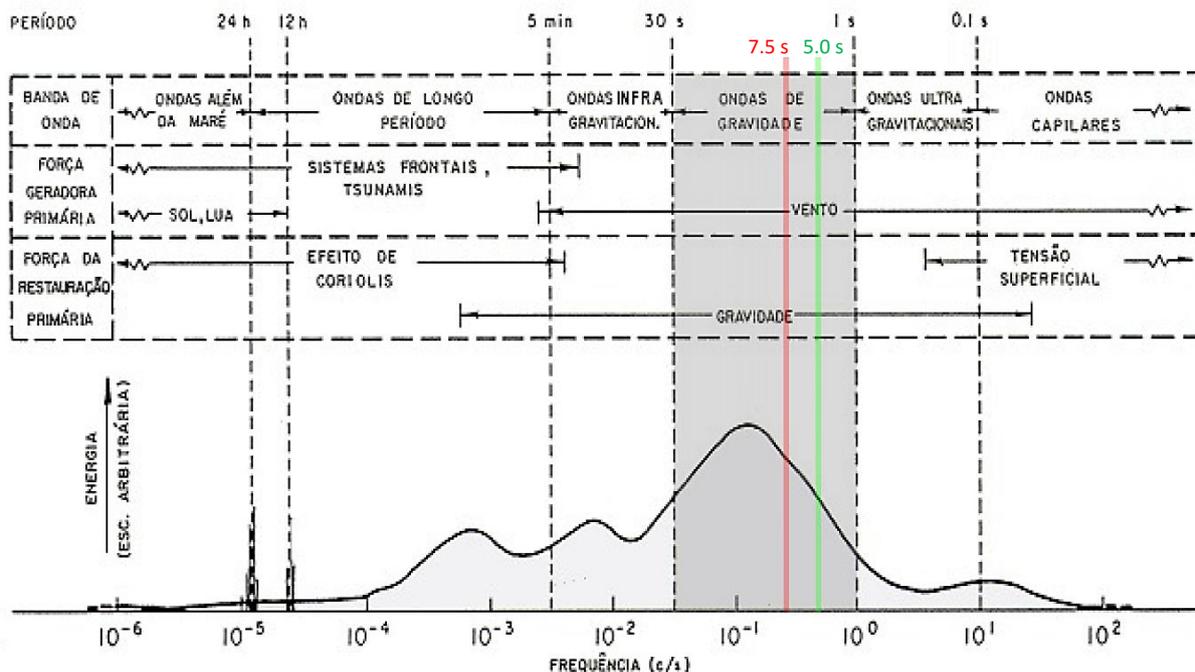


Figura 2.10 – Representação Esquemática da Energia Contida em Ondas Oceânicas Conforme Seu Tipo (Adaptado de Alfredini, 2000).

Conforme Gomes (2010), os modelos para descrição do comportamento de ondas podem ser classificados de acordo com teorias de ondas regulares e irregulares. Classificação essa também conhecida como ondas determinísticas e aleatórias. A teoria de ondas regulares admite ondas com comportamento bem definido e constante em cada período de tempo ou espaço, diferentemente do que ocorre com as ondas irregulares. Nesses modelos, as ondas são formadas pela soma de pequenas ondas regulares com altura e período diferentes. Entre os modelos existentes, os de ondas irregulares são os que melhor representam o real estado do mar nos ambientes oceânicos. Porém, ao longo deste trabalho utilizam-se as ondas regulares para o estudo numérico com a finalidade de determinar a melhor forma geométrica da rampa do dispositivo galgamento. Na Figura 2.11, é possível

observar as principais características das ondas regulares bem como os elementos básicos de uma onda oceânica.

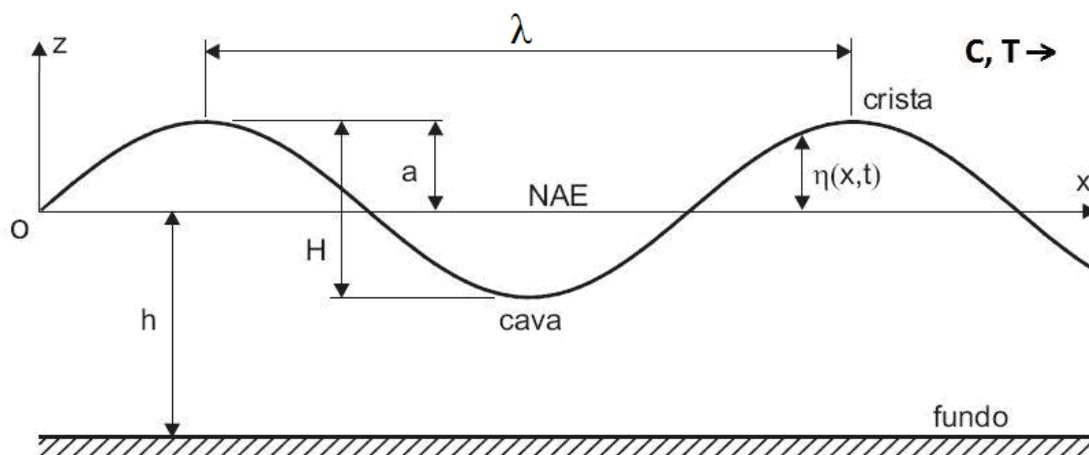


Figura 2.11 – Elementos da Onda (Carneiro, 2007).

Desta forma, os principais elementos da onda descritos na Fig. 2.11, conforme o modelo para descrição do comportamento de onda teórica regular, são:

- NAE: Nível de água estático (ou nível médio).
- Crista: é o ponto mais alto atingido pela superfície livre da água (elevação) comparado com o plano do nível médio da água.
- Cava: é o ponto mais baixo atingido pela superfície livre da água comparado com o plano do nível médio da água.
- Profundidade (h): é a distância do fundo do mar até o nível médio da água (superfície livre).
- Período (T): é o tempo de uma oscilação completa, ou ainda, o tempo necessário para que um ponto qualquer da onda percorra uma distância igual ao comprimento de onda.
- Frequência (σ): é o número de oscilações que ocorrem na unidade de tempo.

- Amplitude (a): é a distância entre a crista e a superfície livre (nível da água) ou a distância entre a cava e a superfície livre da água.
- Comprimento de Onda (λ): é a distância entre duas cristas consecutivas ou duas cavas consecutivas.
- Celeridade (C): representa a velocidade de propagação da onda.
- Altura (H): é a distância entre as cristas e as cavas sucessivas.
- Elevação da Superfície Livre (η): representa a distância instantânea da superfície livre ao plano médio do nível da água.

Na literatura são encontradas diversas teorias de ondas já desenvolvidas, as quais podem ser aplicadas para diferentes casos, levando-se em consideração as condições ambientais. Os principais aspectos que devem ser levados em consideração para a determinação da teoria a ser aplicada são a altura de onda H , o comprimento da onda λ e a profundidade da água h . Esses fatores são comumente compostos nos seguintes parâmetros adimensionais:

$$\text{Declividade} \left(\frac{H}{\lambda} \right)$$

$$\text{Profundidade relativa} \left(\frac{h}{\lambda} \right)$$

$$\text{Altura de onda relativa} \left(\frac{H}{h} \right)$$

$$\text{Número de Ursell } U_R = \left(\frac{\lambda^2 H}{h^3} \right)$$

A teoria de ondas mais simples é a teoria linear de ondas, também conhecida como teoria de Airy. Essa teoria é mais indicada quando a declividade, a profundidade relativa e a altura de onda relativa são pequenas, ou seja, ondas de pequena amplitude e pequeno comprimento em grandes profundidades. Porém, segundo Gomes (2010), teorias não lineares resultam em uma representação mais próxima das ondas reais, possibilitando a análise de ondas mais altas em profundidades mais rasas.

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

Conforme Dean e Dalrymple (1991), as abordagens de teoria de ondas são Airy, Stokes, Cnoidal e Solitária. A forma da superfície livre da onda para cada uma dessas teorias é ilustrada na Fig. 2.12.

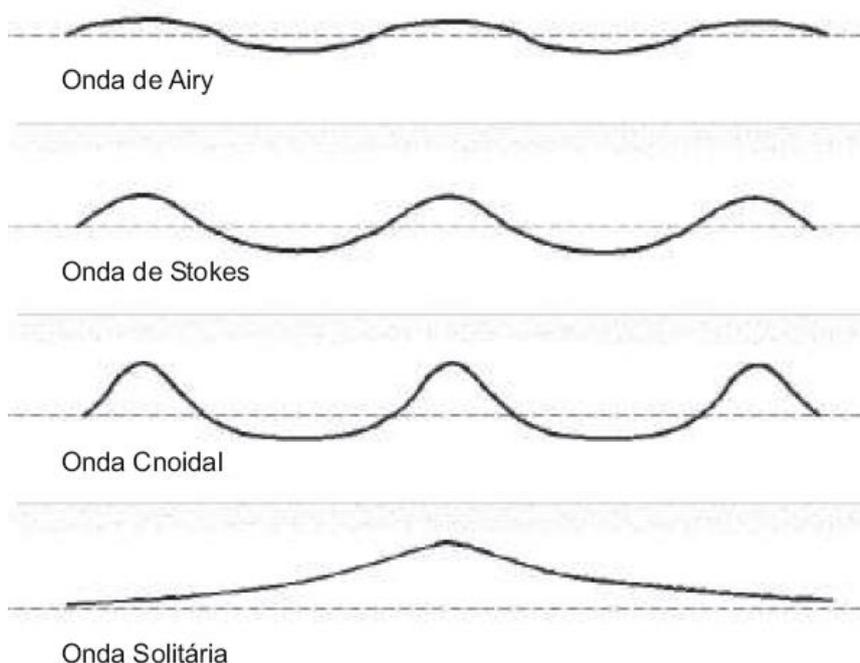


Figura 2.12 – Teoria das ondas (Carneiro, 2007).

Ainda segundo Dean e Dalrymple (1991), a solução de Stokes é válida quando $k.h < 1$ e $H / \lambda \leq 1$, sendo $k = 2\pi/\lambda$ o número de onda. Em termos do número de Ursell o limite de aplicação é $U_R < 26$. Quanto à profundidade, $h/\lambda > 0,5$ caracteriza águas profundas.

Na Fig. 2.13 é possível comparar o formato dos tipos de ondas de gravidade, conforme número de Ursell. Conhecendo-se os parâmetros h , H , T e g (gravidade) e com a ajuda do gráfico apresentado na Fig. 2.10 pode-se selecionar qual teoria de ondas é a mais recomendada. Nos trabalhos de âmbito numérico, as equações dos campos de velocidades definidas por cada teoria de ondas são empregadas como condições de contorno nos tanques numéricos para simular o efeito de um gerador de ondas, simulando o efeito do escoamento no mar.

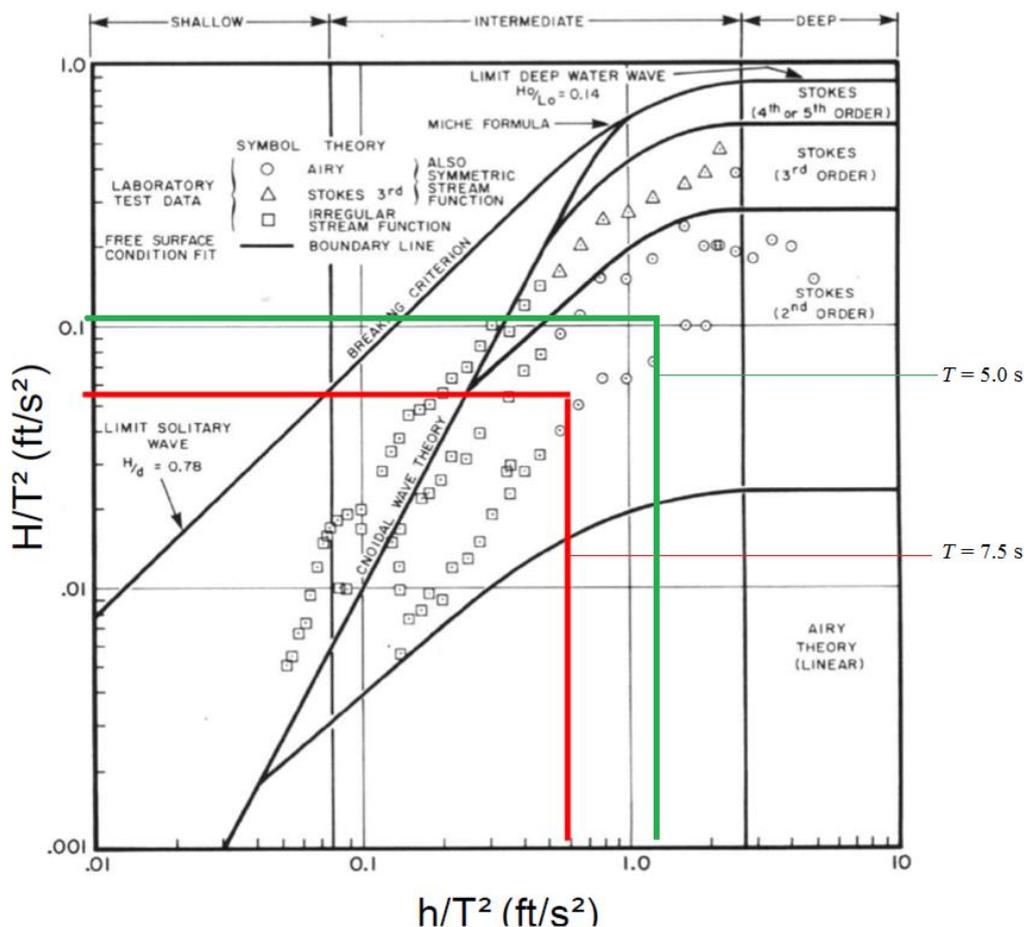


Figura 2.13 – Aplicabilidade das teorias de ondas (Chakrabarti, 2005).

Considerando as características da onda empregada nesse trabalho ($T = 5,0$ s e $7,5$ s, $\lambda = 36,6$ m e $65,4$ m, $H = 1,0$ m e $h = 10,0$ m) as mesmas possuem uma melhor descrição através da Teoria de Stokes de 2ª ordem.

2.4 Teoria de Stokes de 2ª Ordem

Conforme Gomes (2010), Stokes, em 1880, desenvolveu um método de alta ordem para análise de ondas de alturas finitas. Esta teoria consiste basicamente em assumir que as propriedades do movimento de onda, tais como o potencial de velocidades, podem ser representadas por uma série de pequenas perturbações. Portanto, quanto maior o número de termos incluídos na série, melhor será a aproximação das propriedades da onda.

Portanto, no presente estudo a teoria de Stokes de 2ª ordem foi empregada, pois assim é possível obter uma representação mais próxima das ondas reais, permitindo a análise de ondas mais altas em profundidades mais rasas. A teoria de Stokes se aplica para alturas de ondas maiores em águas relativamente profundas. A partir da teoria de segunda ordem, componentes harmônicas, isto é, componentes de frequências maiores em 2, 3,... n vezes a frequência fundamental, o que acarreta em cristas mais altas e cavas mais achatadas (Carneiro, 2007).

Para esta teoria, as expressões do potencial de velocidades e do deslocamento da superfície livre são dadas, respectivamente, por (Chakrabarti, 2005):

$$\phi = -\frac{Hg}{2\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(kx - \sigma t) - \frac{3H^2\sigma}{32} \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \sin 2(kx - \sigma t) \quad (2.1)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{H^2k}{16} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3 kh} (2 + \cosh 2(kh)) \cos 2(kx - \sigma t) \quad (2.2)$$

Após a derivação da Eq. (2.17) em relação a x e z , são encontrados os respectivos componentes da velocidade (Chakrabarti, 2005):

$$u(x, z) = \frac{Hgk}{2\sigma} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3H^2\sigma k}{16} \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \sigma t) \quad (2.3)$$

$$w(x, z) = \frac{Hgk}{2\sigma} \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t) + \frac{3H^2\sigma k}{16} \frac{\sinh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \sigma t) \quad (2.4)$$

Onde, H (m) é a altura da onda, g (m.s^{-2}) gravidade, k (m^{-1}) número de onda, σ (rad.s^{-1}) frequência angular da onda, t (s) tempo, h (m) profundidade, η (m) elevação da superfície da água, ϕ ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) potencial de velocidade, x coordenada horizontal, z coordenada vertical, u (m.s^{-1}) velocidade horizontal e w (m.s^{-1}) velocidade vertical.

3. FUNDAMENTOS DO DESIGN CONSTRUTAL

3.1 Fundamentação Teórica

Adrian Bejan (1997) iniciou em meados da década de 90 estudos sobre uma teoria que descreve que os sistemas de escoamento da natureza seguem um princípio físico para a geração de suas configurações e padrões geométricos. Surgiu, assim, a Teoria Construtal.

A Teoria Construtal segundo Bejan e Lorente (2008), explica como a geração de estruturas submetidas a alguma espécie de escoamento contínuo que são vistas em qualquer lugar na natureza (seção transversal de rios, pulmões, movimentação de massas na atmosfera, tecidos vascularizados, entre outros) podem ser fundamentadas através de um princípio do acesso aos escoamentos no decorrer do tempo. O princípio físico que conduz a formação determinística da forma e estrutura em sistemas de escoamento é denominado de Lei Construtal, que afirma que para um determinado sistema finito persistir ao longo do tempo (sobreviver) sua configuração geométrica deve evoluir de forma a facilitar o acesso das correntes que fluem através deste sistema.

Segundo a Lei Construtal um sistema vivo possui duas características universais: ele flui (é um sistema em desequilíbrio termodinâmico) e se transforma livremente para configurações que permitem que todas as suas correntes escoem mais facilmente ao longo do tempo. A vida e a evolução são fenômenos físicos e pertencem à física (Bejan, 2000; Basak, 2011).

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

Conforme Bejan (2000), o Design Construtal é um método empregado na avaliação de formas geométricas de sistemas submetidos a alguma espécie de escoamento aplicado. Para isto, neste método, o escoamento é maleável e a geometria é obtida a partir de um princípio de maximização do desempenho. Além disso, a geometria deve ser submetida a restrições globais e variada de acordo com seus graus de liberdade. Para aplicar o Design Construtal no estudo geométrico de um sistema físico é necessário, basicamente, determinar um objetivo final (uma grandeza a ser maximizada ou minimizada: vazão mássica, potência,

energia e etc.), graus de liberdade (parâmetros geométricos cujos efeitos na função objetivo serão estudados) e restrições geométricas (parâmetros que são mantidos constantes).

3.2 Principais Aplicações na Literatura

Nesta seção são apresentadas algumas das aplicações do Design Construtal na avaliação geométrica de diversos tipos de problemas. Alguns exemplos são vistos na transferência de calor, mecânica dos sólidos e energia das ondas.

Como exemplo de aplicação do Design Construtal em Transferência de Calor os estudos em cavidades e aletas têm sido amplamente realizados (Rocha *et al.*, 2005; Lorenzini *et al.*, 2011a; Lorenzini *et al.*, 2011b, Lorenzini *et al.*, 2014, Hajmohammadi *et al.*, 2014; Estrada *et al.*, 2015; Gonzales *et al.*, 2015). Para ilustrar a aplicação do Design Construtal em um problema de cavidade utiliza-se o trabalho de Rocha *et al.* (2005), o qual trata de um estudo numérico de otimização de uma geometria formada por um sólido trapezoidal com uma cavidade isotérmica retangular procurando minimizar a resistência térmica global. O sólido gera calor uniformemente a uma taxa volumétrica q''' (W/m³), sendo as superfícies externas isoladas. A corrente de calor gerada é removida pelo resfriamento da cavidade, mantida a uma temperatura constante T_{min} , considerando a temperatura do sólido sempre maior do que T_{min} . As maiores temperaturas que ocorrem no sólido são denominadas por T_{max} . Somente o efeito da condução de calor foi investigado neste trabalho. Por simplicidade, foi considerado um domínio bidimensional. A Figura 3.1 representa o domínio do sistema onde se tem o sólido trapezoidal e a cavidade com volumes constantes, porém ambos alterando o aspecto de suas formas. No primeiro nível de otimização mantiveram-se constantes a razão da forma da cavidade ($H_0/L_0 = 1$) e a fração de ocupação da cavidade ($\phi = H_0/L_0 / (H_e+H)L/2 = 0,1$). Assim, obtiveram-se razões entre a altura e a base maior do trapézio uma vez otimizadas ($(H/L)_o$) para uma faixa de valores da razão entre a base maior e a base menor (H_e/H). Portanto, as variações dos graus de liberdade do sólido para uma área constante do domínio sólido levaram a determinação da temperatura máxima uma vez minimizada ($(T_{max})_{min}$). No segundo nível de otimização foi introduzida a variação da forma da cavidade (H_0/L_0). Com este grau de liberdade se obteve $(T_{max})_{mm}$, $(H/L)_{oo}$ e $(H_e/H)_o$ para uma faixa determinada de valores de H_0/L_0 . Os resultados mostraram que a melhor performance térmica foi obtida quando a cavidade foi inserida mais profundamente no interior do sólido trapezoidal. Neste trabalho foi necessário gerar um espaço de busca envolvendo três graus de liberdade (H/L , H_e/H e H_0/L_0) e uma restrição (ϕ) para encontrar a melhor geometria.

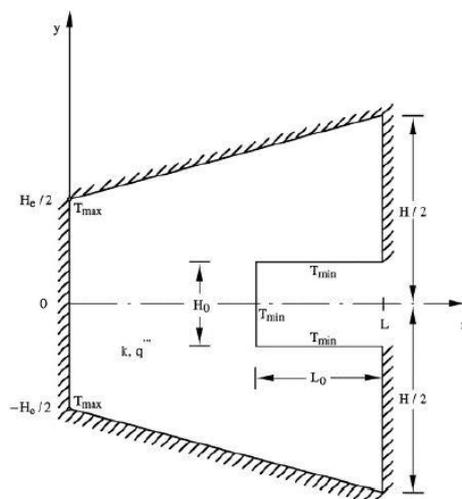


Figura 3.1 – Domínio bidimensional trapezoidal com geração de calor constante (Rocha *et al.*, 2005).

No âmbito da Mecânica dos Sólidos, destaca-se o trabalho de Da Silva *et al.* (2015), no qual foi realizado um estudo numérico sobre otimização geométrica, com a finalidade de minimizar a flexão de uma placa de material isotrópico e compósito com perfurações elípticas centralizadas submetida a um carregamento transversal uniformemente distribuído. Além disso, foram considerados diferentes tipos de vinculação para a placa. As dimensões da placa foram: largura $L = 200$ mm, altura $H = 100$ mm e espessura $t = 1$ mm. Foram utilizados dois tipos de materiais compósitos para as placas em estudo: Fibra de Vidro/Epóxi e Boro/Alumínio, além de um terceiro material, de características isotrópicas. O módulo de carregamento perpendicular e uniformemente distribuído em toda a área da placa foi igual a 1 Pa. Para analisar as várias formas possíveis para o furo elíptico foi adotado o grau de liberdade H_0/L_0 , assim a variação do furo elipsoidal se deu para $H_0/L_0 < 1$, Fig. 3.2 (a), $H_0/L_0 = 1$, Fig. 3.2 (b) e $H_0/L_0 > 1$, Fig. 3.2 (c). Foi considerada também a variável ($\phi = V_0/V$), chamada de fração de volume da perfuração, que considera a relação entre o volume do furo V_0 e o volume total da placa V . Foram adotados três valores para ϕ : $\phi = 0,004$, $0,06$ e $0,25$. Os resultados mostraram para todas as condições de vinculação e frações de volume que as deflexões foram maiores para as menores relações de H_0/L_0 para todos os materiais estudados. Porém, conforme H_0/L_0 cresce, as deflexões reduzem e tendem a se estabilizar para relações de H_0/L_0 maiores. O material Isotrópico e, principalmente, o material Fibra de Vidro/Epóxi apresentaram reduções significativas das deflexões conforme o aumento da relação H_0/L_0 .

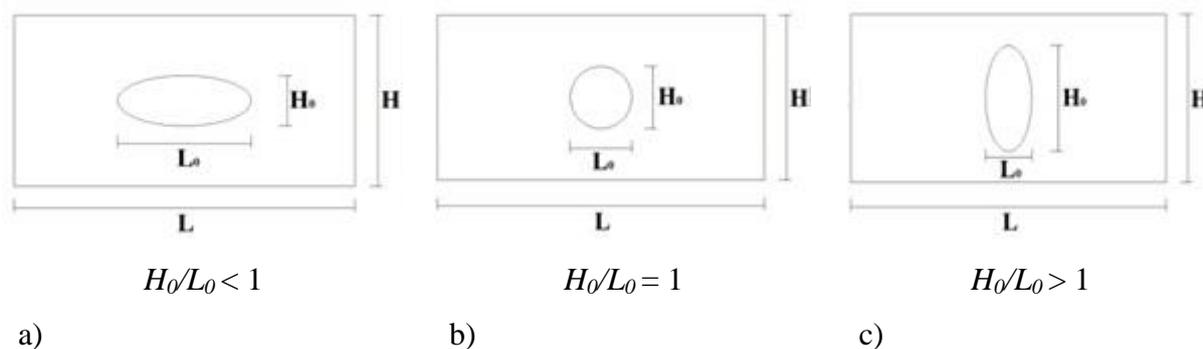


Figura 3.2 – Domínio da placa com perfuração (Da Silva *et al.*, 2015)

Em Energia das Ondas pode-se citar o trabalho de Gomes (2014), no qual foi realizado um estudo numérico de otimização geométrica bidimensional de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica. O princípio de funcionamento do dispositivo é o de Coluna de Água Oscilante (CAO), e o objetivo principal foi avaliar o efeito da variação da geometria de uma câmara CAO considerando um espectro de onda com características reais. Para isso, foram variados os seguintes graus de liberdade: H_1/L (razão entre a altura e comprimento da câmara coluna de água oscilante) e H_3 (profundidade de submersão da câmara CAO). O grau de liberdade H_2/l (razão entre a altura e o diâmetro da chaminé) é mantido constante e igual a 3. O volume de entrada da câmara do dispositivo CAO (V_E) e o volume total do dispositivo CAO (V_T) foram mantidos constantes, sendo as restrições geométricas do problema. As frações de volume foram descritas, respectivamente, por: $\phi_1 = H_1L$ e $V_T = V_E + H_2/l L_1$. A dimensão L_1 é mantida constante e igual a um, de modo que o problema é considerado bidimensional. Os resultados obtidos mostraram que é possível estabelecer uma razão de H_1/L ótima, conhecendo-se o clima de ondas, ou seja, o recomendável é que esta razão seja igual a quatro vezes a altura da onda incidente dividido pelo comprimento da onda incidente.

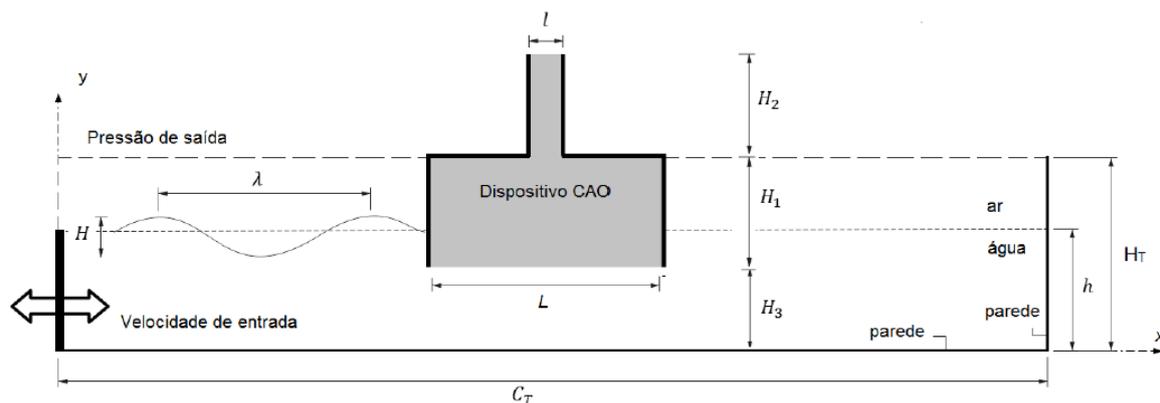


Figura 3.3 – Domínio do dispositivo CAO (Gomes, 2014).

Portanto, o Design Construtal vem sendo utilizado como uma ferramenta muito interessante para a avaliação geométrica dos mais diferentes tipos de análise. No presente estudo, o emprego do Design Construtal foi realizado em uma rampa de um dispositivo de galgamento, geometria essa muito simples comparada com outras aplicações, onde problemas com até 5 graus de liberdade tem sido estudados (principalmente em cavidades e aletas). Porém, o fenômeno físico aqui é bastante complexo e acredita-se que a avaliação de uma geometria simples para diferentes frações de área do dispositivo e diferentes períodos de ondas seja uma contribuição para o estado-da-arte do problema de galgamento e na área do Design Construtal.

3.3 Método de Otimização: Busca Exaustiva

É o método que emprega força bruta para a otimização, assim, em problemas onde se pretende testar configurações as quais dependam da combinação de valores (busca determinística) (Burke e Kendall, 2006). Desta forma, o método gera uma lista de todas as soluções possíveis do problema de uma forma sistemática, avaliando-se as soluções uma a uma, descartando soluções impossíveis, e, para um problema de otimização, garante que a melhor solução seja encontrada. A busca exaustiva é um algoritmo prático para uma série de problemas importantes, porém torna-se proibitivo para problemas complexos (Rich e Knight, 1994; Burke e Kendall, 2006).

Um exemplo de aplicação do método de otimização por busca exaustiva foi empregado no trabalho de Goulart *et al.* (2015), apresentado anteriormente. Em tal estudo, o principal objetivo foi avaliar a razão entre altura e comprimento da rampa (H_1/L_1) que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório do dispositivo para distâncias entre

o fundo do dispositivo e o fundo do tanque de $S = 5,0$ m e $S = 6,0$ m para um dispositivo de galgamento *onshore*. Assim, é realizada a busca exaustiva com a finalidade de se determinar a geometria ótima pela combinação de dois graus de liberdade: S e H_1/L_1 , de acordo com a ilustração apresentada na Fig. 3.4.

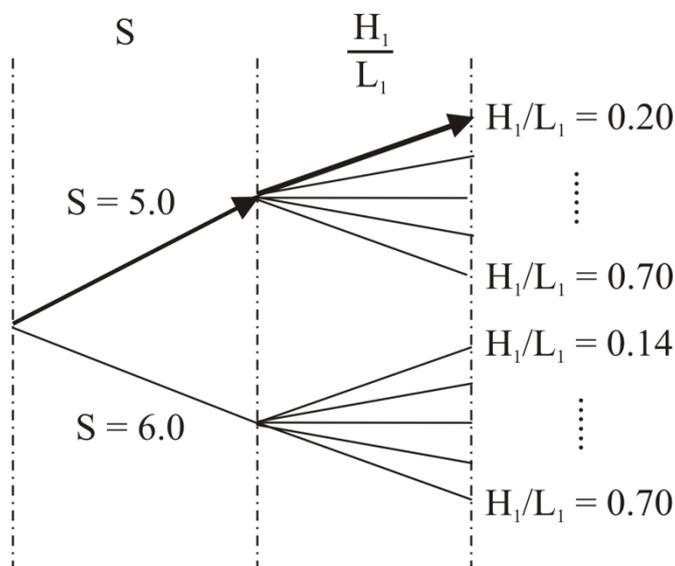


Figura 3.4 – Ilustração do processo de otimização aplicado ao dispositivo de galgamento com dois graus de liberdade (Goulart *et al.*, 2015).

Portanto, a variação geométrica consiste em otimizar um grau de liberdade mantendo os demais fixos, bem como as restrições geométricas globais para o problema. Por exemplo, a otimização do grau de liberdade H_1/L_1 se dá pela variação deste e mantendo-se fixo o valor de S , e assim sucessivamente até a determinação do caso ótimo (de melhor geometria neste caso). Desta forma, a variação de H_1/L_1 para diversos valores de S conduzem a um objetivo duas vezes maximizado, uma profundidade uma vez otimizada (S)_o e uma razão H_1/L_1 duas vezes otimizada (H_1/L_1)_{oo}. O número de passos será proporcional ao número de graus de liberdade do problema. Na Figura 3.4, observa-se o formato de árvore onde cada ramificação é uma configuração geométrica distinta.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para a construção do domínio computacional, foi empregado o software GAMBIT. A solução numérica das equações de conservação de massa e quantidade de movimento foi realizada com um código CFD baseado no MVF, FLUENT (FLUENT, 2007). No que diz respeito a geração da onda, a mesma será realizada através da imposição de um campo de velocidades conhecido e caracterizado pela teoria de Stokes de 2ª ordem, a qual é realizada no software FLUENT pelo emprego de uma Função Definida pelo Usuário (UDF – do inglês: *User Defined Function*). Esta metodologia foi empregada anteriormente nos trabalhos de Gomes (2010), Machado (2012), Dos Santos *et al.* (2013), Dos Santos *et al.* (2014) e Goulart (2014). Para a abordagem adequada da interação entre ar, água e dispositivo será empregado o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), semelhante ao utilizado por Liu *et al.* (2008a), Liu *et al.* (2008b), Iahnke (2010), Goulart (2014) e Goulart *et al.* (2015).

4.1 Design Construtal Aplicado ao Dispositivo de Galgamento

O problema físico analisado consiste de um dispositivo de galgamento bidimensional colocado em um tanque de ondas, conforme representado na Fig. 4.1. A terceira dimensão W é perpendicular ao plano da figura. O movimento da onda é gerado pela imposição de um campo de velocidades na superfície esquerda do tanque. Em um primeiro momento, o objetivo da análise foi a determinação da geometria ideal (H_1/L_1) que conduz à maior quantidade de massa de água que entra no reservatório. O grau de liberdade H_1/L_1 é otimizado utilizando o método por Busca Exaustiva para um escoamento com uma profundidade $h = 10,0$ m para duas ondas monocromáticas com os comprimentos de onda de $\lambda = 36,6$ e $65,4$ m (profundidades relativas de $h/\lambda = 0,27$ e $0,15$, respectivamente) e períodos $T = 5,0$ e $7,5$ s. Neste estudo foram analisadas duas (2) relações entre as áreas da rampa e do tanque de ondas ($\phi = A_r/A_T = 0,006$ e $\phi = 0,024$), além da repetição do estudo realizado por Goulart (2014) para o $\phi = 0,012$. Foram mantidos fixos os parâmetros $H_T/L_T = 0,061$ e $H/h = 0,1$ (relação entre a altura da onda, $H = 1,0$ m, e profundidade da lâmina de água, $h = 10,0$ m). Além disso, foi considerado um reservatório com um comprimento de $L_R = 20,0$ m e na seguinte faixa de alturas para o dispositivo: $3,5 \text{ m} \leq S \leq 6,5 \text{ m}$. Foram consideradas variações de S com um intervalo de $\Delta S = 0,5$ m, ou seja, foram simuladas sete (7) diferentes submersões. Para cada valor de S foram simuladas várias razões de H_1/L_1 .

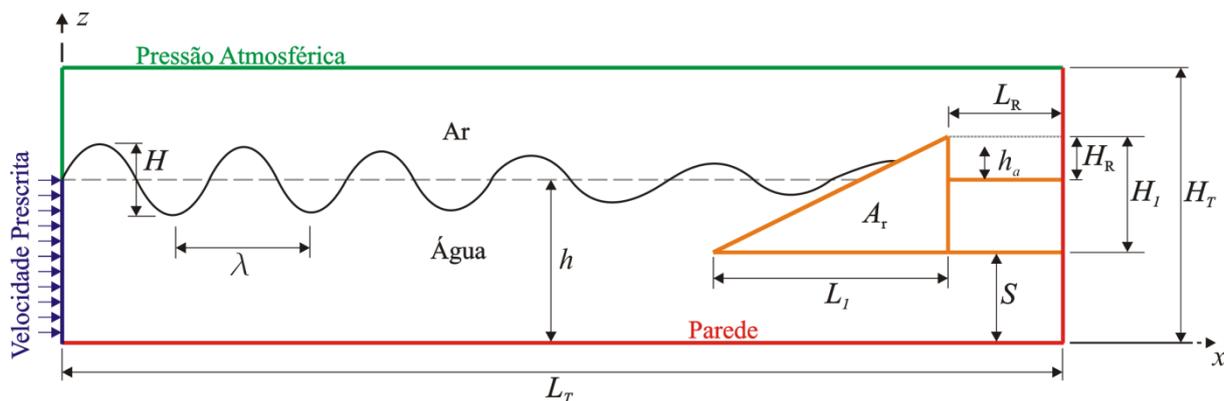


Figura 4.1 – Domínio computacional de um dispositivo de galgamento em escala real com dois graus de liberdades.

No que diz respeito ao Design Construtal, a avaliação geométrica do problema estudado está sujeita a duas restrições, ou seja, a área total de restrição de tanque a onda

$$A_T = H_T L_T \quad (4.1)$$

e a área de restrição a rampa

$$A_r = \frac{H_1 L_1}{2} \quad (4.2)$$

A Equação (4.2) pode ser reescrita como a fração de área do dispositivo

$$\phi = \frac{A_r}{A_T} \quad (4.3)$$

Também está sendo considerado como uma restrição do problema que $(S + H_1) > (h + H/2)$ de forma que a crista da onda não seja superior a máxima altura do dispositivo.

Com relação ao processo de otimização por Busca Exaustiva, o mesmo foi dividido conforme ilustrado na Fig. 4.2 e foi realizado para duas diferentes ondas monocromáticas ($T = 5,0$ s e $T = 7,5$ s).

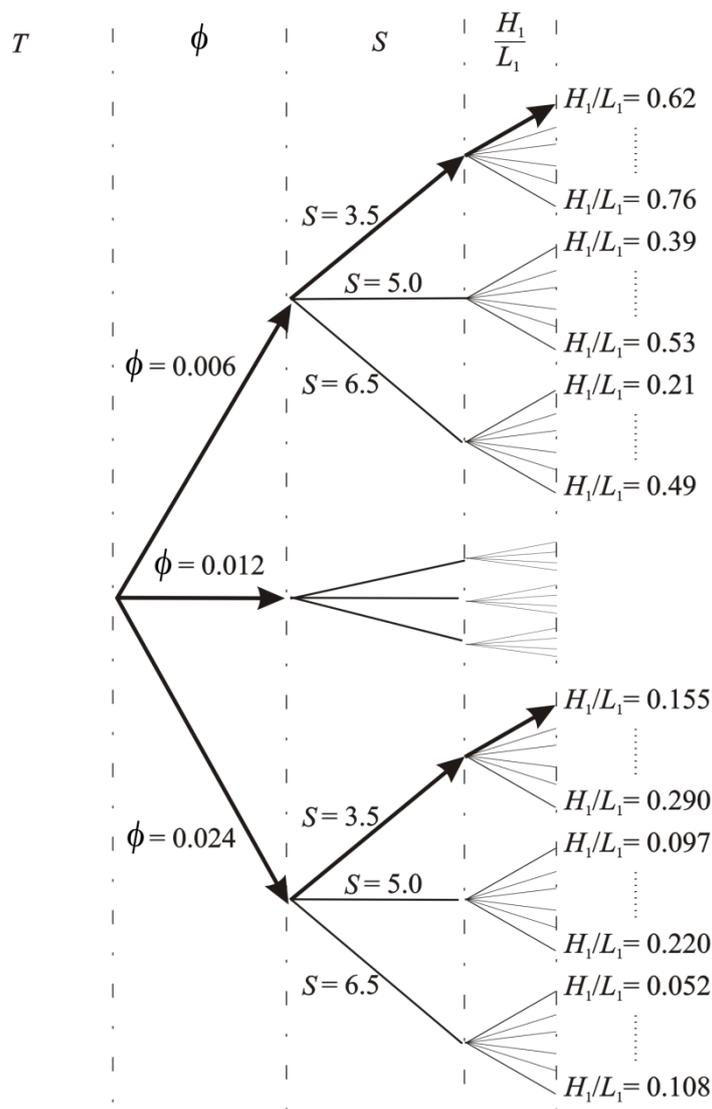


Figura 4.2 – Ilustração do processo de otimização aplicado ao dispositivo de galgamento com dois graus de liberdade.

No primeiro passo, a geometria é otimizada pela variação da razão H_1/L_1 e mantendo-se fixos os parâmetros remanescentes, neste caso a submersão S e a fração de área ϕ . O valor máximo encontrado para a potência disponível obtida a partir da quantidade total de massa de água acumulada no reservatório do dispositivo será denominada a potência disponível uma vez maximizada, $P_{d,m}$, e a correspondente razão H_1/L_1 será denominada a razão uma vez otimizada, $(H_1/L_1)_o$.

A potência disponível foi determinada de acordo com a equação a seguir:

$$P_d = \frac{m g h_a}{t_f} \quad (4.4)$$

Onde, P_d (W) é a potência disponível, m (kg) é a massa de água acumulada no reservatório, g ($m.s^{-2}$) a aceleração da gravidade, h_a (m) a altura da água acumulada no interior do reservatório (determinada a partir do volume do reservatório, a massa de água acumulada e a massa específica utilizada nas simulações – $\rho = 998,2 \text{ kg.m}^{-3}$) e t_f é referente ao intervalo de tempo (s) considerado no estudo (100 s).

Em um segundo momento, o mesmo processo é repetido para vários valores da submersão S e para outros dois valores de fração de área $\phi = 0,012$ (repetindo as simulações realizadas por Goulart (2014)) e $\phi = 0,024$. Portanto, a potência disponível máxima obtida entre as diferentes frações de área ($\phi = 0,006$, $\phi = 0,012$ e $\phi = 0,024$) é denominada duas vezes maximizada, $P_{d,mm}$, e a razão H_1/L_1 é a duas vezes otimizada, $(H_1/L_1)_{oo}$. Neste estudo específico foi realizado um total de 367 simulações distribuídas como nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – Distribuição das simulações para $T = 5,0$ s

$T = 5.0$ s					
$\phi = 0.006$		$\phi = 0.012$		$\phi = 0.024$	
S	N.º Simulações	S	N.º Simulações	S	N.º Simulações
3.5	8	3.5	11	3.5	9
4.0	8	4.0	9	4.0	9
4.5	8	4.5	9	4.5	9
5.0	8	5.0	11	5.0	8
5.5	8	5.5	8	5.5	8
6.0	8	6.0	8	6.0	8
6.5	8	6.5	8	6.5	8

Tabela 4.2 – Distribuição das simulações para $T = 7,5$ s

$T = 7.5$ s					
$\phi = 0.006$		$\phi = 0.012$		$\phi = 0.024$	
S	N.º Simulações	S	N.º Simulações	S	N.º Simulações
3.5	9	3.5	9	3.5	9
4.0	10	4.0	9	4.0	9
4.5	9	4.5	8	4.5	9
5.0	9	5.0	11	5.0	8
5.5	9	5.5	9	5.5	8
6.0	10	6.0	8	6.0	8
6.5	11	6.5	8	6.5	8

4.2 O Modelo Multifásico *Volume Of Fluid* (VOF)

O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), Hirt e Nichols (1981), consiste em encontrar a solução de um escoamento de uma mistura ar-água. Por isso, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte de fração volumétrica são resolvidas com o MVF. Mais especificamente usando o software FLUENT.

Conforme Schlichting (1979), a equação de conservação da massa para a mistura ar e água em um escoamento isotérmico, laminar e incompressível é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4.5)$$

onde ρ é a massa específica da mistura (kg/m^3) e \vec{v} o vetor de velocidade do escoamento (m/s).

Já a equação de conservação da quantidade de movimento para a mistura é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\overline{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.6)$$

onde p é a pressão (N/m^2), $\rho \vec{v}$ e \vec{F} são as forças de campo (empuxo) e forças externas ao corpo (N/m^3), respectivamente. Neste trabalho, a única força de campo que atua sobre o escoamento é a força de empuxo, conseqüentemente o vetor de forças externas será desconsiderado. O termo $\overline{\overline{\tau}}$ é o tensor taxa de deformação (N/m^2), que para um fluido Newtoniano, é dado por:

$$\overline{\overline{\tau}} = \mu \left[\left(\nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot \vec{v}^T \right) \right] \quad (4.7)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica (kg/(ms)). O segundo termo do lado direito da Eq. (4.7) descreve as tensões desviadoras (N/m^2) e está relacionada com a deformação volumétrica em escoamentos compressíveis. Uma vez que as velocidades obtidas no escoamento da onda (tanto na região do ar quanto da água) são baixas (número de Mach $< 0,3$) será considerado

um escoamento incompressível e o termo de tensões desviadoras não é levado em consideração na solução numérica do problema.

O método *Volume of fluid* (VOF) é empregado para lidar com o escoamento da mistura de ar e água e avaliar a sua interação com o dispositivo. O VOF é um modelo multifásico usado para escoamentos de fluido com duas ou mais fases. Neste modelo, as fases são imiscíveis, ou seja, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra fase (Hirt e Nichols, 1981).

São consideradas, nas simulações deste estudo, duas diferentes fases: ar e água. Portanto, o conceito de fração de volume (α_q) é usado para representar as duas fases dentro de um volume de controle. Neste modelo, a soma das frações de volume, dentro de um volume de controle, devem ser unitária ($0 \leq \alpha_q \leq 1$). Consequentemente, se $\alpha_{\text{água}} = 0$, o volume de controle está vazio de água e cheio de ar ($\alpha_{\text{ar}} = 1$). Se o fluido tem uma mistura de ar e água, uma fase é o complemento da outra, ou seja, $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$. Assim, uma equação de transporte adicional para uma das frações de volume é necessária (Ling *et al.*, 2001; Lv *et al.*, 2011; Gomes, 2010):

$$\frac{\partial(\rho\alpha_{\text{água}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\alpha_{\text{água}}\vec{v}) = 0 \quad (4.8)$$

As equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas para a mistura. Portanto, é necessário obter os valores de massa específica e viscosidade para a mistura, que podem ser escritas por:

$$\rho = \alpha_{\text{água}}\rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}}\rho_{\text{ar}} \quad (4.9)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}}\mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}}\mu_{\text{ar}} \quad (4.10)$$

Com relação à geração de onda, um perfil de velocidades é imposto na entrada do canal (superfície lateral esquerda da Fig. 4.1) e simula o comportamento de um gerador de ondas (Horko, 2007). Os componentes de velocidade na direção de propagação de onda (x) e na direção vertical (z) para o canal de entrada são baseados na teoria de Stokes de 2ª ordem e são dadas respectivamente por (Chakrabarti, 2005):

$$u(x, z) = \frac{H g k \cosh k(h + z)}{2\sigma \cosh kh} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3H^2 \sigma k \cosh 2k(h + z)}{16 \sinh^4 kh} \cos 2(kx - \sigma t) \quad (4.11)$$

$$w(x, z) = \frac{H g k \sinh k(h + z)}{2\sigma \cosh kh} \sin(kx - \sigma t) + \frac{3H^2 \sigma k \sinh 2k(h + z)}{16 \sinh^4 kh} \sin 2(kx - \sigma t) \quad (4.12)$$

Para as outras condições de contorno, a região superior da superfície lateral esquerda, bem como, a superfície superior impõe-se uma pressão atmosférica $P_{\text{abs}} = 101,3$ kPa.

Para as condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso e que a lâmina de água possui uma superfície livre com altura $h = 10,0$ m.

5. MODELAGEM NUMÉRICA E PROCEDIMENTOS NUMÉRICOS

5.1 Modelagem Numérica

Os problemas de engenharia podem ser resolvidos por meio de um, ou uma combinação destes, dos três métodos a seguir: experimentais, analíticos e/ou numéricos. A escolha de um, ou mais, destes métodos se dá mediante a complexidade do problema em estudo. Assim, os métodos podem apresentar vantagens ou desvantagens sobre os demais dependendo das informações que se tem do problema e dos recursos disponíveis para resolvê-lo. Discussões mais aprofundadas sobre o assunto podem ser vistas em Ferziger e Peric (1997), Maliska (2004), Fortuna (2000), Versteeg e Malalasekera (1995), Patankar (1980) e Tannehill *et. al* (1997). No presente trabalho é descrita uma solução teórica, aplicando a conservação das equações de movimento, massa, energia e das condições de contorno, visto que a resolução proposta aplica a Modelagem Matemática e Métodos Numéricos, conforme pode ser observado na Fig. 5.1.

A facilidade de acesso aos meios computacionais cada vez mais robustos e o desenvolvimento de algoritmos para a solução dos mais diversos problemas, tem recebido enorme atenção dos analistas numéricos e engenheiros, fazendo aumentar o número de pesquisadores e usuários da simulação numérica. Portanto, o uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos da engenharia e da física tem crescido muito devido ao vertiginoso desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento. Além disso, a versatilidade e generalidade dos métodos numéricos para simulação de problemas de engenharia, e a relativa simplicidade de aplicação dessas técnicas, são outros fatores motivadores para seu uso (Maliska, 2004).

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

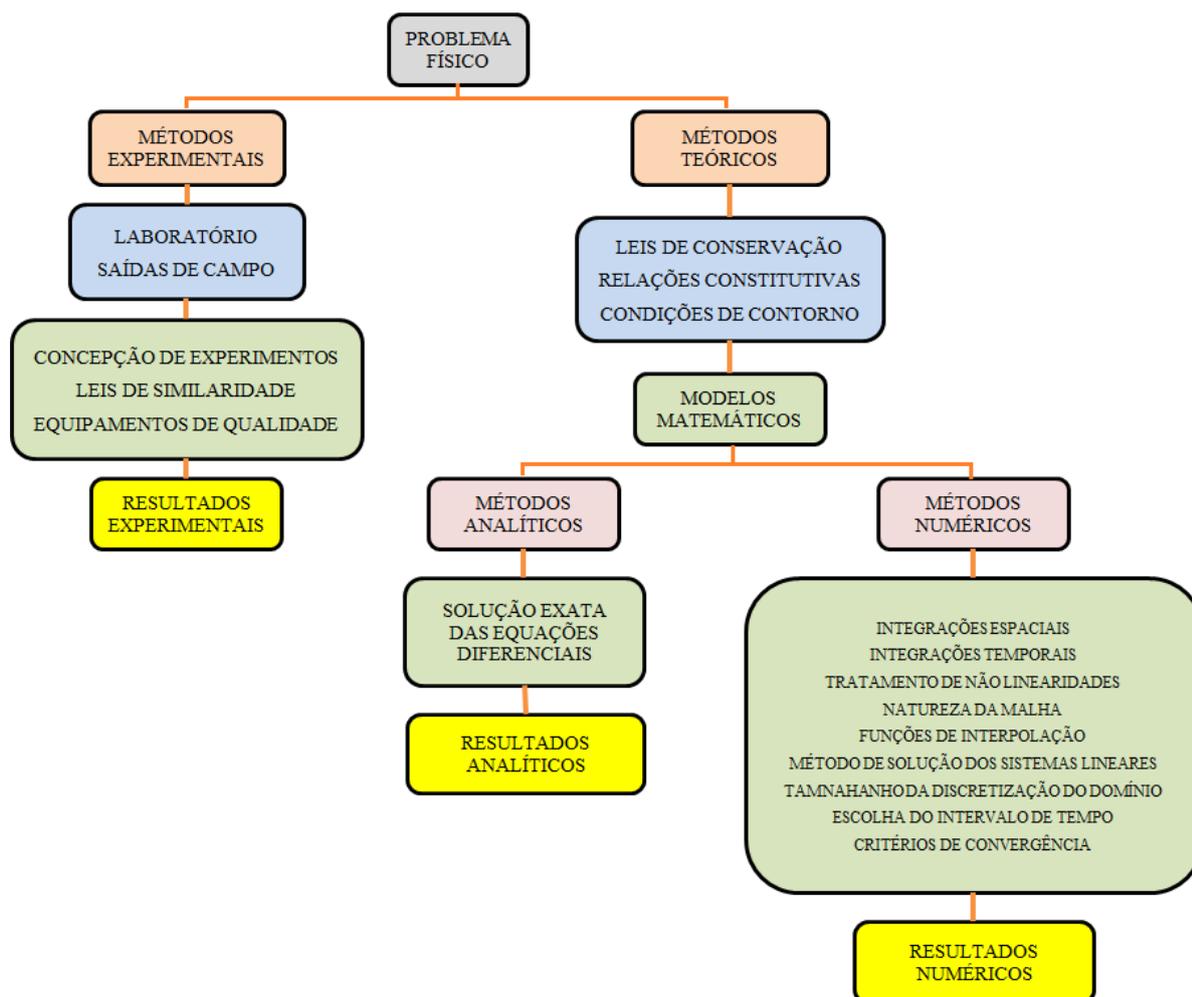


Figura 5.1 – Métodos de resolução para problemas físicos (Adaptado de Maliska, 2004).

Conforme Versteeg e Malalasekera (1995), a análise de sistemas, através de simulações computacionais, envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, é conhecida como Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*), e apresenta as seguintes vantagens: redução substancial de tempo e custo de novos projetos, capacidade em estudar sistemas onde análises experimentais são complexas ou impossíveis, além do nível de detalhamento dos resultados praticamente ilimitado.

Através da ferramenta CFD, trabalha-se com a discretização do campo de solução do problema e aplicação de um método numérico que permita encontrar de forma adequada à solução do mesmo. Para este trabalho, foram empregados os *softwares* GAMBIT e FLUENT (Fluent, 2007) que constituem um pacote comercial de CFD da empresa ANSYS®.

Desta forma, a modelagem computacional de um problema através de um pacote comercial de CFD é normalmente dividida em três etapas, conforme descrito a seguir:

- Pré-processamento: construção da geometria do problema e a geração da malha. Para o problema em estudo foi utilizado o *software* GAMBIT; e a definição das condições iniciais e de contorno, foi empregado o *software* FLUENT;
- Processamento: são resolvidas as equações que compõe o modelo matemático do problema. Foi empregado o *software* FLUENT;
- Pós-processamento: coleta e análise dos dados obtidos, realizando a plotagem de gráficos e topologias. O *software* FLUENT oferece recursos para esta etapa, porém foram utilizadas planilhas eletrônicas, por que permitem um tratamento dos dados de uma forma mais adequada.

Os três métodos tradicionais para a solução numérica de equações diferenciais em engenharia são: o Método de Diferenças Finitas (MDF), o Método de Volumes Finitos (MVF) e o Método de Elementos Finitos (MEF). A principal diferença entre eles está relacionada com a maneira como as variáveis do escoamento são aproximadas e com o processo de discretização empregado em cada método (Maliska, 2004; Versteeg e Malalasekera, 1995).

Assim, no pacote CFD utilizado neste estudo, o *software* GAMBIT auxilia na construção e discretização da geometria para solução computacional. Já o *software* FLUENT, o qual é baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF), é utilizado na modelagem do escoamento de fluidos e de transferência de calor de geometrias complexas. Desta forma, as equações de conservação de massa e da quantidade de movimento na forma diferencial, são convertidas em um sistema de equações algébricas para todos os volumes de controle.

5.2 Método dos Volumes Finitos (MVF)

A justificativa de se utilizar um método numérico é o fato da transformação de uma equação diferencial complexa, definida num domínio, em um sistema de equações algébricas simples. Para isso, as derivadas da função existentes na equação diferencial devem ser substituídas pelos valores discretos da função. O MVF é uma forma de se obter uma versão discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP). Diferentemente de outros métodos, o método fundamenta-se em uma abordagem física do problema representado pela

EDP. O seu desenvolvimento está intrinsecamente ligado ao conceito de fluxo entre regiões, ou volumes adjacentes, onde o fluxo de uma determinada grandeza, como massa ou energia, é a quantidade que atravessa a área de uma fronteira. A quantidade líquida desta grandeza, que atravessa um volume de controle por unidade de tempo, é calculada pela integração sobre essas fronteiras, ou seja, a diferença entre os fluxos que entram e a dos que saem deste volume, o que é conseguido de forma mais geral pela integração das EDPs (Maliska, 2004; Bortoli, 2000; Fortuna, 2000).

Segundo Maliska (2004), quando não é possível a solução analítica, e decide-se fazer uma aproximação numérica da equação diferencial, aceita-se ter a solução para um número discreto de pontos, com um determinado erro, esperando que quanto maior for este número de pontos mais perto da solução exata será a solução aproximada. Um método analítico com habilidade de resolver tais equações forneceria a solução em uma forma fechada, e seria possível, então, calcular os valores das variáveis dependentes em nível infinitesimal, isto é, para um número finito de pontos.

Portanto, o método de volumes finitos é construído a partir da divisão do domínio de integração das equações em volumes de controles, de forma que para cada célula exista um ponto nodal ou nó.

A Figura 5.2 ilustra a técnica de discretização empregada pelo método numérico, o qual converte uma equação diferencial em um sistema de equações algébricas.

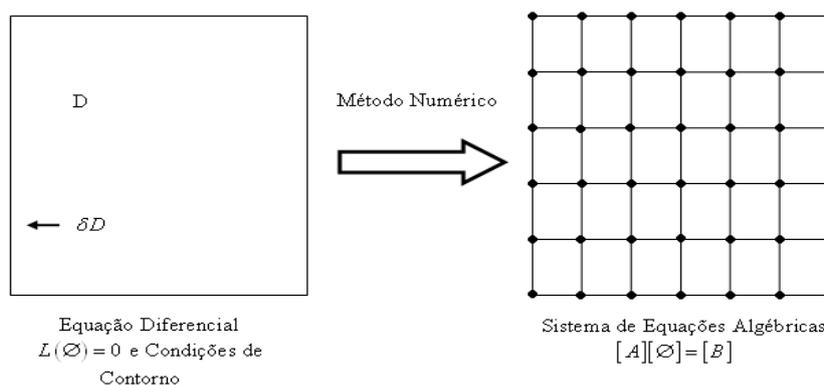


Figura 5.2 – Técnica de discretização (Maliska, 2004).

Assim, todo método que, para obter equações aproximadas, satisfaz a conservação de propriedade em nível de volumes elementares é um Método de Volumes Finitos. Existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas para esta metodologia. A primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, ou

volumes finitos, e a segunda é integrar sobre o volume elementar, no espaço e no tempo, as equações na forma conservativa (Maliska, 2004).

A Figura 5.3 mostra a representação de um volume de controle. O ponto P é o ponto principal, nó, de um volume de controle genérico, sendo que os volumes de controles adjacentes possuem o mesmo arranjo, com um nó central. As faces dos volumes de controle são representadas pelas linhas em negrito e Δx e Δy são as distâncias entre as faces, ou dimensão do volume de controle. As velocidades na direção x nas faces leste e oeste são representadas por u , e as velocidades na direção y nas faces norte e sul são representadas por v .

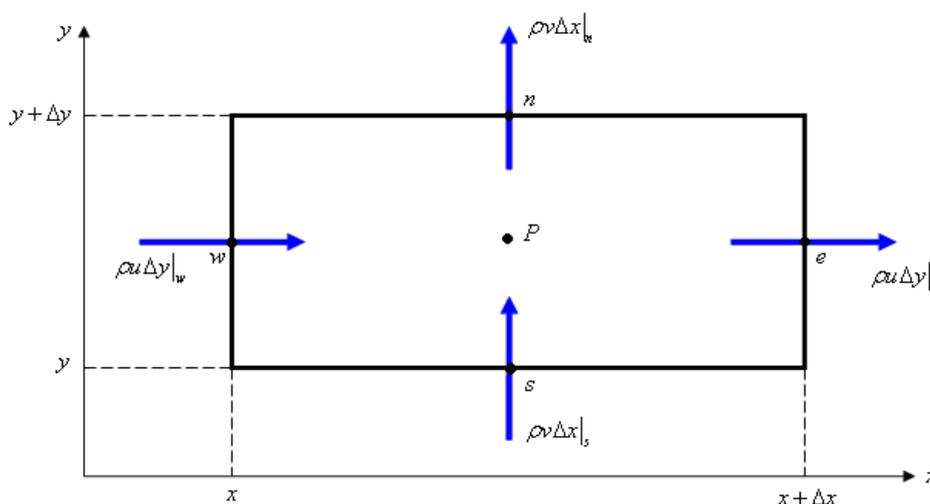


Figura 5.3 – Volume de controle típico (Maliska, 2004).

A dedução da equação diferencial que representa a conservação da massa para um escoamento incompressível (divergência do campo de velocidades igual a zero) é realizada a partir do balanço de massa no volume de controle, conforme mostrado na Fig. 5.3:

$$\dot{m}_e - \dot{m}_w + \dot{m}_n - \dot{m}_s = 0 \quad (5.1)$$

onde \dot{m} denota o fluxo de massa e os índices e , w , n e s significam respectivamente leste, oeste, norte e sul e servem para identificar as faces do volume de controle na discretização numérica. A Equação discretizada que representa a vazão mássica que cruza as fronteiras do volume de controle especificado na Fig. 5.3 é a seguinte:

$$\rho u \Delta y|_e - \rho u \Delta y|_w + \rho v \Delta x|_n - \rho v \Delta x|_s = 0 \quad (5.2)$$

Na qual u, v e ρ significam, respectivamente, componente da velocidade na direção x (m/s), componente da velocidade na direção y (m/s) e massa específica (kg/m³).
Dividindo a Eq. (5.2) pelo produto $\Delta x \Delta y$:

$$\frac{\rho u|_e - \rho u|_w}{\Delta x} + \frac{\rho v|_n - \rho v|_s}{\Delta y} = 0 \quad (5.3)$$

Aplicando o limite, encontra-se a equação diferencial que define a forma diferencial da Equação da conservação da massa, para um escoamento permanente:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (5.4)$$

A partir da Equação de conservação para um volume finito pode se obter a equação de conservação em nível infinitesimal. Logo, a Eq. (5.4) será resolvida pela maneira prática do MVF, ou seja, através de integração numérica no volume elementar, como se pode observar nas Eqs. (5.5) e (5.6):

$$\int_w^e \int_s^n \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) \right] dx dy = 0 \quad (5.5)$$

$$\int_s^n [\rho u|_e - \rho u|_w] dy + \int_w^e [\rho v|_n - \rho v|_s] dx = 0 \quad (5.6)$$

Avaliando o fluxo de massa no meio da face do volume como representação da média de variação na face, pode-se escrever:

$$\rho u \Delta y|_e - \rho u \Delta y|_w + \rho v \Delta x|_n - \rho v \Delta x|_s = 0 \quad (5.7)$$

A Equação (5.7) pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\dot{m}_e - \dot{m}_w + \dot{m}_n - \dot{m}_s = 0 \quad (5.8)$$

A Equação (5.1) é a equação aproximada que vale para o volume P . Portanto, realizar a integração da forma conservativa da equação diferencial ou fazer o balanço são procedimentos equivalentes. Realizando a integração para todos os volumes elementares, obtém-se uma equação algébrica para cada volume e, portanto, o sistema de equações algébricas procurado (Maliska, 2004).

A seguir é apresentado uma descrição do método de volumes finitos aplicado as equações do escoamento da mistura água e ar apresentado no capítulo 4. Mais precisamente será comentado sobre as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e do transporte da fração volumétrica.

Segundo Maliska (2004), a simplificação do modelo numérico, das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e transporte da fração volumétrica é definida na forma geral por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v\phi) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_i}\right) + S\phi \quad (5.9)$$

onde ϕ é o escalar que está sendo transportado, Γ^ϕ é o coeficiente de difusão e S^ϕ é o termo fonte ou sumidouro por unidade de volume. Os termos relacionados com o escalar ϕ são apresentados na Tabela 5.1 para cada equação de conservação.

Tabela 5.1 – Valores de ϕ , Γ^ϕ e S^ϕ usados na Equação (5.9).

Equação de Conservação	ϕ	Γ^ϕ	S^ϕ
Massa	1	0	0
Quantidade de movimento	\vec{v}	μ	$-\frac{\partial P}{\partial x_i}\delta_{ij} + \rho g_i + F_i$
Transporte da fração volumétrica	$\alpha_{\text{água}}$	0	0

De acordo com Maliska (2004), a Eq. (5.9) representa a conservação de massa, quando S^ϕ for igual a zero e $\phi = 1$. As equações de conservação da quantidade de movimento nas três direções coordenadas são obtidas fazendo-se $\phi = u$ e v com o apropriado termo fonte, que, neste caso, inclui o gradiente de pressão. Para a equação de conservação da quantidade de movimento $\Gamma^\phi = \mu$. Para o transporte da fração volumétrica, o valor de $\phi = \alpha_{\text{água}}$ e o termo fonte é nulo.

Conforme Versteeg e Malalasekera (1995), para obter uma solução aproximada pelo MFV deve-se dividir o domínio em vários volumes de controle, onde a variável de interesse fica situada no volume de controle. Posteriormente, integram-se as equações governantes, Eq. (5.1), sobre cada volume de controle (VC) e ao longo do tempo, para um passo de tempo Δt . A equação do transporte, Eq. (5.9), na forma integral é dada por:

$$\int_{VC} \left(\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) dt \right) dV + \int_t^{t+\Delta t} \left(\int_A n \cdot (\rho \bar{u} \phi) dA \right) dt = \int_t^{t+\Delta t} \left(\int_A n \cdot (I \nabla \phi) dA \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{VC} S_\phi dV dt \quad (5.10)$$

onde \vec{v} é o vetor do campo de velocidades, n é o vetor unitário normal à superfície do volume de controle \forall e dA é a magnitude do elemento de área da superfície de controle.

A Equação (5.10) é empregada para cada volume de controle do domínio computacional. Um exemplo de um volume de controle bidimensional é apresentado na Fig. 5.4.

A discretização da Eq. (5.10) para um volume de controle qualquer envolvendo suas faces é dada por (Fluent, 2007):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} \forall + \sum_f \rho_f u_i|_f \phi_f n_{fi} A_f = \sum_f \Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \Big|_f n_{fi} A_f + S_\phi \forall \quad (5.11)$$

onde N_f é o número de faces que compõem o volume de controle, ϕ_f é a variável obtida na face f , $u_i|_f$ é o campo de velocidades na direção i obtido na face f , A_f é a área da face f e n_{fi} é o vetor unitário normal a face f . Na Figura 5.4 as faces do volume de controle bidimensional são representadas pela linha vermelha tracejada. É possível observar neste caso que f pode representar qualquer uma das faces: leste (e), oeste (w), norte (n) ou sul (s). O primeiro termo do lado esquerdo da Eq. (5.11) representa o termo transiente, sendo necessário fazer alguma consideração quanto à evolução das variáveis das células vizinhas em função do tempo. No presente trabalho foi empregado um esquema de avanço temporal implícito, que será posteriormente apresentado.

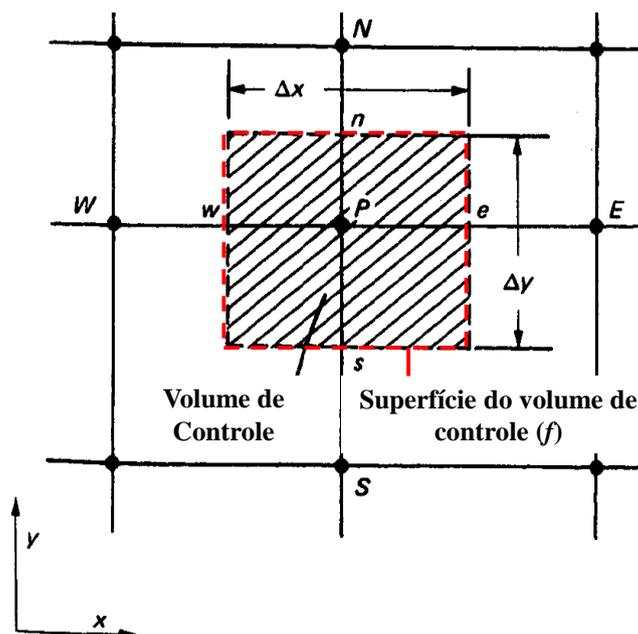


Figura 5.4 – Volume de controle empregado em MVF para um domínio bidimensional
(Adaptado de Patankar, 1980).

Em Dos Santos (2011), a equação discretizada do transporte escalar, Eq. (5.11), é usada para obter as variáveis escalares desconhecidas ϕ no centro da célula P (ϕ_P), assim como os valores das incógnitas nas células vizinhas, ϕ_E , ϕ_W , ϕ_N e ϕ_S (para um domínio bidimensional). Apesar da não linearidade desta equação com respeito às variáveis das células vizinhas, é possível escrevê-la na seguinte forma linear:

$$a_p \phi_P = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (5.12)$$

Na Equação (5.12) o subíndice nb refere-se às células vizinhas, a_p é o coeficiente principal, a_{nb} são os coeficientes das células vizinhas (E , W , N e S) e b contabiliza o termo fonte. De acordo com Savicki (2007) os coeficientes a_p , a_{nb} e b mudam de acordo com a função de interpolação usada (*upwind*, *power-law*, *QUICK* entre outros) e também podem variar de acordo com a linearização do termo fonte de cada equação.

5.3 Discretização Temporal das Equações de Conservação

Segundo Maliska (2004), após realizar a discretização espacial da equação, é importante definir qual o tipo de formulação será utilizada para resolver o problema no

tempo. Para se analisar problemas transientes, torna-se necessário a utilização de algum esquema de interpolação no tempo, que pode, por sua vez, ser classificado como: explícito, totalmente implícito e implícito.

Conforme Dos Santos (2011), os esquemas totalmente implícitos são incondicionalmente estáveis e permitem o uso de um maior passo de tempo em relação aos demais. Todavia, para domínios de grande dimensão há uma grande dificuldade para o armazenamento na memória principal das matrizes completas do sistema, gerando um maior tempo de processamento para obtenção de resultados da simulação, já os esquemas explícitos ocupam pouco espaço na memória central. Entretanto, tais esquemas são afetados por fortes restrições de estabilidade numérica, limitando o passo de tempo a ser adotado.

A Figura 5.5 ilustra, para os três tipos de formulação, as conexões existentes entre o ponto P e seus vizinhos, no instante de tempo de cálculo e no instante de tempo anterior. Assim, as Figuras 5.5 (a), 5.5 (b) e 5.5 (c) representam, respectivamente, os esquemas explícito, implícito e totalmente implícito.

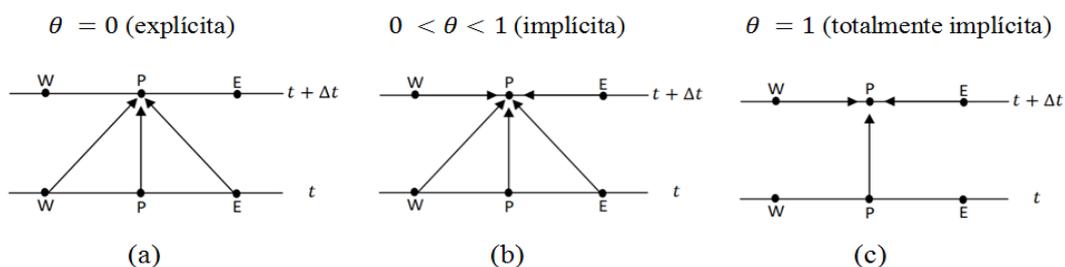


Figura 5.5 – Conexão espacial e temporal do volume P (Maliska, 2004).

Neste estudo é utilizado o esquema de avanço temporal totalmente implícito, conforme é ilustrado na Fig. 5.5 (c). De acordo com Maliska (2004), o método Crank-Nicolson é o mais conhecido dessa classe, em que as variáveis são tomadas como média aritmética entre as variáveis em $P(t)$ e $P(t + \Delta t)$. Um exemplo de equacionamento para velocidade é dado por:

$$V_P^\theta = \theta V_P + (1 - \theta) V_P^0 \quad (5.13)$$

Analisando a Eq. (5.13), tendo $\theta \neq 0$, as equações ficam acopladas. Isso caracteriza a implicitude entre as mesmas. Já tomando $\theta = 0$, tem-se a formulação explícita, ilustrada na Fig. 5.5 (a). Logo, todas as temperaturas vizinhas a P são avaliadas no instante

anterior e, portanto, já são conhecidas. Então, é possível explicitar a incógnita da Eq. (5.13), ou seja, V_p^θ , em função das temperaturas vizinhas, todas conhecidas (Maliska, 2004).

Conforme Maliska (2004), como há uma equação para cada ponto discreto e em cada uma das equações as velocidades vizinhas são sempre no instante anterior, a formulação explícita dá origem a um conjunto de equações algébricas que podem ser resolvidas uma a uma, obtendo-se o valor da propriedade em cada ponto do espaço para cada nível de tempo. Como as equações não são acopladas entre si, não há um sistema de equações a ser resolvido, porém um conjunto de equações. É importante mencionar que para esse caso, deve-se conhecer o valor da propriedade no começo do intervalo de tempo.

Na formulação totalmente implícita, Fig. 5.5 (c), considera-se $\theta = 1$, todas as incógnitas estarão no mesmo nível de tempo. Conseqüentemente, tem-se um sistema de equações algébricas para ser resolvido. Havendo interesse na solução transiente, é importante resolver o problema com precisão a cada passo de tempo. Dessa forma, se um método iterativo está sendo utilizado, para a resolução do problema, é necessário que os valores das incógnitas sejam iterados até que um critério de convergência seja satisfeito naquele passo de tempo (Maliska, 2004).

A Figura 5.5 (b) mostra a formulação implícita, a qual é admitido $0 < \theta < 1$, isto é, será utilizada a função de interpolação no tempo representada pela Eq. (5.13). Nessa função, será utilizado o valor da função no tempo atual e no tempo anterior, relacionadas pelos coeficientes θ e $(1 - \theta)$. Logo, o presente tipo de formulação também produzirá um sistema de equações algébricas para ser resolvido (Maliska, 2004).

Observando a Fig. 5.5 (b) identifica-se a formulação implícita, a qual é admitido $0 < \theta < 1$, isto é, será utilizada a função de interpolação no tempo representada pela Eq. (5.13). Nessa função, será utilizado o valor da função no tempo atual e no tempo anterior, relacionadas pelos coeficientes θ e $(1 - \theta)$. Logo, o presente tipo de formulação também produzirá um sistema de equações algébricas para ser resolvido (Maliska, 2004).

A Figura 5.6 apresenta de forma resumida estas formulações, além das possibilidades de avanço da solução no tempo.

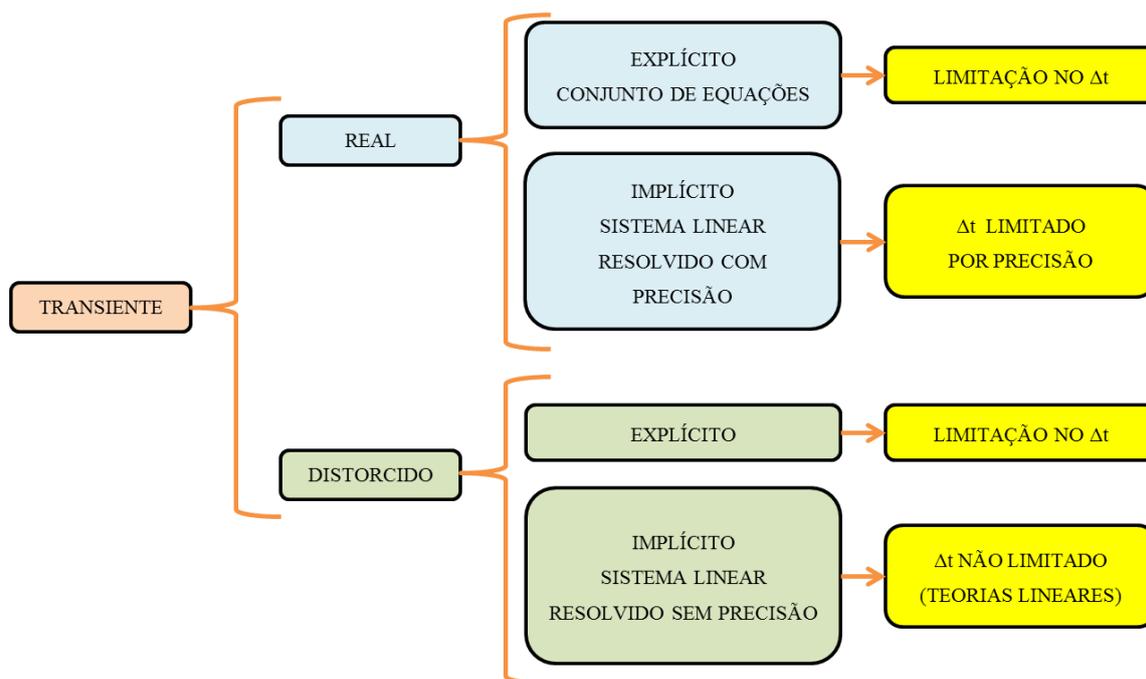


Figura 5.6 – Tipos de formulações no tempo (Adaptado de Maliska, 2004)

No transiente real o avanço no tempo só se dá quando, dentro de determinada tolerância, todos os valores da equação tiverem convergido para o intervalo de tempo considerado, portanto há uma maior exatidão no valor da solução, porém o tempo de processamento também é maior. No transiente distorcido não se está interessado na exatidão da solução, mas somente na solução em regime permanente, e o tempo de processamento é menor (Maliska, 2004).

5.4 Tratamento dos Termos Advectivos das Equações de Conservação

Os escoamentos advectivos dominantes possuem grandes instabilidades numéricas quando se adotam discretizações por diferenças finitas centrais. As soluções frequentemente apresentam oscilações espúrias nos campos de velocidades, pressão e temperaturas. Tais oscilações podem ser reduzidas empregando um maior refinamento de malha de acordo com Maliska (2004). Entretanto, não é possível empregar este tipo de refinamento em problemas reais devido ao elevado esforço computacional (Maliska 2004; Dos Santos 2011). Em decorrência disso, foram desenvolvidas técnicas para abordagem deste problema.

No âmbito do método dos volumes finitos, as oscilações numéricas geradas ocorrem devido à negatividade dos coeficientes dos termos advectivos das equações de conservação, que ocorre quando é utilizada uma discretização por diferenças finitas centrais

(Dos Santos, 2011). Uma forma de evitar isso é através do emprego de outra aproximação para os termos advectivos nas faces dos volumes de controle (Patankar, 1980; Maliska, 2004).

Foi utilizado neste estudo o esquema de advecção *upwind* para os termos advectivos. Para o presente esquema, a direção do escoamento é levada em consideração para a realização do cálculo do valor de uma determinada variável (velocidade, temperatura) na face do volume finito. Além disso, a positividade dos coeficientes dos termos advectivos é sempre garantida, sendo geradas soluções numéricas ausentes de oscilações numéricas. Aliado a isso, como grande vantagem, se tem que a função de interpolação *upwind* é a simplicidade de sua aplicação em algoritmos de CFD (Dos Santos, 2011).

No esquema de advecção *upwind* de primeira ordem, o valor ϕ_f na interface é igual ao valor da célula que está à montante da face (Patankar, 1980; Dos Santos, 2011). Por exemplo, se a velocidade principal do escoamento ocorre na direção x , conforme ilustra a Fig. 5.7, a variável ϕ_e (na face leste) será dada por:

$$\phi_e = \phi_P \text{ se } F_e = (\rho u)_e > 0 \quad (5.14)$$

$$\phi_e = \phi_E \text{ se } F_e = (\rho u)_e < 0 \quad (5.15)$$

Para face oeste, tem-se:

$$\phi_w = \phi_W \text{ se } F_e = (\rho u)_e > 0 \quad (5.16)$$

$$\phi_w = \phi_P \text{ se } F_e = (\rho u)_e < 0 \quad (5.17)$$

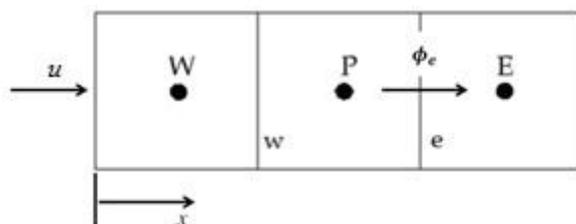


Figura 5.7 – Obtenção de ϕ_f em uma face do volume de controle (Adaptado de Dos Santos 2011).

5.5 Resolução de Equações Aplicando o Método de Solução Segregado

O FLUENT permite escolher entre duas classes de métodos numéricos: segregado (*segregated solver*) ou acoplado (*coupled solver*). Usando qualquer método, o FLUENT integra as equações do modelo matemático geradas pela discretização.

Comparando os dois métodos, pode se concluir que a diferença entre esses métodos consiste na forma de resolução das incógnitas. Enquanto o solver acoplado resolve todas as incógnitas simultaneamente (e para isso cria uma única matriz envolvendo todos os coeficientes), resolvendo todas as equações governantes para todas as variáveis (velocidade, pressão, temperatura e etc) em todos os volumes de controle ao mesmo tempo (ou de maneira simultânea ou acoplada). O método segregado resolve as equações governantes para uma variável (por exemplo, a velocidade) em todos os volumes de controle um de cada vez (ou sequencialmente), atualizando para isso os coeficientes (Maliska, 2004). A solução segregada apresenta vantagens sobre a solução simultânea. Enquanto a solução acoplada apresenta uma matriz resultante predominantemente esparsa, a solução segregada engendra matrizes menos esparsas, o que acelera a resolução dos sistemas lineares e diminui a alocação de memória.

Em função das não linearidades existentes nas equações governantes, no método segregado (baseado em pressão), várias iterações devem ser efetuadas até se obter a convergência. Cada iteração consiste de um incremento, conforme observado na Fig. 5.8 (Duarte, 2006).

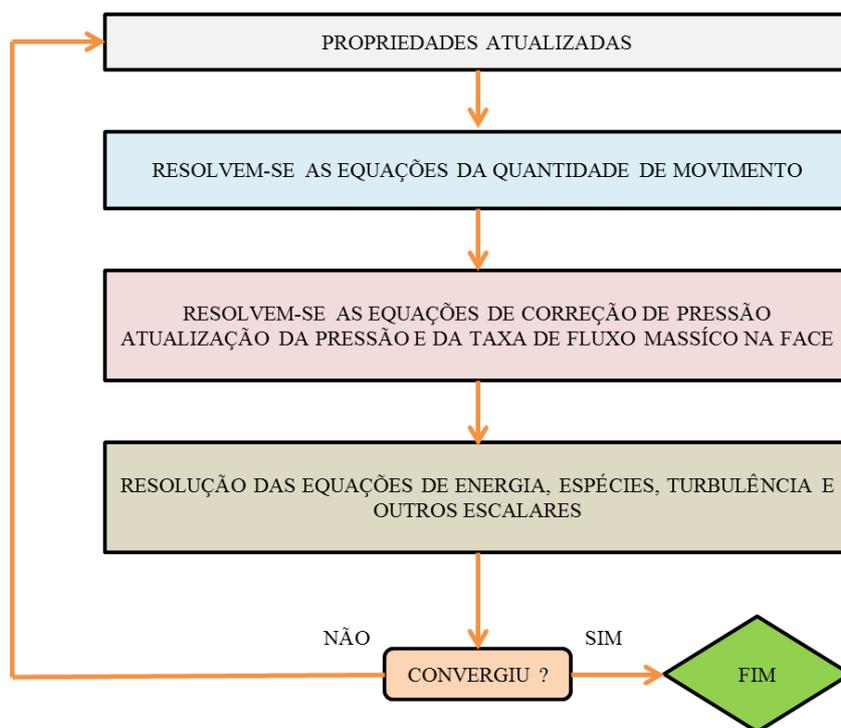


Figura 5.8 – Algoritmo de solução segregada (Adaptado de Fluent, 2007).

Em cada uma das iterações:

- As propriedades dos fluidos são atualizadas;
- As equações da quantidade de movimento são solucionadas utilizando valores atualizados para pressão e fluxos de massa na face;
- Se as velocidades obtidas em um incremento de tempo não satisfizerem a equação da continuidade localmente, então é gerada uma equação para a correção da pressão, a partir da equação da continuidade e das equações do movimento linearizadas. Esta equação de correção de pressão é então resolvida para obter as correções necessárias de pressão e do perfil de velocidade e o fluxo de massa na face, até o ponto de chegar atender à continuidade.

5.6 Acoplamento Pressão-Velocidade

A solução segregada das equações de conservação da quantidade de movimento e da massa, para problemas incompressíveis, gera o problema do acoplamento pressão-velocidade. Neste sentido é preciso encontrar um procedimento sequenciado e iterativo (algoritmo) que melhore a estimativa do campo de pressão de modo que o campo de velocidades se aproxime progressivamente da solução que satisfaça a equação da continuidade na forma discretizada (Versteeg e Malalasekera, 1995).

Os campos de velocidades podem ser avançados no tempo empregando a equação da conservação da quantidade de movimento. Já o campo de pressões não possui uma equação que relacione o seu avanço no tempo. Lembrando que a equação da conservação da quantidade de massa é somente uma restrição a ser obedecida pelo campo de velocidades e não serve de evolução de nenhuma variável no tempo (Dos Santos, 2011; Maliska, 2004).

No presente estudo é empregado o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*). Esse algoritmo é análogo ao SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) no qual relaciona a correção do campo de velocidades com a correção do campo de pressões a partir da equação da conservação da quantidade de movimento, mas com um passo a mais de correção das variáveis. Essa correção é aplicada a fim de garantir a conservação de massa.

5.7 Método Geo-Reconstruction

Conforme apresentado em Gomes (2010), no método de reconstrução geométrica (Geo-Reconstruction), os esquemas de interpolação padrão do FLUENT são usados para obter o fluxo nas faces sempre que um volume esta completamente preenchido com uma fase ou outra, cuja interface é representada na Fig. 5.9. Quando o volume esta perto da interface entre as duas fases o esquema de reconstrução geométrica é utilizado. O esquema de reconstrução geométrica representa a interface entre os fluidos utilizando a aproximação *piecewise-linear*.

Ainda de acordo com Gomes (2010), considera-se nesse método que a interface dos dois fluidos tem uma inclinação linear na célula, gerada a partir de uma interpolação linear, dentro de cada volume. Essa inclinação é usada para cálculo do fluxo de advecção do fluido pelas faces do volume de controle.

Inicialmente é realizado o cálculo da posição da interface linear relativa ao centro do volume de controle parcialmente preenchido, isso baseado na informação sobre a fração volumétrica.

Na segunda etapa é calculado o montante de advecção do fluido de cada uma das faces, usando informações sobre a distribuição de velocidades nas faces.

Finalmente, a terceira etapa consiste no cálculo da fração de volume em cada volume de controle usando o balanço de fluxos calculados na etapa anterior.

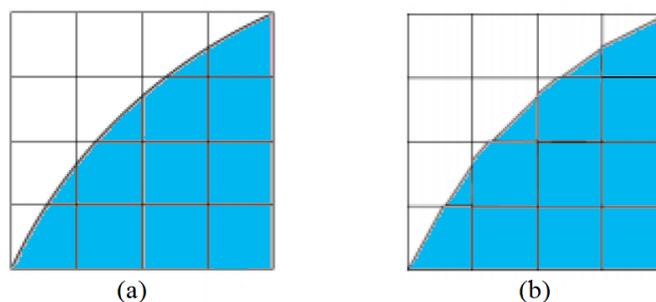


Figura 5.9 – (a) Interface Real e (b) Interface Geo-Reconstruction (Adaptado de Fluent, 2007).

5.8 Procedimentos Numéricos

O solver empregado é baseado na pressão e todas as simulações foram realizadas com esquema de advecção *Upwind* de primeira ordem e PRESTO (*Pressure Staggering Option*) para as discretizações espaciais do termo advectivo da equação da conservação da quantidade de movimento e pressão, respectivamente. O acoplamento pressão-velocidade é realizado pelo método PISO (Versteeg e Malalasekera, 1995). O método Geo-reconstruction (Gomes, 2010; Iahnke, 2010) foi utilizado para a determinação da superfície ocupada pela água. Além disso, fatores de sub-relaxação de 0,3 e 0,7 foram empregados para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, respectivamente. Esta metodologia numérica já foi validada no estudo de Goulart (2014) e anteriores, por exemplo, Gomes (2010), Lopes (2012), Machado (2012), Grimmier (2013).

As soluções foram consideradas convergidas quando os resíduos para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento nas direções x e y foram menores do que 10^{-6} .

Um aspecto muito importante a ser considerado em simulações numéricas é o tipo de discretização espacial empregado ao domínio analisado. A discretização empregada possui grande importância para uma predição adequada dos escoamentos simulados, bem como, no esforço computacional requerido para a realização destas simulações. Este último aspecto é muito importante no presente trabalho, visto que trata-se aqui de um estudo de avaliação geométrica e são requeridas várias simulações para tal estudo. Sendo assim, a etapa de geração da malha tem se tornado muito importante e diversas recomendações a respeito da sua construção têm sido realizadas (Santos, 2008).

A Figura 5.10 ilustra a malha empregada no presente trabalho, a mesma utilizada em Goulart (2014), e também as condições de contorno empregadas no domínio.

Assim, em Gomes *et al.* (2012) é apresentada uma recomendação para geração da malha, na qual consiste em se adotar na região da superfície livre elementos com dimensões equivalentes a $H/20$ na direção z (perpendicular ao sentido de propagação do escoamento) e 50 volumes por comprimento de onda (λ) na direção x (na direção principal de propagação do escoamento). Porém, neste trabalho o número de volumes na direção z na região da superfície livre foi de $H/30$ na direção z e de 70 volumes por comprimento de onda na direção x . Esse maior refinamento foi empregado devido à interação existente entre o escoamento da onda e a rampa do dispositivo de galgamento. Além disso, foi empregado um refinamento maior perto das paredes devido aos maiores gradientes do campo de velocidades nessas regiões, sendo gerados aproximadamente 120000 volumes finitos. Esse tipo de malha com elementos retangulares foi empregado pela primeira vez em Goulart (2014). Nos trabalhos de Iahnke (2010) e Machado (2012) as malhas empregadas eram irregulares com elementos triangulares e se adaptavam mais facilmente ao domínio computacional empregado. A vantagem do emprego de malhas regulares com volumes retangulares é evitar efeitos numéricos como falsa difusão sobre a solução das variáveis primárias do problema.

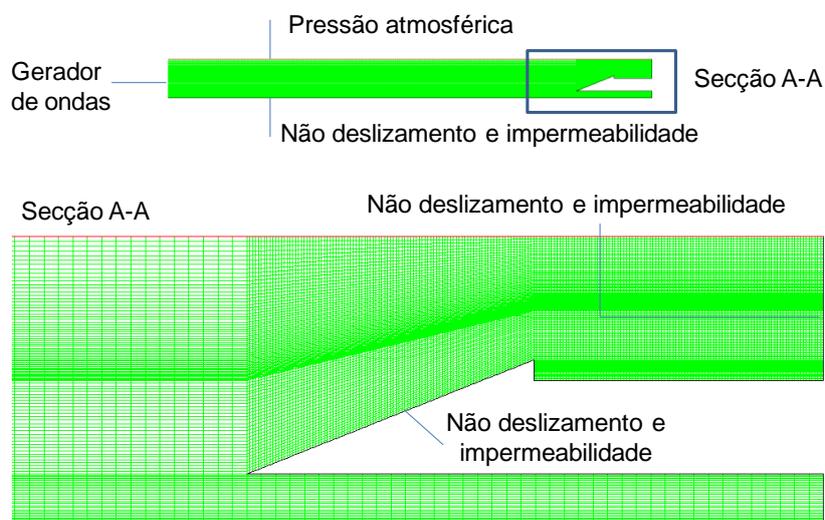


Figura 5.10 – Discretização espacial aplicada ao dispositivo de galgamento *onshore* em escala real.

Assim como no trabalho de Goulart (2014), para determinação da discretização espacial a ser empregada, foi realizado um estudo de independência do passo de tempo, visto que se trata de um problema transiente. Para este estudo foram realizadas quatro (4) simulações variando apenas o passo de tempo. Assim foi investigada a influência desse passo de tempo sobre a altura da superfície livre da onda. Em todas as simulações o tempo final foi

de $t_f = 100,0$ s. Os seguintes passos de tempo foram avaliados: $\Delta t = 5,0 \times 10^{-3}$ s, $\Delta t = 1,0 \times 10^{-2}$ s, $\Delta t = 2,0 \times 10^{-2}$ s e $\Delta t = 4,0 \times 10^{-2}$ s. A Figura 5.11 mostra o comportamento transiente da superfície livre da onda para os vários passos de tempo. Foi possível observar que para valores de $\Delta t \leq 2,0 \times 10^{-2}$ s todos os passos de tempo empregados conduziram a resultados altamente concordantes. Para $\Delta t = 4,0 \times 10^{-2}$ s é possível observar que houve uma defasagem com relação ao tempo e também um amortecimento na magnitude da onda. Consequentemente, foi adotado nas simulações posteriores de avaliação geométrica o passo de tempo de $\Delta t = 2,0 \times 10^{-2}$ s, visto que o mesmo conduz a um menor esforço computacional comparado com passos de tempo menores e conduz a soluções concordantes.

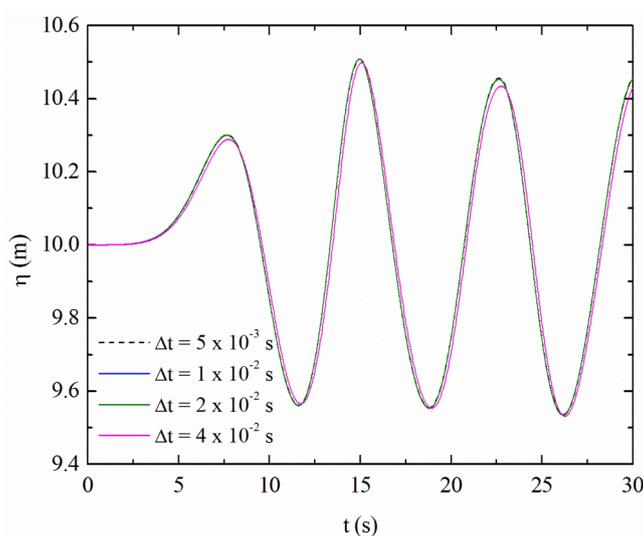


Figura 5.11 – Teste de independência do passo de tempo para as simulações realizadas.

Os valores de altura da superfície livre da onda (η) no tempo de 15,0 s para os passos de tempo estudados e suas variações são apresentados na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Valores de altura da superfície livre da onda (η) no tempo de 15,0 s para os passos de tempo estudados e suas variações.

Δt (s)	η (m)	Variação (%)
$5,0 \times 10^{-3}$ s	10,50779 m	$1,9 \times 10^{-4}$ %
$1,0 \times 10^{-2}$ s	10,50777 m	$6,6 \times 10^{-4}$ %
$2,0 \times 10^{-2}$ s	10,50770 m	$1,1 \times 10^{-1}$ %
$4,0 \times 10^{-2}$ s	10,49640 m	-

Portanto, após o estudo das discretizações espacial e temporal, foi realizada a verificação do modelo numérico empregado. Para isso, se realizou uma comparação entre a altura da superfície livre da onda obtida numericamente e medida em um ponto específico do tanque ($x = 50,0$ m) e a solução analítica descrita em Chakrabarti (2005). Essa comparação é apresentada na Fig. 5.12, a qual mostra a estabilização da solução numérica em torno de $t = 15,0$ s. Antes desse período a solução numérica capta o processo de inércia do escoamento entre o ponto de repouso do fluido e o ponto de estabilização e após sofre a incidência da onda, o que não é contemplado na solução analítica. Assim apenas o intervalo entre $15,0 \text{ s} \leq t \leq 80,0 \text{ s}$ foram considerados para a verificação da onda gerada e também a propagação dessa onda ao longo do tanque.

Analisando a diferença entre os resultados analíticos e numéricos no intervalo onde a onda estava estabilizada, o desvio médio obtido apresenta boa concordância entre os resultados.

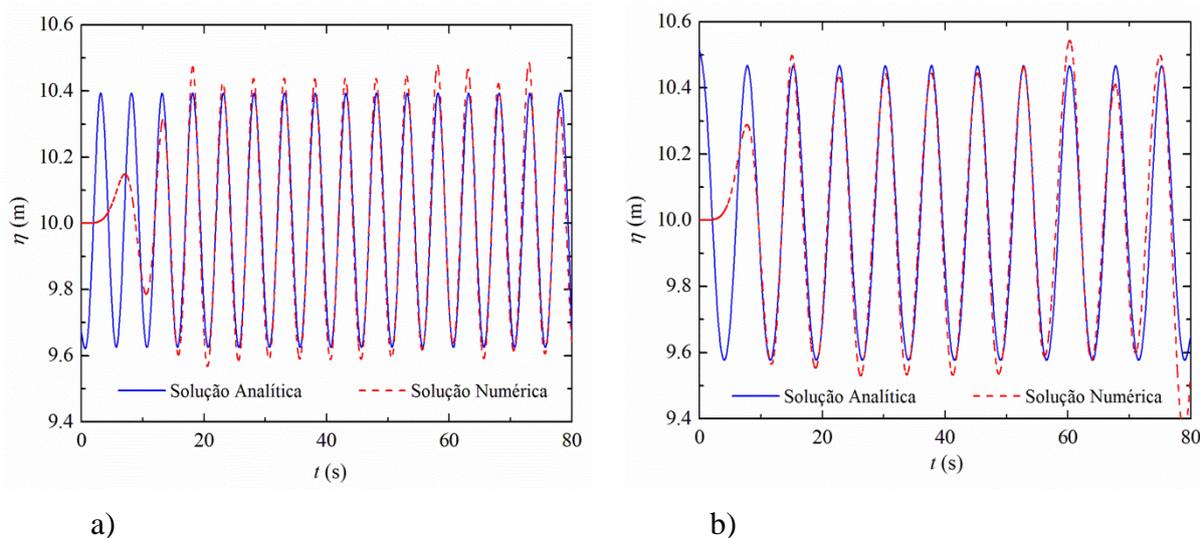


Figura 5.12 – Verificação da solução numérica com solução analítica obtida pela teoria de Stokes de 2ª Ordem: a) $T = 5,0$ s; b) $T = 7,5$ s

Finalmente, e não menos importante, as simulações foram realizadas usando um computador com dois processadores Intel dual-core com clock de 2,67 GHz e 8 GB de memória RAM. Foi empregada uma Biblioteca de Passagem de Mensagem (MPI – do inglês: *Message Passing Interface*) para paralelização. O tempo de processamento de cada simulação foi de aproximadamente $1,44 \times 10^5$ s (40 h).

Vale destacar o estudo realizado por Furich e Viegas (2015), no qual foram realizadas simulações numéricas do dispositivo de galgamento avaliado por Goulart (2014) utilizando o *software* FLUENT com a finalidade de avaliar diferentes parâmetros como: esquemas de advecção, acoplamento pressão-velocidade, esquemas de reconstrução geométrica e discretização da pressão. Portanto, com o trabalho realizado por Furich e Viegas (2015) é possível justificar a utilização do esquema de advecção *Upwind* de primeira ordem e o esquema de reconstrução geométrica *Geo-Reconstruct* no presente estudo.

Conforme o estudo de Furich e Viegas (2015), nos casos em que foram utilizados os esquemas de advecção *Upwind* de primeira ordem e *Power Law*, os resultados foram muito semelhantes. Porém, para o esquema de advecção *Upwind* de segunda ordem se observou o fim abrupto da simulação, é possível que a divergência começa a ocorrer quando o escoamento da onda incide sobre a rampa do dispositivo de galgamento. Já para o esquema de advecção *Upwind* de terceira ordem, houve um comportamento não físico seguido de divergência nas simulações para instantes de tempo muito curtos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo de avaliação geométrica (método Design Construtal), e otimização (método de Busca Exaustiva) de diferentes áreas de construção de um dispositivo de galgamento a fim de se obter a maior potência disponível (P_d). Para isso, foram analisadas duas diferentes frações de área ($\phi = 0,006$ e $0,024$), diferentes submersões do dispositivo ($S = 3,5$ m, $S = 4,0$ m, $S = 4,5$ m, $S = 5,0$ m, $S = 5,5$ m, $S = 6,0$ m e $S = 6,5$ m) e várias razões de H_1/L_1 , além da avaliação de duas diferentes ondas monocromáticas: 1) $\lambda = 36,6$ m e $T = 5,0$ s; 2) $\lambda = 65,4$ m e $T = 7,5$ s. Devido a restrição do problema, mencionada no capítulo 4, $(S + H_1) > (h + H/2)$ a crista da onda não pode ultrapassar a máxima altura do dispositivo. Portanto, as razões de H_1/L_1 foram limitadas a valores os quais fizessem com que as alturas h_a sejam maiores do que $0,5$ m, ou seja, valores superiores a metade da altura da onda ($H/2$). Entretanto, foram mantidos constantes a profundidade da lâmina de água ($h = 10,0$ m) e a altura da onda ($H = 1,0$ m).

Além disso, as simulações para $\phi = 0,012$, estudadas anteriormente por Goulart (2014), foram repetidas (devido a utilização de teorias de ondas diferentes: no presente estudo a teoria Stokes de 2ª Ordem e em Goulart (2014) a teoria de Airy) e complementadas com a finalidade de verificação e comparação dos resultados. Por fim, todos os resultados obtidos foram comparados a fim de obter uma recomendação teórica para construção de um dispositivo de galgamento *onshore*.

A Figura 6.1 apresenta o comportamento instantâneo da água no dispositivo de galgamento para três razões de H_1/L_1 ($(H_1/L_1)_o = 0,49$, $H_1/L_1 = 0,54$ e $H_1/L_1 = 0,60$) sobre a vazão mássica (\dot{m}) e a altura da água acumulada no interior do reservatório (h_a), para $\phi = 0,006$, $S = 4,5$ m e $T = 7,5$ s.

Na Figura 6.1a é possível observar que para todos os casos os picos de vazão mássica começaram a ocorrer em um instante de tempo de aproximadamente $t \sim 53,0$ s, com exceção do caso $H_1/L_1 = 0,49$, no qual o galgamento inicial ocorreu em um instante de tempo anterior ($t \sim 45,0$ s), ou seja, para uma onda incidente anterior. Para $(H_1/L_1)_o = 0,49$ a maior magnitude foi observada em $t \sim 97,4$ s e seu valor foi $\dot{m} = 1177,36$ kg/s, enquanto que para os casos $H_1/L_1 = 0,54$ e $0,60$ os maiores galgamentos ocorreram no instante de tempo $t \sim 60,2$ s com magnitudes de $\dot{m} = 720,87$ kg/s e $\dot{m} = 334,85$ kg/s, respectivamente. Portanto, os resultados mostram que a geometria possui uma grande influência sobre a magnitude da vazão mássica instantânea. Além disso, após a ocorrência do primeiro galgamento, todas as

ondas que incidiram no dispositivo tiveram energia suficiente para realizar o galgamento. Isso pode ser comprovado pelos intervalos entre cada ocorrência do fenômeno. Os mesmos apresentam uma periodicidade próxima a do período da onda ($T = 7,5$ s) com uma defasagem muito pequena entre os picos de cada caso.

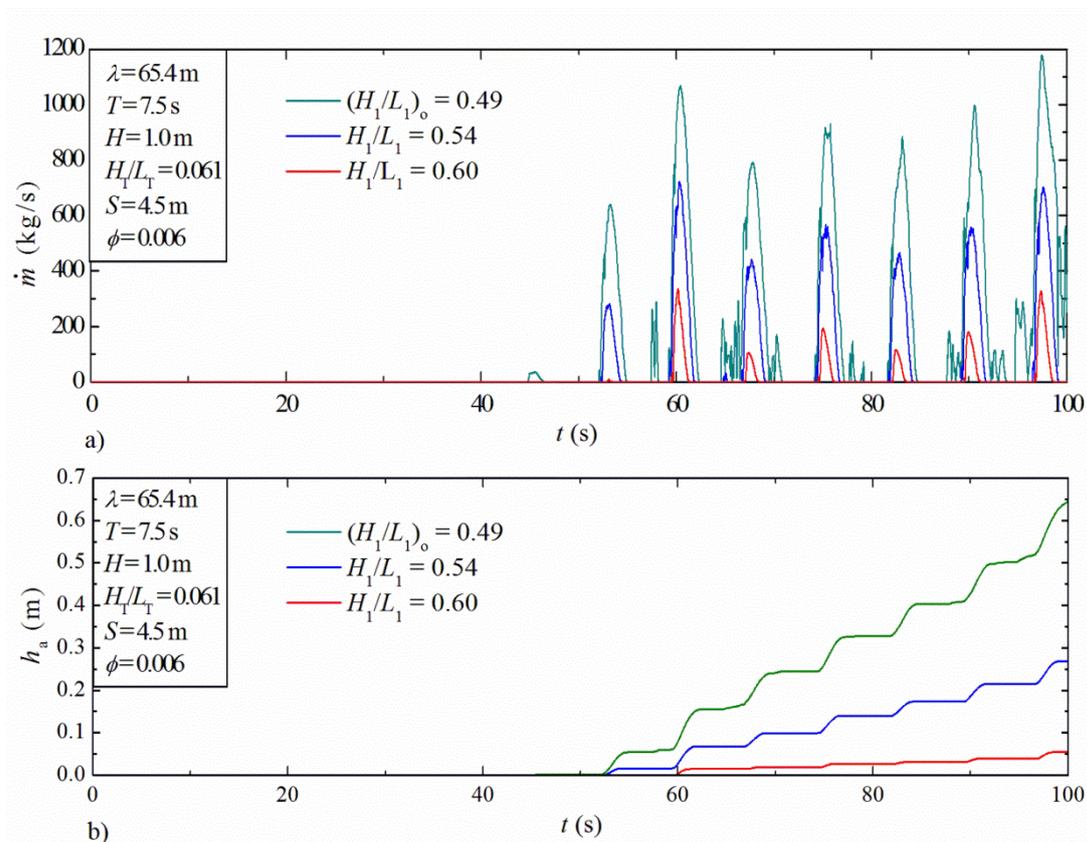


Figura 6.1 – Comportamento instantâneo da água no dispositivo de galgamento para três razões de H_1/L_1 : a) Vazão mássica, b) Altura da água acumulada no interior do reservatório.

Já na Figura 6.1b se observa a altura da água acumulada no interior do reservatório (h_a), assim, os valores de h_a foram: $h_a = 0,6461$ m ($(H_1/L_1)_o = 0,49$), $h_a = 0,2685$ m ($H_1/L_1 = 0,54$) e $h_a = 0,0547$ m ($H_1/L_1 = 0,60$).

A Figura 6.2 apresenta o comportamento transiente hidrodinâmico do escoamento da água para o melhor e pior caso mostrados na Fig. 6.1, para isso, foi adotado o intervalo de tempo de $79 \text{ s} \leq t \leq 86 \text{ s}$. A Figura 6.2a apresenta a melhor razão H_1/L_1 ($(H_1/L_1)_o = 0,49$) e a Figura 6.2b mostra a pior razão H_1/L_1 ($H_1/L_1 = 0,60$). Além disso, pode-se observar o comportamento de quebra das ondas, quando se atinge o dispositivo de galgamento. É possível observar que a quebra da onda é o tipo rebentação progressiva

(*spilling*), devido à inclinação suave da rampa. Destacando que este tipo de quebra da onda ocorreu em todos os casos simulados.

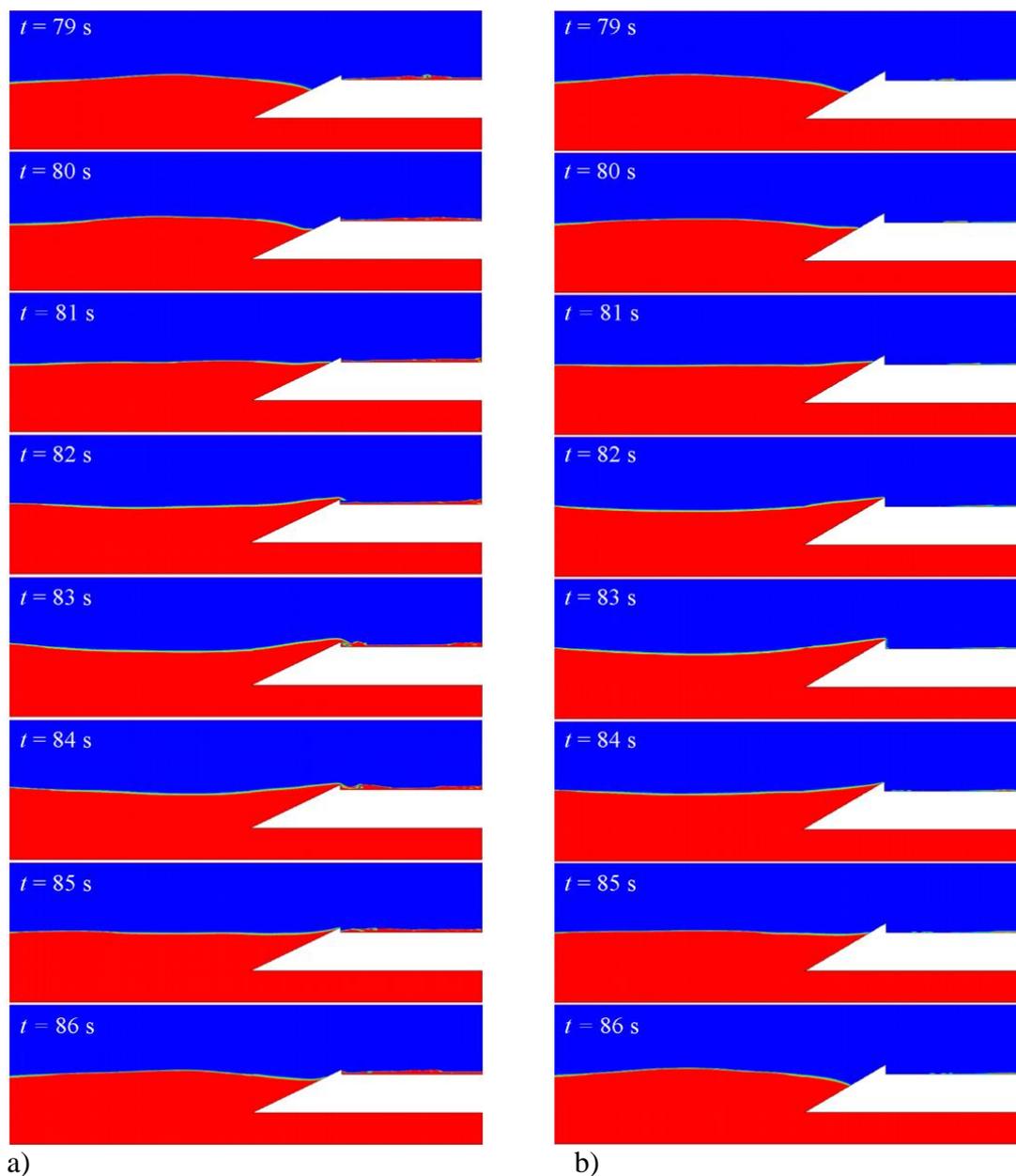


Figura 6.2 – Comportamento transiente hidrodinâmico do escoamento da água para $S = 4,5$ m, $\phi = 0,006$ e $T = 7,5$: a) razão ótima $(H_1/L_1)_o = 0,49$; b) pior razão $H_1/L_1 = 0,60$.

Observa-se ainda na Fig. 6.2 que a rampa, para a razão ótima ($(H_1/L_1)_o = 0,49$), tem uma menor inclinação facilitando desta forma a entrada de água no reservatório.

6.1 Resultados para Período de Onda Igual a $T = 5,0$ s

A Figura 6.3 apresenta o efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível por metro de frente de onda (P_d) a partir da quantidade total de massa de água acumulada no reservatório ao longo do intervalo de tempo analisado ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,006$ e $T = 5,0$ s. Pode ser observado que para cada altura S do dispositivo temos diferentes faixas de aplicação do dispositivo, ou seja, valores para a razão H_1/L_1 onde ocorre galgamento. O comportamento do efeito de H_1/L_1 sobre a potência disponível (P_d) foi semelhante ao observado em Goulart (2014) para um dispositivo duas vezes maior, isto é, para $\phi = 0,012$. A potência disponível máxima obtida foi de $P_{dm} = 100,69 \text{ W/m}$ ao longo do tempo, e se deu para $S = 4,5 \text{ m}$ e para a razão ótima de $(H_1/L_1)_o = 0,46$. Além disso, vale destacar que para cada curva de S apresentada, as maiores magnitudes foram obtidas para as menores razões H_1/L_1 avaliadas, sendo essas razões denominadas de uma vez otimizada.

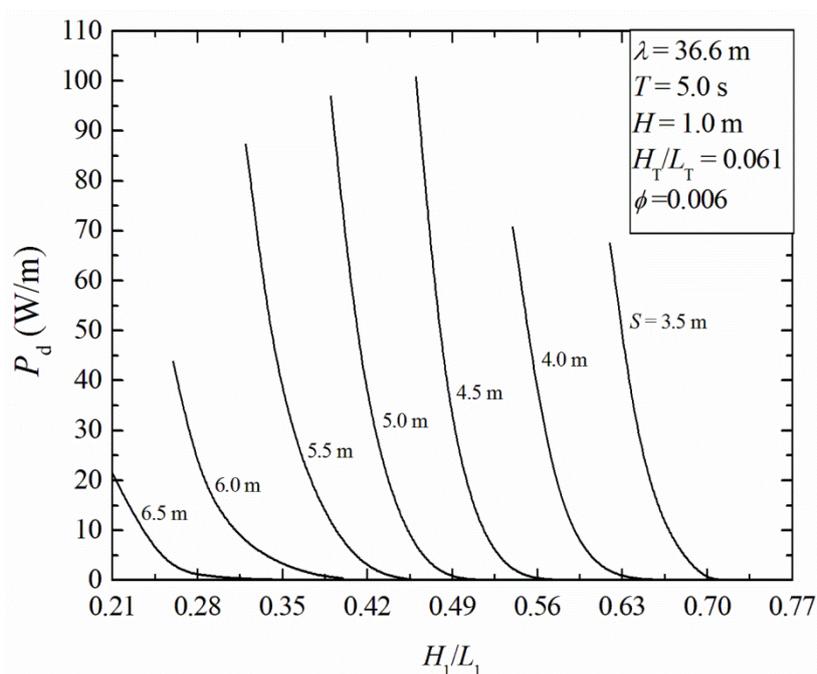


Figura 6.3 – Efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível P_d ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,006$ e $T = 5,0$ s.

Os resultados ótimos obtidos, observados na Fig. 6.3, são mostrados de forma compilada na Fig. 6.4, onde se observa o efeito da submersão S sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$).

Observa-se que o efeito de S sobre a potência disponível uma vez maximizada é diferente do obtido em Goulart (2014) para uma área duas vezes maior, ou seja, $\phi = 0,012$. O caso de $\phi = 0,006$ apresentou uma profundidade S ótima intermediária, a qual conduziu a um melhor desempenho do dispositivo, ao contrário do observado em Goulart (2014) onde a profundidade que conduziu ao melhor desempenho foi o extremo inferior de S (menor profundidade).

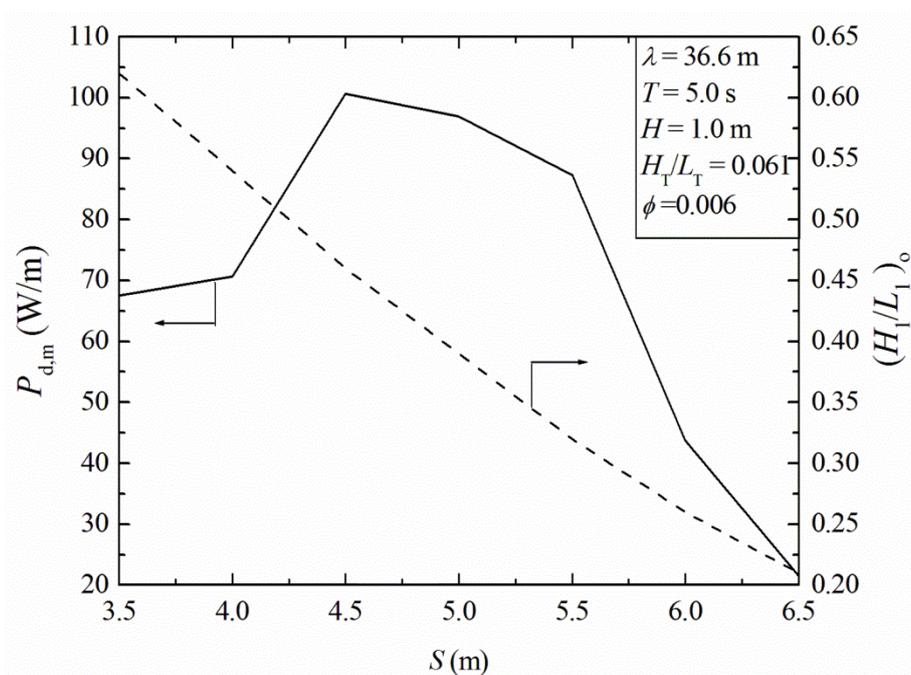


Figura 6.4 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$) para $\phi = 0,006$

Ainda na Figura 6.4 pode ser visto que a altura do dispositivo se mostrou inversamente proporcional à razão $(H_1/L_1)_o$. Para valores de S na faixa de $3,5 \text{ m} \leq S \leq 5,5 \text{ m}$, a variação de $(H_1/L_1)_o$ é praticamente linear e para $S > 5,5 \text{ m}$ há uma leve tendência a estabilizar. Esse efeito pode estar relacionado ao aumento da dificuldade da onda em galgar o dispositivo a partir de um determinado valor de S (neste caso $S = 5,5 \text{ m}$). Dessa forma, a modificação do posicionamento do dispositivo no tanque de ondas teve influência significativa sobre a geometria ótima (razão H_1/L_1) que conduz ao melhor desempenho do dispositivo, ou seja, a geometria da rampa se adapta ao afundamento do dispositivo.

Vale destacar também que quanto menor a submersão S do dispositivo, maior deve ser a razão mínima de H_1/L_1 para que o mesmo atue como um dispositivo de galgamento. Para o caso com $\phi = 0,006$ o aumento da razão H_1/L_1 para as menores magnitudes de S foi o

responsável pelo pior desempenho em comparação com os maiores valores de S , onde a razão H_1/L_1 mínima foi menor.

A Figura 6.5 apresenta o efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível por metro de frente de onda (P_d) ao longo do intervalo de tempo analisado ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,012$ e $T = 5,0 \text{ s}$. A potência disponível máxima obtida foi de $P_{dm} = 87,03 \text{ W/m}$ ao longo do tempo, e se deu para $S = 3,5 \text{ m}$ e para a razão ótima de $(H_1/L_1)_o = 0,31$. Assim como ocorreu no caso anterior, o comportamento do efeito de H_1/L_1 sobre a potência disponível (P_d) foi semelhante ao observado em Goulart (2014) para o mesmo dispositivo, isto é, para $\phi = 0,012$. Porém, neste caso os valores para submersão de $S = 6,5 \text{ m}$ foram insignificantes e, portanto, foram desprezados. Vale destacar que o comportamento do efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível obtido para $\phi = 0,012$ foi semelhante ao alcançado para $\phi = 0,006$.

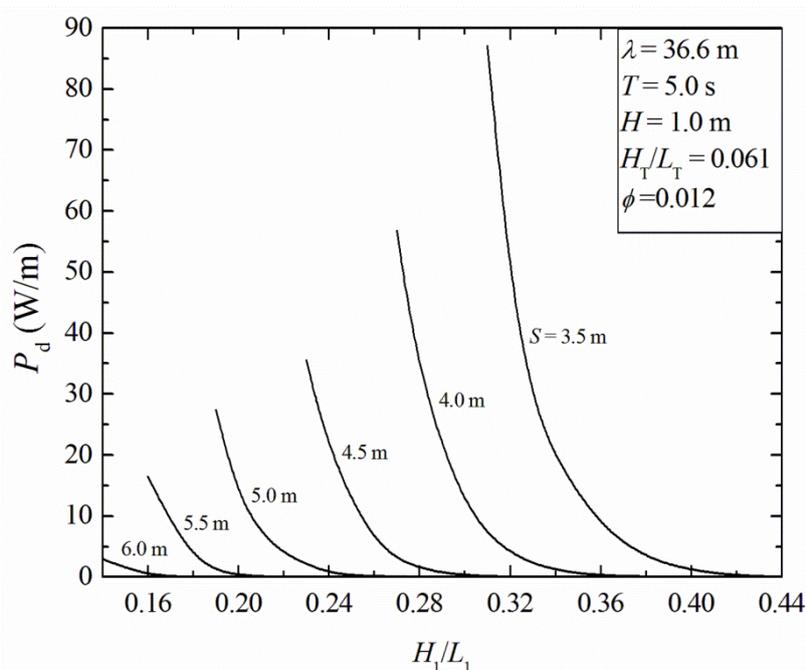


Figura 6.5 – Efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível P_d ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,012$ e $T = 5,0 \text{ s}$

Os resultados ótimos obtidos, observados na Fig. 6.5, são mostrados de forma compilada na Fig. 6.6, onde se observa o efeito da submersão S sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$). Observa-se neste caso que a potência disponível uma vez maximizada aumenta conforme se diminui a submersão S do dispositivo, ao contrário do que foi observado para $\phi = 0,006$, onde a potência disponível uma vez maximizada foi obtida para uma profundidade S intermediária. Assim,

para $\phi = 0,012$ os resultados indicam que a submersão S tem uma maior influência do que para $\phi = 0,006$, onde o $(H_1/L_1)_o$ também tem uma grande influência no efeito de S sobre $P_{d,m}$.

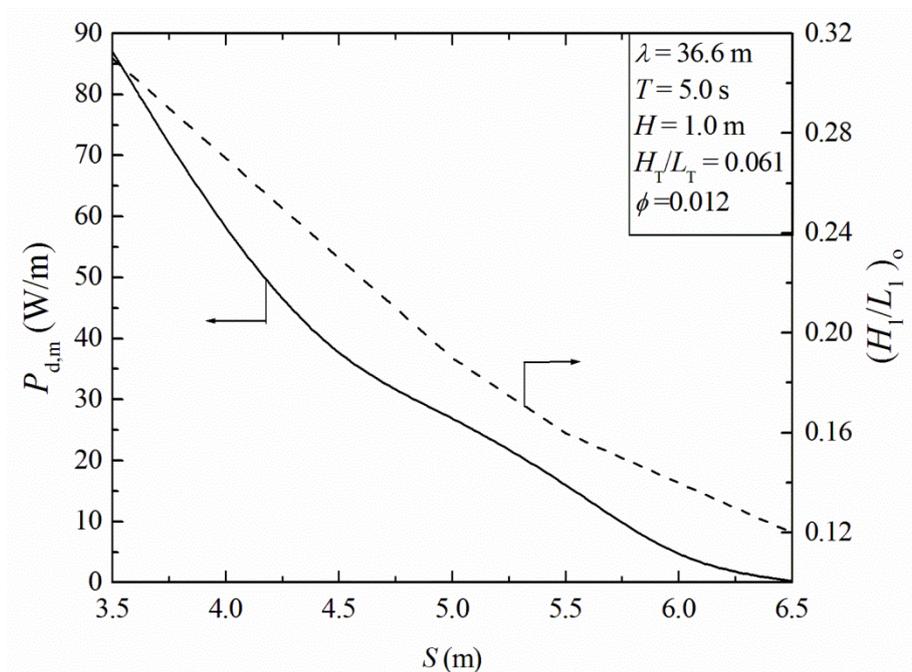


Figura 6.6 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada ($P_{d,m}$) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$) para $\phi = 0,012$.

A Figura 6.6 ilustra ainda, como no caso anterior, que a altura do dispositivo se mostrou inversamente proporcional à razão $(H_1/L_1)_o$. Para valores de S na faixa ($3,5 \text{ m} \leq S \leq 5,0 \text{ m}$) a variação de $(H_1/L_1)_o$ é praticamente linear e para $S > 5,0 \text{ m}$ a taxa de decréscimo da razão $(H_1/L_1)_o$ é suavizada. Esse efeito pode estar relacionado ao aumento da dificuldade da onda em galgar o dispositivo a partir de um determinado valor de S (neste caso $S = 5,0 \text{ m}$).

A Figura 6.7 apresenta o efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível por metro de frente de onda (P_d) ao longo do intervalo de tempo analisado para $\phi = 0,024$ e $T = 5,0 \text{ s}$. O comportamento do efeito de H_1/L_1 sobre a potência disponível (P_d) foi semelhante aos casos anteriores ($\phi = 0,006$ e $0,012$). A potência disponível máxima obtida foi de $P_{d,m} = 15,57 \text{ W/m}$ ao longo do tempo, e se deu para $S = 3,5 \text{ m}$ e para a razão ótima de $(H_1/L_1)_o = 0,155$. Neste caso os valores para submersão de $S = 5,5 \text{ m}$, $S = 6,0 \text{ m}$ e $S = 6,5 \text{ m}$ foram insignificantes e, portanto, foram desprezados. Os resultados indicaram que a área construída para a rampa do dispositivo não apresenta influência no efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível do dispositivo. Conseqüentemente, os resultados fornecem como recomendação teórica a construção de dispositivos com a menor razão possível de H_1/L_1 , com base nos casos

estudados e considerando as restrições impostas. Cabe destacar também, que para o valor de $\phi = 0,024$, não houve galgamento para magnitudes de $S > 5,0$ m.

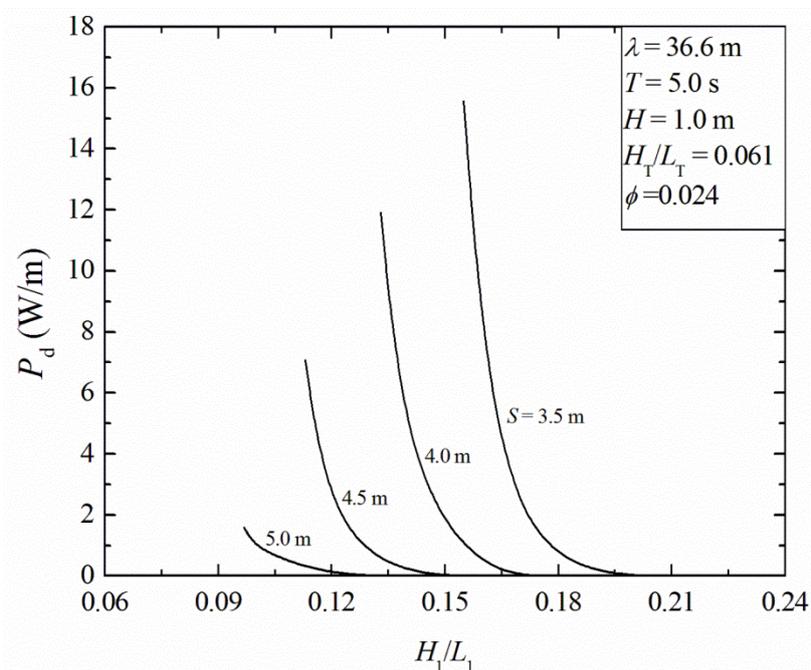


Figura 6.7 – Efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível P_d ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,024$ e $T = 5,0 \text{ s}$

Os resultados ótimos obtidos, observados na Fig. 6.7, são mostrados de forma compilada na Fig. 6.8, onde se observa o efeito da submersão S sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$).

Neste caso também se observa que a potência disponível uma vez maximizada aumenta conforme se diminui a submersão S do dispositivo. Além disso, em comparação com os casos anteriores, observa-se que a queda de P_{dm} com o aumento de S foi mais abrupta onde praticamente não há galgamento, ou seja, a partir de $S > 5,0$ m.

A Figura 6.8 ilustra ainda, como no caso anterior, que a altura do dispositivo se mostrou inversamente proporcional à razão $(H_1/L_1)_o$. Para valores de S na faixa ($3,5 \text{ m} \leq S \leq 4,5 \text{ m}$) a variação de $(H_1/L_1)_o$ é praticamente linear.

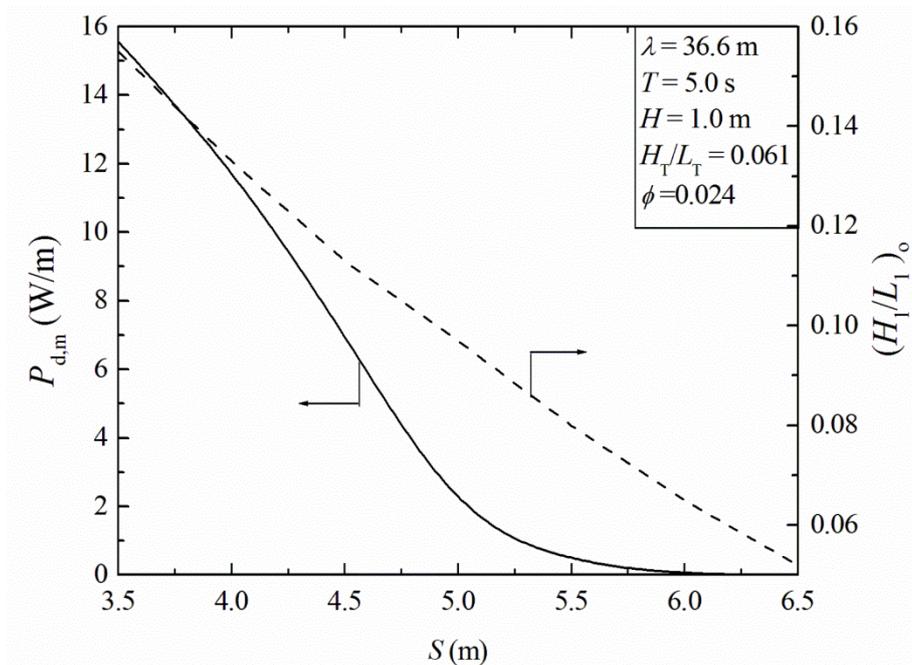


Figura 6.8 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada ($P_{d,m}$) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$) para $\phi = 0,024$.

6.2 Resultados para Período de Onda Igual a $T = 7,5$ s

A Figura 6.9 apresenta o efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível por metro de frente de onda (P_d) ao longo do intervalo de tempo analisado ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,006$ e $T = 7,5$ s. Pode ser observado que para cada altura S do dispositivo temos diferentes faixas de aplicação do dispositivo, ou seja, valores para a razão H_1/L_1 onde ocorre galgamento. O comportamento do efeito de H_1/L_1 sobre a massa de água galgada foi semelhante ao observado em Goulart (2014) para um dispositivo duas vezes maior, isto é, para $\phi = 0,012$. Além disso, vale destacar que a potência disponível apresentada é proporcional a massa de água galgada, desta forma foi possível montar uma analogia com o trabalho de Goulart (2014).

A potência disponível máxima obtida foi de $P_{d,m} = 817,45$ W/m ao longo intervalo de tempo analisado e se deu para $S = 4,5$ m e para a razão ótima de $(H_1/L_1)_o = 0,49$. Além disso, vale destacar que para cada curva S apresentada, as maiores magnitudes foram obtidas para as menores razões H_1/L_1 avaliadas, sendo essas razões denominadas de uma vez otimizada.

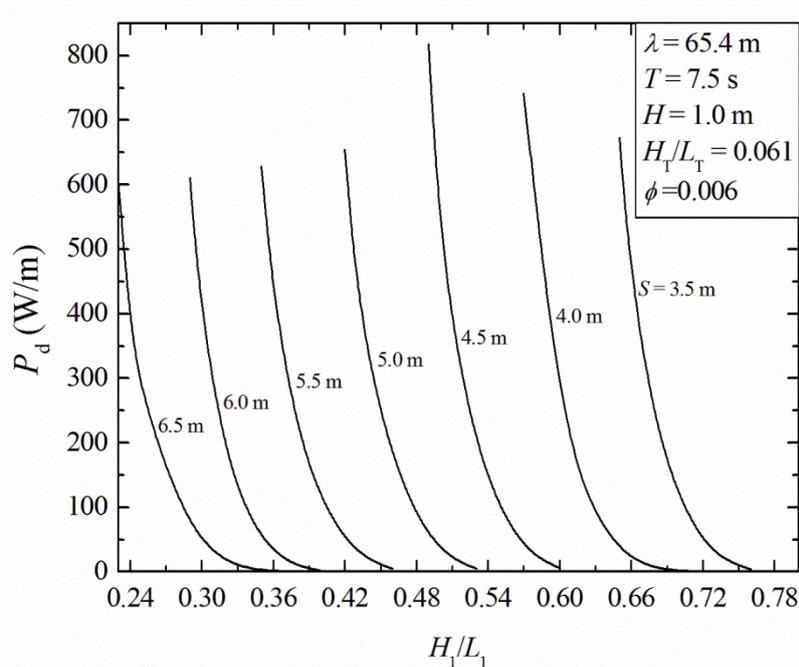


Figura 6.9 – Efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível P_d ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,006$ e $T = 7,5 \text{ s}$.

Os resultados ótimos obtidos, observados na Fig. 6.9, são mostrados de forma compilada na Fig. 6.10, onde se observa o efeito da submersão S sobre a potência disponível uma vez maximizada ($P_{d,m}$) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$).

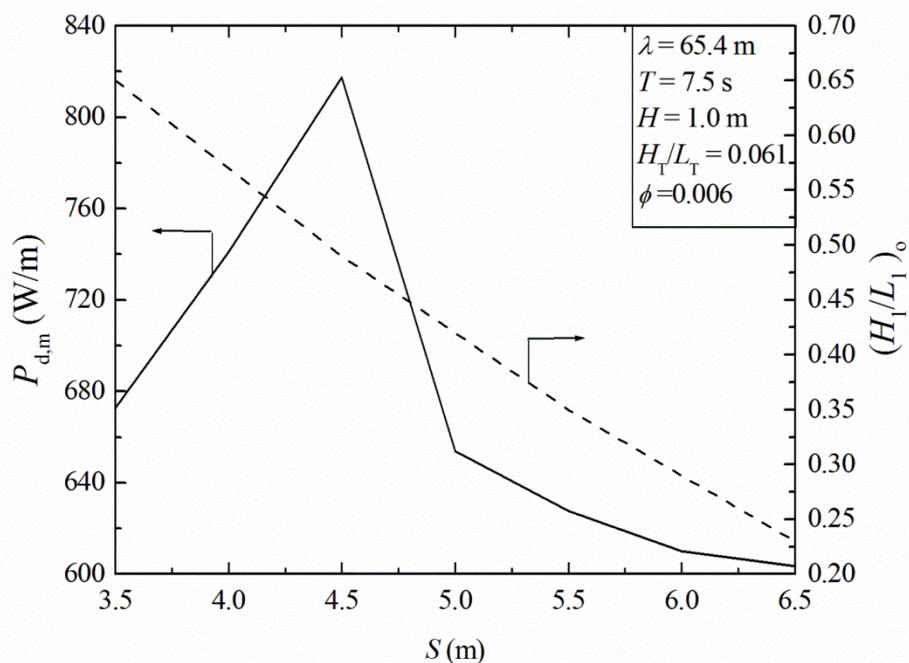


Figura 6.10 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada ($P_{d,m}$) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$) para $\phi = 0,006$.

É importante destacar que, o comportamento do efeito de S sobre P_{dm} é semelhante tanto para uma onda com período $T = 5,0$ s como para período $T = 7,5$ s. Dessa forma, há uma indicação de que, independente da condição de onda a qual o dispositivo é submetido, para menores áreas construídas deve ser avaliada a submersão S e a razão H_1/L_1 que, combinadas, conduzem ao melhor desempenho.

Portanto, como ilustra a Figura 6.10, a modificação do posicionamento do dispositivo no tanque de ondas teve influência significativa sobre a geometria ótima (razão H_1/L_1) que conduz ao melhor desempenho do dispositivo, ou seja, a geometria da rampa se adapta ao afundamento do dispositivo, como acontece para o período $T = 5,0$ s.

As simulações realizadas anteriormente por Goulart (2014) para $\phi = 0.012$ foram repetidas aqui com uma teoria de ondas diferente, porém foram realizadas mais algumas simulações complementares. Observou-se que, mesmo sendo empregada uma teoria de ondas diferente da imposta por Goulart (2014) na superfície do gerador de ondas, os resultados para a potência disponível seguem a mesma tendência da massa de água galgada no dispositivo.

A Figura 6.11 apresenta o efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível por metro de frente de onda (P_d) ao longo do intervalo de tempo analisado ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,012$ e $T = 7,5$ s. Assim como para $\phi = 0,006$, as maiores magnitudes foram obtidas no extremo inferior das razões H_1/L_1 avaliadas. A potência disponível máxima obtida foi de $P_{dm} = 1149,85 \text{ W/m}$ ao longo do tempo, e se deu para $S = 3,5 \text{ m}$ e para a razão ótima de $(H_1/L_1)_o = 0,31$.

Um ponto que merece destaque é o fato de que para o período $T = 5,0$ s a potência disponível máxima foi obtida para o menor valor de ϕ (0,006). Porém, para o período $T = 7,5$ s já é possível construir uma rampa com uma área maior ($\phi = 0,012$), a qual conduziu a uma potência disponível maior. Portanto, ocorreu uma mudança na maior potência disponível conforme o tipo de onda incidente.

Os resultados ótimos obtidos, observados na Fig. 6.11, são mostrados de forma compilada na Fig. 6.12, onde se observa o efeito da submersão S sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$) para uma onda com período $T = 7,5$ s e $\phi = 0,012$.

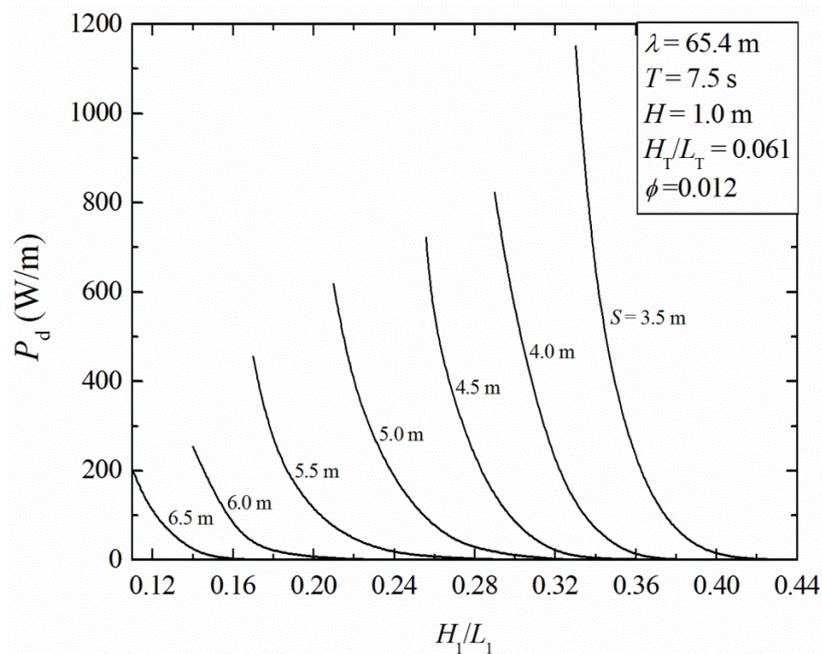


Figura 6.11 – Efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível P_d ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,012$ e $T = 7,5 \text{ s}$.

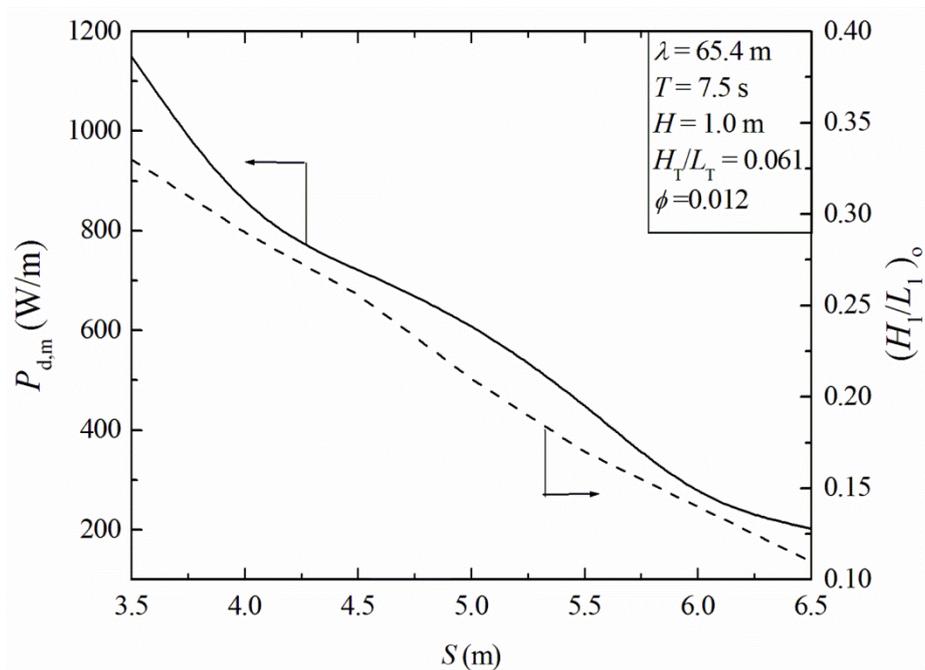


Figura 6.12 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada ($P_{d,m}$) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$) para $\phi = 0,012$.

Como nos casos anteriores, a altura do dispositivo se mostrou inversamente proporcional à razão $(H_1/L_1)_o$, conforme pode ser observado na Fig. 6.12.

A Figura 6.13 apresenta o efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível por metro de frente de onda (P_d) ao longo do intervalo de tempo analisado ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,024$ e $T = 7,5 \text{ s}$. A potência disponível máxima obtida foi de $P_{d,m} = 661,89 \text{ W/m}$ ao longo do tempo, e se deu para $S = 3,5 \text{ m}$ e para a razão ótima de $(H_1/L_1)_o = 0,16$.

Os resultados ótimos obtidos, observados na Fig. 6.13, são mostrados de forma compilada na Fig. 6.14, onde se observa o efeito da submersão S sobre a potência disponível uma vez maximizada ($P_{d,m}$) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$).

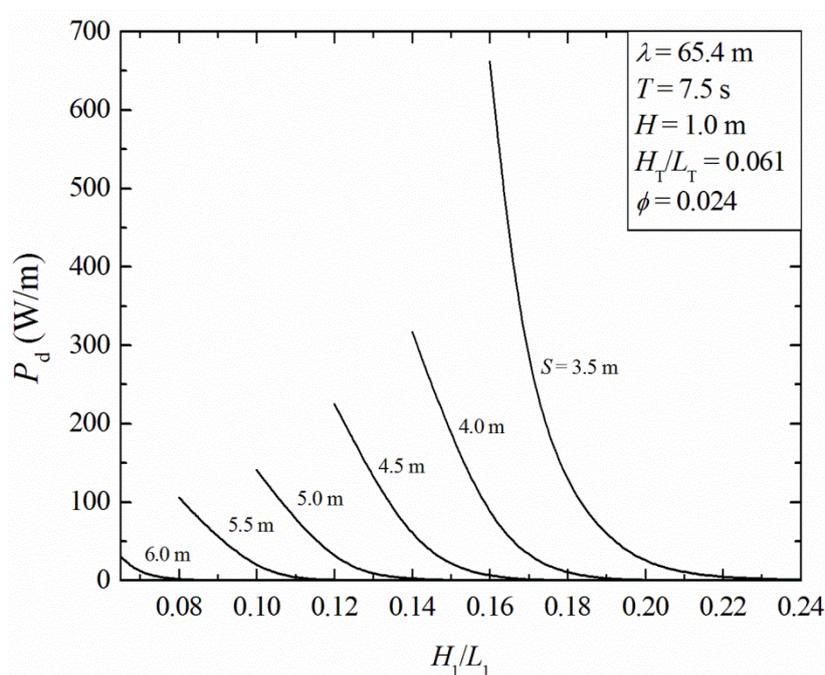


Figura 6.13 – Efeito da razão H_1/L_1 sobre a potência disponível P_d ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$) para $\phi = 0,024$ e $T = 7,5 \text{ s}$.

Observa-se, de uma forma geral, que a mudança de período T de onda incidente não apresentou uma influência significativa nos efeitos da razão H_1/L_1 sobre a P_d e sobre a submersão S sobre $P_{d,m}$ e a razão $(H_1/L_1)_o$.

Na Figura 6.14 é possível observar ainda que a tendência foi a mesma observada para todos os casos anteriores, ou seja, quanto maior o valor de S (menor submersão do dispositivo) é recomendada a construção de rampas com uma razão (H_1/L_1) menor.

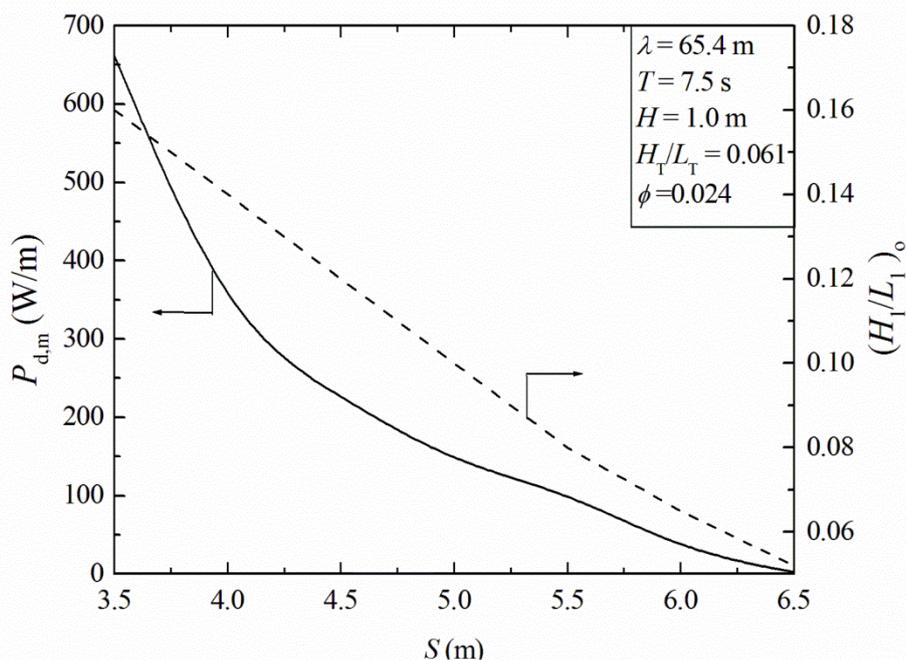


Figura 6.14 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) e sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$) para $\phi = 0,024$.

6.3 Avaliação do Efeito das Diferentes Áreas de Construção Sobre o Desempenho e Forma Geométrica do Dispositivo

A Figura 6.15 ilustra o efeito de S sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) para os três diferentes valores de ϕ estudados no presente trabalho ($\phi = 0,006, 0,012$ e $0,024$) na simulação do escoamento com onda $T = 5,0$ s. Os resultados indicam que o comportamento de S sobre P_{dm} foi influenciado pela variação de ϕ , ou seja, a melhor recomendação geométrica é dependente da escala de construção do dispositivo. É possível observar também que a potência disponível duas vezes maximizada (P_{dmm}) não se encontra na submersão $S = 3,5$ m e $\phi = 0,006$, mas em $S = 4,5$ m para o mesmo valor de ϕ . Portanto, P_{dmm} é igual a $100,69$ W/m, então $(H_1/L_1)_{oo}$ é igual a $0,46$ para $S_o = 4,5$ m e $\phi = 0,006$.

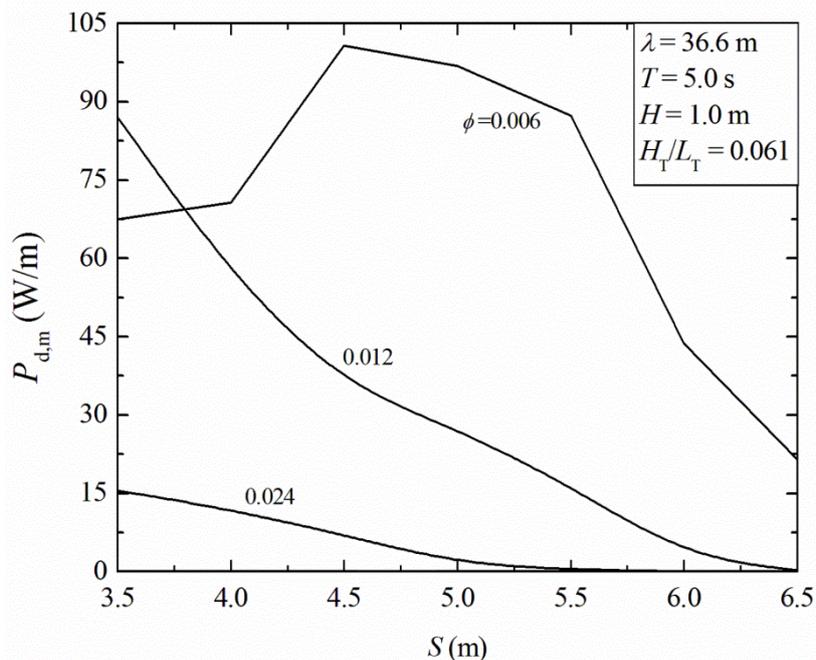


Figura 6.15 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada ($P_{d,m}$) para $\lambda = 36,6$ m e $T = 5,0$ s.

A Figura 6.16 ilustra o comportamento transiente hidrodinâmico do escoamento da água para $T = 5,0$ s e $\phi = 0,006$, com a finalidade de se obter uma resposta para o comportamento da correspondente curva apresentada na Fig. 6.15 para $\phi = 0,006$, onde o dispositivo com maior submersão não conduziu a maior magnitude de $P_{d,m}$. É possível analisar na Fig. 6.16a que a rampa do dispositivo apresenta uma geometria próxima a um quebra mar, dificultando desta forma o galgamento da água. Isso ocorre pois o dispositivo é submerso e a geometria apresentada com $(H_1/L_1)_o = 0,62$ foi a mínima possível para o dispositivo atender a restrição mínima de altura. Na rampa apresentada na Fig. 6.16c o dispositivo está muito sobre-elevado e mesmo com uma razão muito pequena de $(H_1/L_1)_o$ a onda não tem energia suficiente para galgar grandes quantidades de água. Logo, a geometria mais próxima do ideal a fim de facilitar o galgamento da onda, neste caso, é o da rampa apresentada na Fig. 6.16b.

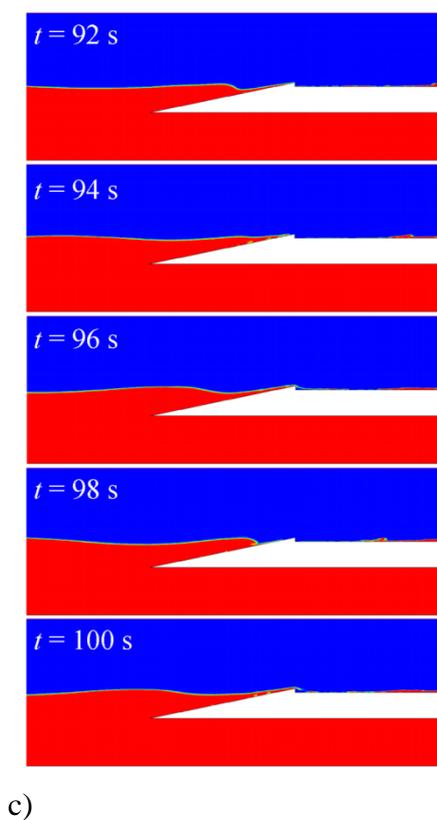
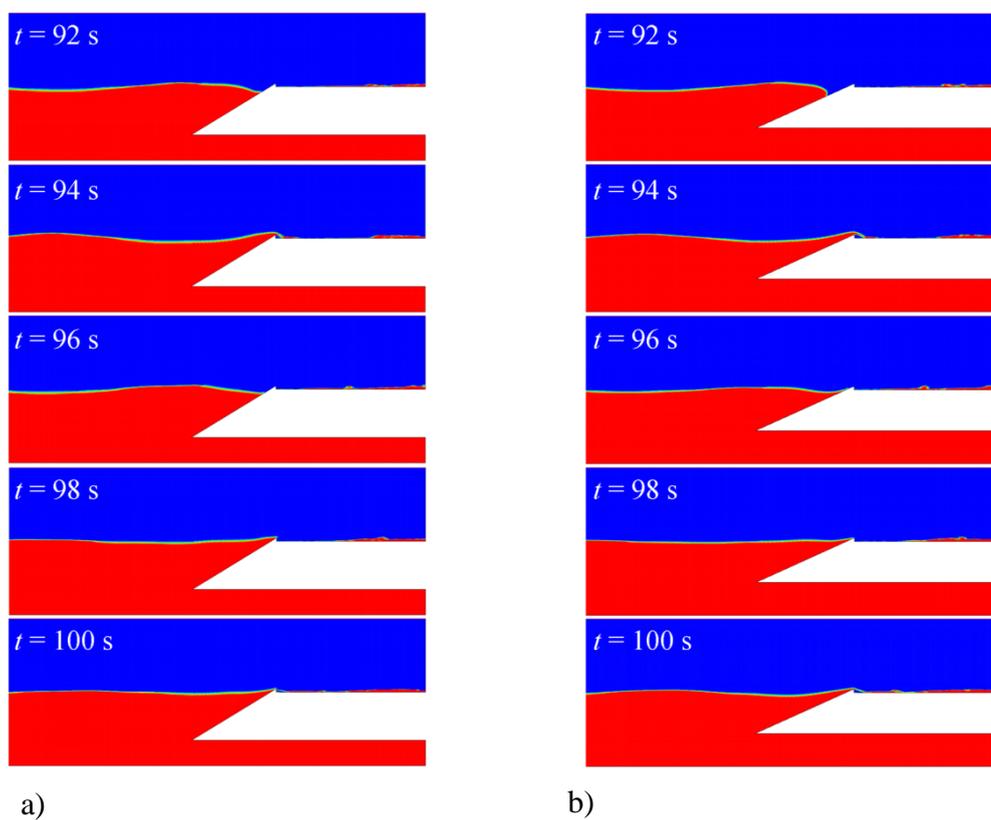


Figura 6.16 – Comportamento transiente hidrodinâmico do escoamento da água para $T = 5,0$ s e $\phi = 0,006$: a) $S = 3,5$ m e $(H_1/L_1)_0 = 0,62$, b) $(S)_0 = 4,5$ m e $(H_1/L_1)_{00} = 0,46$, c) $S = 6,5$ m e $(H_1/L_1)_0 = 0,21$.

A Figura 6.17 ilustra o efeito de S sobre a razão $(H_1/L_1)_o$ para os três valores de ϕ (0,006, 0,012 e 0,024) e $T = 5,0$ s. Os resultados mostram que o comportamento de $(H_1/L_1)_o$ em função de S é semelhante para as três frações de área ϕ , ou seja, a razão de $(H_1/L_1)_o$ decresce com o afundamento do dispositivo. Conseqüentemente, para todas as razões de ϕ estudadas foi observado que não há uma geometria ótima universal (que seja melhor para todas áreas de construção) e que dispositivos com maior submersão requerem rampas com maior altura para que ainda se tenha altura para acúmulo de massa e conversão da energia potencial da água acumulada no reservatório do dispositivo de galgamento.

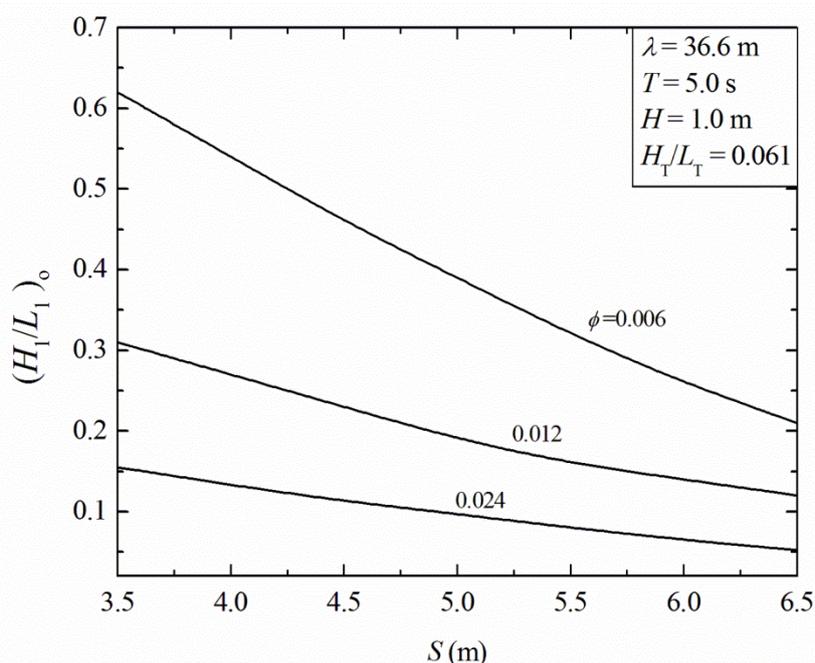


Figura 6.17 – Efeito de S sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada $(H_1/L_1)_o$ para $\lambda = 36,6$ m e $T = 5,0$ s.

A Figura 6.18 ilustra o efeito de S sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) para os três diferentes valores de ϕ estudados no presente trabalho ($\phi = 0,006, 0,012$ e $0,024$) na simulação do escoamento com onda $T = 7,5$ s. Assim como caso de período $T = 5,0$ s, os resultados indicam que o comportamento de S sobre P_{dm} foi influenciado pela variação de ϕ , portanto, a melhor recomendação geométrica é dependente da escala de construção do dispositivo. Porém, neste caso, se observa que a potência disponível duas vezes maximizada (P_{dmm}) ocorreu na submersão $S = 3,5$ m, mas para $\phi = 0,012$. Portanto, P_{dmm} é igual a 1149,85 W/m, onde $(H_1/L_1)_{oo}$ é igual a 0,33 para $S_o = 3,5$ m e $\phi = 0,012$.

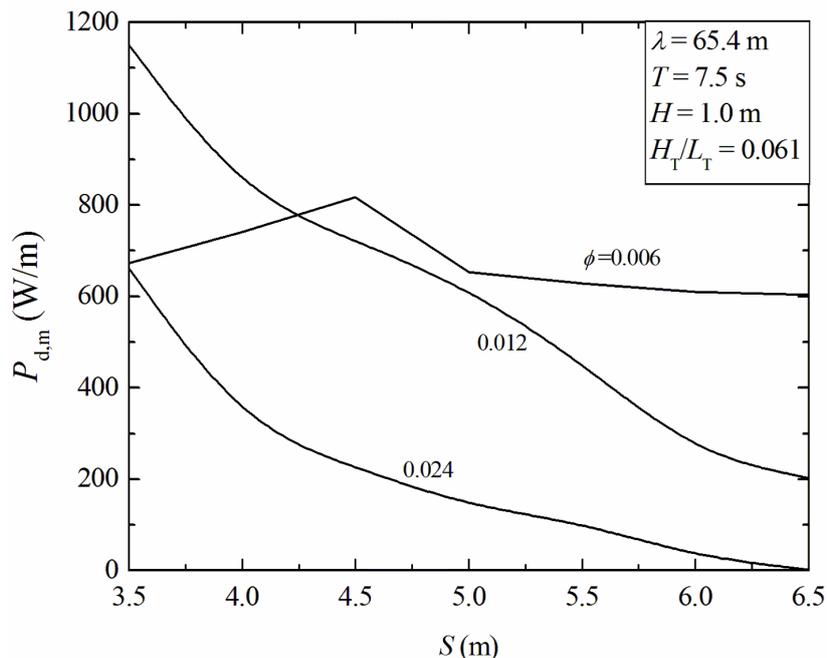


Figura 6.18 – Efeito da profundidade (S) sobre a potência disponível uma vez maximizada (P_{dm}) para $\lambda = 65,4$ m e $T = 7,5$ s.

É importante destacar que com o aumento da energia da onda (T maior), o dispositivo com menor área deixou de ser o melhor. Assim, a dimensão do dispositivo também deve ser avaliada em função do clima de ondas, visto que não há uma área de construção que leve ao melhor desempenho para os diferentes tipos de ondas estudados.

A Figura 6.19 mostra o comportamento transiente hidrodinâmico do escoamento da água para $T = 7,5$ s e $S = 3,5$ m, para as três diferentes frações de área ϕ ($\phi = 0,006$, $\phi = 0,012$ e $\phi = 0,024$).

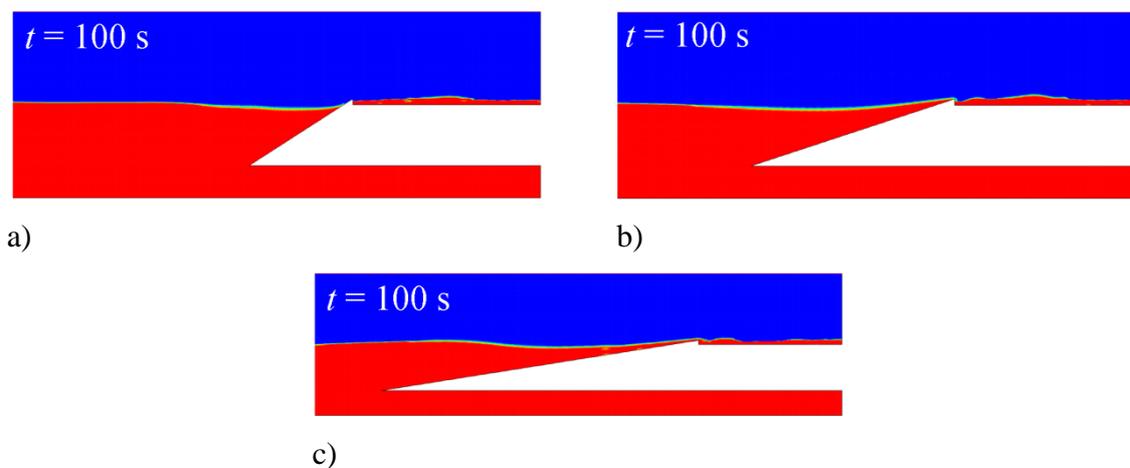


Figura 6.19 – Comportamento transiente hidrodinâmico do escoamento da água $T = 7,5$ s e $S = 3,5$ m: a) $\phi = 0,006$ e $H_1/L_1 = 0,65$, b) $\phi = 0,012$ e $H_1/L_1 = 0,33$, c) $\phi = 0,024$ e $H_1/L_1 = 0,16$.

Logo, como ocorre na Fig. 6.16, a Fig. 6.19a apresenta uma geometria próxima a um quebra mar para a rampa do dispositivo, dificultando desta forma o galgamento da água. Já a rampa apresentada na Fig. 6.19c, observa-se um efeito de praia, o qual faz com que haja uma perda de energia da onda incidente sobre a rampa. Logo, a geometria mais próxima do ideal a fim de facilitar o galgamento da onda, neste caso, é o da rampa apresenta na Fig. 6.19b, para uma fração de área $\phi = 0,012$ e uma razão $H_1/L_1 = 0,33$.

A Figura 6.20 ilustra o efeito de S sobre a razão $(H_1/L_1)_o$ para os três valores de ϕ (0,006, 0,012 e 0,024) e $T = 7,5$ s. Como ocorreu no caso de período $T = 5,0$ s, os resultados mostram que o comportamento de $(H_1/L_1)_o$ em função de S é semelhante para as três frações de área ϕ , ou seja, a razão de $(H_1/L_1)_o$ decresce com o afundamento do dispositivo. Conseqüentemente, para todas as razões de ϕ estudadas foi observado que não há uma geometria ótima universal (que seja melhor para todas áreas de construção) e que dispositivos com maior submersão requerem rampas com maior altura para que ainda se tenha altura para acúmulo de massa e conversão da energia potencial.

A Figura 6.21 ilustra o efeito da fração de área (ϕ) sobre a potência disponível duas vezes maximizada (P_{dmm}) para dois períodos de onda (T) diferentes. Portanto, pode ser visto a diferença significativa entre a potência obtida em consideração ao período de onda. Desta forma, uma onda com período maior apresenta também uma energia maior, obtendo-se assim uma maior potência no dispositivo de galgamento.

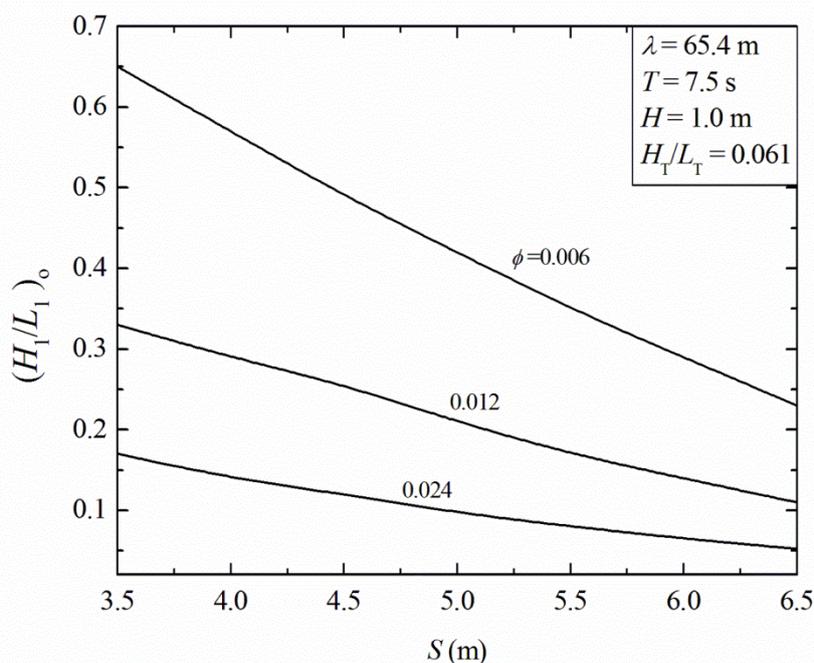


Figura 6.20 – Efeito de S sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada ($(H_1/L_1)_o$)

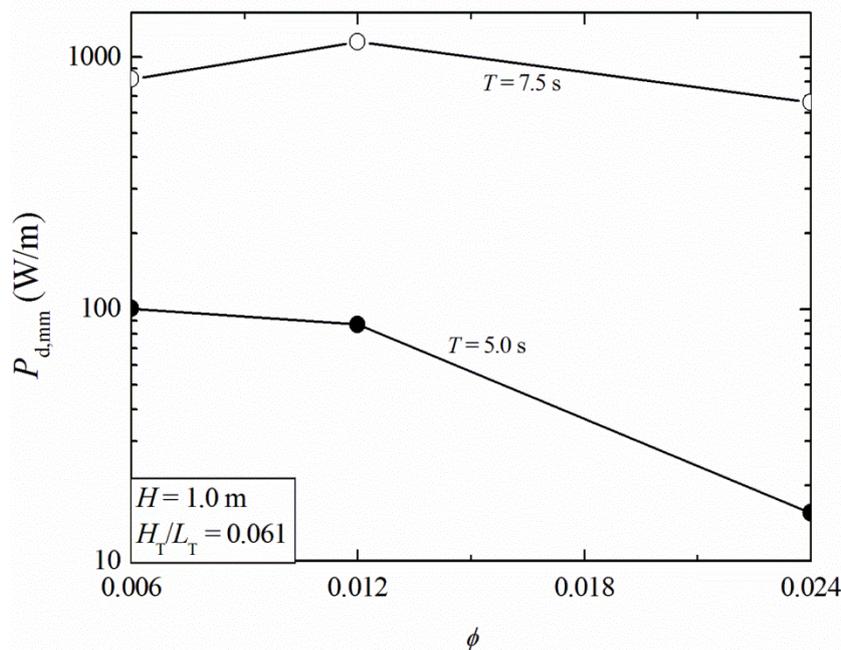


Figura 6.21 – Efeito da fração de área (ϕ) sobre a potência disponível duas vezes maximizada ($P_{d,mm}$) para dois períodos de onda (T) diferentes.

Observa-se também que apesar dos poucos pontos de comparação, para $T = 5,0$ s a menor área construída conduz ao melhor desempenho, entretanto, para o período $T = 7,5$ s a área intermediária ($\phi = 0,012$) conduziu ao melhor desempenho.

Esses resultados conduzem a recomendação de se construir um número maior de dispositivos pequenos do que a construção de um grande dispositivo nos casos onde a energia da onda incidente é menor ($T = 5,0$). Já para o período $T = 7,5$ s, o uso de uma área de construção intermediária é recomendada. Maiores estudos são necessários para avaliar alguma tendência do efeito das características da onda monocromática sobre a área que conduz ao melhor desempenho.

A Figura 6.22 ilustra o efeito da fração de área (ϕ) sobre a submersão uma vez otimizada (S_o) e sobre a razão duas vezes otimizada $(H_1/L_1)_{oo}$ para dois períodos de onda (T) diferentes. É observado que o comportamento de $(H_1/L_1)_{oo}$ em relação a ϕ é o mesmo para os dois períodos estudados ($T = 5,0$ e $7,5$ s), diferenciando-se um do outro por uma pequena diferença de valores. Já o comportamento de S_o em relação a ϕ foi idêntico para ambos os períodos estudados.

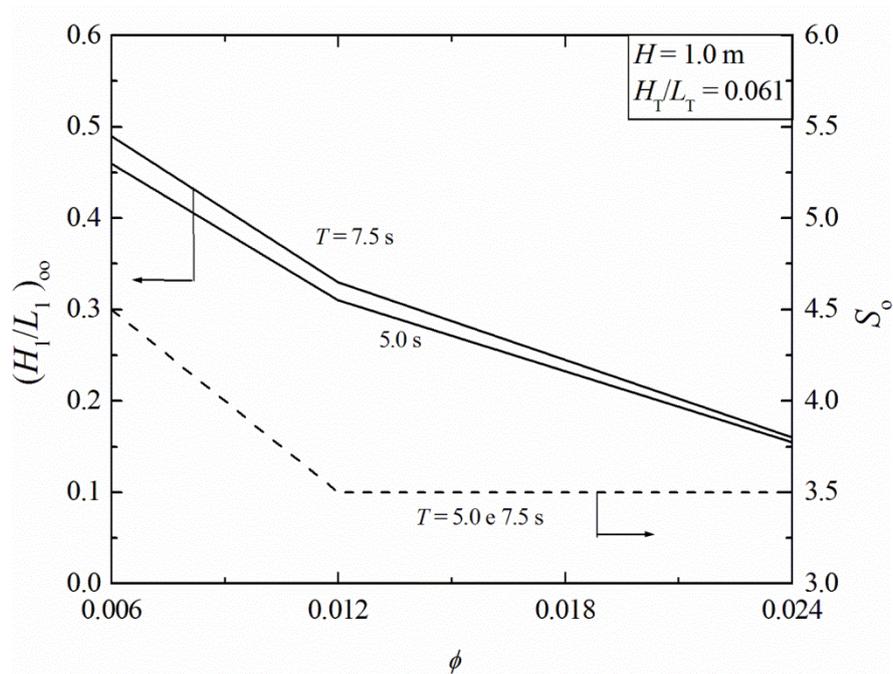


Figura 6.22 – Efeito da fração de área (ϕ) sobre a submersão uma vez otimizada (S_o) e sobre a razão duas vezes otimizada $(H_1/L_1)_{\infty}$ para dois períodos de onda (T) diferentes.

7. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico de avaliação e otimização geométrica com o objetivo de avaliar as geometrias que conduzem a uma maior potência disponível por metro de frente de onda (P_d) para um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real, para diferentes frações de área (ϕ), diferentes submersões (S) e duas diferentes ondas monocromáticas. A avaliação geométrica foi realizada através do método Design Construtal e a otimização pelo método de Busca Exaustiva.

Portanto, algumas recomendações teóricas sobre formas geométricas ótimas, as quais permitem o melhor aproveitamento da energia transportada pelas ondas quando incidem sobre a rampa do dispositivo, podem ser sugeridos. Em suma, os resultados permitiram chegar às seguintes conclusões:

- primeiramente, a geometria foi otimizada com um grau de liberdade pela variação da razão H_1/L_1 e mantendo-se fixos os parâmetros remanescentes (a submersão S , a fração de área ϕ e o período da onda T). Os resultados foram analisados em um intervalo de tempo de $0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$. Em todos os casos a potência disponível máxima obtida a partir da quantidade de água que entrou no reservatório ao longo do tempo ocorreu para as menores razões de H_1/L_1 e os piores desempenhos foram alcançados para as maiores razões de H_1/L_1 . Além disso, não houve a ocorrência de pontos ótimos locais;

- o comportamento do efeito de H_1/L_1 sobre a massa de água que entrou no reservatório foi concordante com estudos experimentais de Kofoed (2002) e o numérico realizado por Goulart (2014);

- os resultados, de uma forma geral, mostraram a aplicabilidade e a eficiência do Design Construtal na avaliação geométrica, além do uso em conjunto com um método de otimização, no caso por Busca Exaustiva, em dispositivos do tipo galgamento para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica. Por exemplo, para $\phi = 0,012$, $S = 3,5 \text{ m}$ e $T = 7,5 \text{ s}$, a potência disponível duas vezes maximizada, obtida para $(H_1/L_1)_{oo} = 0,33$, foi superior à encontrada para outros valores de ϕ ;

- menores frações de área ϕ conduzem a maiores razões de $(H_1/L_1)_o$ para o caso com $T = 5,0 \text{ s}$, enquanto que para $T = 7,5 \text{ s}$ o melhor desempenho foi obtido para uma área intermediária da rampa ($\phi = 0,012$);

- para as menores áreas construídas ($\phi = 0,006$) o dispositivo possui um melhor comportamento para profundidades intermediárias do dispositivo. Nestes casos, o

afundamento do dispositivo requer maiores razões de H_1/L_1 as quais levam o dispositivo a um comportamento semelhante a de um quebra-mar, minimizando a potência disponível no dispositivo;

- observou-se que a quebra da onda para todos os casos simulados foi do tipo rebentação progressiva (*spilling*);

- como esperado, ondas com períodos menores e, portanto, comprimento de onda menor, transportam menor energia e levam a uma menor potência disponível;

- os resultados indicaram que o efeito da razão H_1/L_1 sobre potência disponível (P_d) para $T = 5,0$ s foi semelhante ao obtido para $T = 7,5$ s;

- o efeito de ϕ sobre S_o e $(H_1/L_1)_{oo}$ também não foi afetado pela imposição de ondas monocromáticas com diferentes características.

Pode ser sugerido o estudo de outras ondas monocromáticas, outras áreas, uso de rampas bipartidas e outras propostas.

Com relação ao prosseguimento deste trabalho são propostas as seguintes análises:

- realizar um estudo empregando outras ondas monocromáticas;
- expandir a análise para outras áreas de rampa do dispositivo de galgamento;
- realizar estudos para rampa bi ou tripartidas;
- otimizar geometricamente um dispositivo de galgamento, adotando uma abordagem numérica tridimensional e comparar com abordagem numérica bidimensional com objetivo de avaliar a possibilidade de extrapolação de resultados obtidos em uma geometria bidimensional para geometria tridimensional;
- comparar os resultados obtidos entre a presente metodologia numérica com os obtidos com o software OPENFOAM, por exemplo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3. ed., Brasília., 2008. (<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>).
- ALFREDINI, P. **Ondas de Oscilação**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 3ª ed, São Paulo, 2000.
- ANDRÉ, R. A. A., 2010. **Modelo de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia do Porto, Portugal.
- BAHAJ, A. S. Generating electricity from the oceans. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 3399-3416, 2011.
- BASAK, T. The law of life: The bridge between Physics and Biology, **Physics Life Reviews**. v. 8, p. 249–252, 2011.
- BEELS, C.; TROCH, P.; DE VISCH, K.; KOFOED, J. P.; DE BACKER, G. Application of the time-dependent mild-slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of Wave Dragon wave energy converters. **Renewable Energy**, v. 35, p. 1644–1661, 2010.
- BEJAN, A. Constructal-Theory Network Of Conducting Paths For Cooling A Heat Generating Volume, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 40, No. 4, p. 799–816, 1997.
- BEJAN, A. **Shape and Structure, from Engineering to Nature**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.
- BEJAN, A.; LORENTE, S. **Design with Constructal Theory**. Wiley, Hoboken, 2008.
- BEJAN, A.; ZANE, J. **Design in nature**. Doubleday, USA, 2012.
- BORTOLI, A. L. **Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- BURKE, E. K.; KENDALL, G. Search methodologies: introductory tutorials in optimization and decision support techniques. **Springer Science & Business Media**, 2006.
- CAPEL, A. Wave run-up and overtopping reduction by block revetments with enhanced roughness. **Coastal Engineering**. v. 104, p. 76-92, 2015. (DOI: 10.1016/j.coastaleng.2015.06.007).
- CARNEIRO, M. L., 2007. **Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaio de estruturas oceânicas**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

- CHAKRABARTI, S. K. **Handbook of offshore engineering**. Vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 2005.
- COLI, A. B., 2000. **Estudo sobre o clima de ondas em Rio Grande, RS**. Dissertação de Mestrado, FURG, Rio Grande.
- CRUZ, J. M. B. P.; SARMENTO, A. J. N. A. **Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais**. Instituto do Ambiente, Amadora, p. 61, 2004.
- DA SILVA, C. C. C. ; TROIAN, S. ; ROCHA, L. A. O. ; DOS SANTOS, E. D. ; REAL, M. V.; ISOLDI, L.A. Simulação Numérica e Método Constructal Design Aplicados Ao Estudo De Placas Perfuradas De Material Compósito Submetidas À Flexão. **Revista De Engenharia E Tecnologia**, V. 7, P. 47-55, 2015.
- DEAN, R. G., DALRYMPLE, R.A. **Water wave mechanics for engineers and scientist**, vol. 2, World Scientific, Singapura, 1991.
- DOORSLAER, K. V., ROUCK, J. D., AUDENAERT, S., DUQUET, V. Crest modifications to reduce wave overtopping of non-breaking waves over a smooth dike slope. **Coastal Engineering**. v. 101, p. 69-88, 2015. (DOI: 10.1016/j.coastaleng.2015.02.004).
- DOS SANTOS, E. D., 2011. **Análise Numérica de escoamentos turbulentos não reativos com transferência de calor por convecção e radiação térmica em meios participantes**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica (PROMEC), Porto Alegre, RS, Brasil.
- DOS SANTOS, E. D., MACHADO, B. N., LOPES, N. R., SOUZA, J. A., TEIXEIRA, P. R. F., GOMES, M. N., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O.; **Constructal Design of Wave Energy Converters**, In: L. A. O. Rocha, S. Lorente, A. Bejan (Org.), *Constructal Law and the Unifying Principle of Design*, 1st Ed, Springer, pp. 275-294, 2013.
- DOS SANTOS, E. D. ; MACHADO, B. N. ; ZANELLA, M. M. ; GOMES, M. N. ; SOUZA, J. A. ; ISOLDI, L. A. ; ROCHA, L. A. O. Numerical Study Of The Effect Of The Relative Depth On The Overtopping Wave Energy Converters According To Constructal Design. **Defect And Diffusion Forum**, v. 348, pp. 232-244, 2014.
- DUARTE, C. R., 2006. **Estudo Experimental e de Simulação da Fluidodinâmica e Recobrimento em Leito de Jorro**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-Mg, 2006.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2015 – Ano base 2014: Relatório Síntese**. Rio de Janeiro, 2015. (https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2015_Web.pdf)
- ESTRADA, E. DA S. D. ; FAGUNDES, T. M. ; ISOLDI, L. A. ; DOS SANTOS, E. D. ; XIE, G. ; ROCHA, L. A. O. Constructal design associated to genetic algorithm of asymmetric v-shaped pathways. **Journal of Heat Transfer**, v. 137, p. 061010-1-061010-7, 2015.

- EXXONMOBIL. **The Outlook for Energy: A View to 2040**, 2014.
- FADAEENEJAD, M., SHAMSIPOUR, R., ROKNI, S. D., GOMES, C. New Approaches in Harnessing Wave Energy: with Special Attention to Small Islands, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, pp. 345 – 354, 2014.
- FALCÃO, A. F., Wave energy utilization: A review of the technologies, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, pp 899-918, 2010.
- FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods For Fluid Dynamics**, Springer, Berlin; 1997.
- FLEMING, F. P. **Avaliação Do Potencial De Energias Oceânicas No Brasil**, 2012.
- FLUENT **Version 6.3.16 – User’s Guide**, ANSYS Inc. 2007.
- FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos – Conceitos Básicos e Aplicações**, Edusp, São Paulo: Edusp, 2000.
- FURICH, A. S.; VIEGAS, A. R., 2015. **Estudo dos Procedimentos Numéricos para Simulação de um Dispositivo de Galgamento**, Trabalho de Conclusão de Curso, FURG, Rio Grande.
- GHOSH, T., PRELAS, M. Energy Resources and Systems. v. 2: **Renewable Resources**, Columbia, Missouri, USA. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2011.
- GRUPO DE INVESTIGAÇÃO RECONHECIMENTO – GIR. **Científicos vallisoletanos y marroquíes colaboran en el aprovechamiento energético de las olas**. Valladolid, Espanha, 2011.
- GOMES, M. N., 2010. **Modelagem computacional de um dispositivo coluna d’água oscilante para conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica**. Dissertação de Mestrado, FURG, Rio Grande.
- GOMES, M. N. ; ISOLDI, L. A. ; SANTOS, E. D. ; ROCHA, L. A. O . Análise de Malhas para Geração Numérica de Ondas em Tanques. **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM**, São Luís, Maranhão, Brasil, 2012.
- GOMES, M. DAS N., 2014. **Modelagem Computacional e Aplicação De Constructal Design Para Análise Numérica Da Geometria 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.
- GONÇALVES, A. M. **Utilização de dados de altímetro na avaliação de recursos energéticos das ondas do mar. Relatório de estágio profissionalizante**. Portugal, 2003.

- GONZALES, G. V. ; ESTRADA, E. DA S. D. ; EMMENDORFER, L. R. ; ISOLDI, L. A. ; XIE, G. ; ROCHA, L. A. O. ; DOS SANTOS, E. D. A comparison of simulated annealing schedules for constructal design of complex cavities intruded into conductive walls with internal heat generation. **Energy** v. 93, p. 372 – 382, 2015. (DOI: 10.1016/j.energy.2015.09.058).
- GOULART, M. M., 2014. **Estudo numérico da geometria de um dispositivo de galgamento onshore em escala real empregando constructal design**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- GOULART, M. M. ; MARTINS, J. C. ; ACUNHA JUNIOR, I. C. ; GOMES, M. N. ; SOUZA, J. A. ; ROCHA, L. A. O. ; ISOLDI, L. A. ; SANTOS, E. D. Constructal design of an onshore overtopping device in real scale for two different depths. **Marine Systems & Ocean Technology**, v. 1, p. 1, 2015. (DOI: 10.1007/s40868-015-0010-7).
- GREENPEACE. **Revolução Energética: A caminho do desenvolvimento limpo**. 2010. (<http://www.greenpeace.org/brasil/Global/brasil/report/2010/11/revolucaoenergeticadeslimpo.PDF>).
- GRIMMLER, J. DO A. M., 2013. **Conversor de energia das ondas em energia elétrica com dispositivo de Coluna de Água Oscilante: Simulação Numérica e estudo geométrico**. Dissertação de mestrado em modelagem computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- HAIMOHAMMADI, M.R., RAHMANI, A., CAMPO, O. JONEYDI SHARIATZADEH. Optimal design of unequal heat flux elements for optimized heat transfer inside a rectangular duct. **Energy**, v. 68, p. 609–616, 2014. (DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.011).
- HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, p. 201-225, 1981.
- HORKO, M., 2007. **CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy Converter**, School of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Computing and Mathematics, Requirements for the Degree of Master of Engineering Science, The University of Western, Australia.
- HU, Z., XUE, H., TANG, W., ZHANG, X. A combined wave-dam-breaking model for rogue wave overtopping. **Ocean Engineering**. v. 104, p. 77-88, 2015. (DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.05.009).
- IAHNKE, S. L. P., 2010. **Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento**, Dissertação de mestrado em modelagem computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- JIN, J., LIU, Z., HYUN, B. S., HONG, K. 3d Numerical Investigation On Reservoir System For An Overtopping Wave Energy Converter. **Journal of Korean Navigation and Port Research**, v. 36, p. 97–103, 2012.

- KOFOED, J. P., 2002. **Wave Overtopping Of Marine Structures: Utilization Of Wave Energy**. Phd Thesis, Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department Of Civil Engineering: Aalborg University.
- KOFOED, J. P.; FRIGAARD, P.; MADSEN, E. F.; SØRENSEN, H. C., Prototype testing of the wave energy converter wave dragon, **Renewable Energy**, v. 31, p. 181-189, 2006.
- LING, L.; YONGCAN, C.; YULIANG, L.; **Volume of fluid (VOF) method for curved free surface water flow in shallow open channel**, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing, 2001.
- LIU, Z.; HYUN B.; JIN, J. Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC, **Journal Of The Korean Society For Marine Environmental Engineering**, v. 11, n° 1, 2008a.
- LIU, Z.; HYUN B.; HONG, K. Application of Numerical Wave Tank to OWC Air Chamber for Wave Energy Conversion. **Proceedings Of The Eighteenth (2008) International Offshore And Polar Engineering Conference**, Vancouver, Canada; 2008b.
- LOPES, N. DA R., 2012. **Modelagem Computacional e Otimização Geométrica de um Conversor do tipo Coluna de Água Oscilante**, Dissertação de mestrado em modelagem computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- LÓPEZ, I., ANDREU, J., CEBALLOS, S. ALEGRÍA, I. M., KORTABARRIA, I. Review of Wave Energy Technologies and the Necessary Power-Equipment, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 413 – 434, 2013.
- LORENZINI, G. ; CORREA, R. L. ; DOS SANTOS, E. D. ; ROCHA, L. A. O. Constructal design of complex assemblies of fins. **Journal of Heat Transfer**, v. 133, p. 081902-1-081902-7, 2011a.
- LORENZINI, G. ; BISERNI, C. ; ISOLDI, L. A. ; DOS SANTOS, E. D. ; ROCHA, L. A. O. Constructal Design Applied to the Geometric Optimization of Y-shaped Cavities Embedded in a Conducting Medium. **Journal of Electronic Packaging**, v. 133, p. 041008, 2011b.
- LORENZINI, G. ; BISERNI, C. ; ESTRADA, E. D. ; ISOLDI, L. A. ; DOS SANTOS, E. D. ; ROCHA, L. A. O. Constructal Design of Convective Y-Shaped Cavities by Means of Genetic Algorithm. **Journal of Heat Transfer**, v. 136, p. 071702-071702-10, 2014.
- LV, X.; ZOU, Q.; REEVE, D. Numerical simulation of overflow at vertical weirs using a hybrid level set/VOF method, **Advances in Water Resources**. v. 34, p. 1320-1334, 2011.
- MACHADO, B. N., 2012. **Modelagem Computacional e Otimização geométrica de um dispositivo de galgamento para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica**, Dissertação de mestrado em modelagem computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**; Rio de Janeiro: LTC, 2004.

- MARGHERITINI, L.; STRATIGAKI, V.; TROCH, P. Geometry Optimization Of An Overtopping Wave Energy Device Implemented Into The New Breakwater Of The Hanstholm Port Expansion. **Twenty-Second International Offshore And Polar Engineering Conference**, p. 593-600, 2012.
- MARGHERITINI, L., VICINANZA, D. AND FRIGAARD, P. SSG wave energy converter: design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. **Renewable Energy**, v. 34, p. 1371-1380, 2009.
- MCCORMICK, M. E. **Ocean Engineering Wave Mechanics**, John Wiley & Sons, Nova York, 1973.
- MOGHIM, M. N., BOROUJENI, R. F., TABARI, M. M. R., Wave overtopping on reshaping berm breakwaters based on wave momentum flux. **Applied Ocean Research**. v. 53, p. 23-30, 2015. (DOI: 10.1016/j.apor.2015.07.008).
- NAM, B. W., SHIN, S. H., HONG, K. Y., HONG, S. W. Numerical Simulation Of Wave Flow Over The Spiral-Reef Overtopping Device. **The Eighth Isope Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium**, 2008.
- NÚCLEO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS DE ENERGIA (N3E). **Resenha Energética Brasileira**. Brasília, 2015. (<http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/Resenha+Energ%C3%A9tica+-Brasil+2015.pdf/4e6b9a34-6b2e-48fa-9ef8-dc7008470bf2>).
- ORSZAGHOVA, J., TAYLOR, P. H., BORTHWICK, A. G. L., RABY, A. C. Importance of second-order wave generation for focused wave group run-up and overtopping. **Coastal Engineering**. v. 94, p. 63-79, 2014. (DOI: 10.1016/j.coastaleng.2014.08.007).
- PAN, Y., KUANG, C. P., LI, L., AMINI, F. Full-scale laboratory study on distribution of individual wave overtopping volumes over a levee under negative freeboard. **Coastal Engineering**. v. 97, p. 11-20, 2015. (DOI: 10.1016/j.coastaleng.2014.12.007).
- PAREDES, G. M., 2008. **Estudo experimental de um sistema offshore para produção de energia das ondas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**, McGraw Hill, New York, 1980.
- PEREIRA, S. R. V. V. DA S., 2010. **Caracterização do sector dos recursos energéticos marinhos para Portugal continental**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa, Portugal.
- QUANG, T. T., VAN, T. N. Numerical study of wave overtopping on sea-dikes with crown-walls. **Journal of Hydro-environment Research**. v. 8, p. 367-382, 2014. (DOI: 10.1016/j.jher.2014.01.003).
- RICH, E.; KNIGHT, K. **Inteligência artificial**. 2.ed. São Paulo: Makron Books, 1994.

- ROCHA, L. A. O.; LORENZINI, E.; BISERNI, C. Geometric Optimization Of Shapes On The Basis Of Bejan's Constructal Theory. **International Communications In Heat And Mass Transfer**, v. 32, p. 1281–1288, 2005.
- ROMANO, A., BELLOTTI, G., BRIGANTI, R., FRANCO, L. Uncertainties in the physical modelling of the wave overtopping over a rubble mound breakwater: The role of the seeding number and of the test duration. **Coastal Engineering**. v. 103, p. 15-21, 2015. (DOI: 10.1016/j.coastaleng.2015.05.005).
- SANTOS, K. G., 2008. **Estudo da Fluidodinâmica do Leito de Jorro por CFD com Malhas Tridimensionais**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.
- SAVICKI, D. L., 2007. **Análise numérica tridimensional e investigação experimental do comportamento térmico e hidrodinâmico de reservatórios térmicos cilíndricos**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SCHLICHTING, H. **Boundary Layer Theory 7th ed.** McGraw-Hill, Nova York, USA, 1979.
- TANNEHILL, J. C.; ANDERSON, D. A.; PLETCHER, R. H.; **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**, 2. Ed., Taylor & Francis, USA, 1997.
- TEDD, J.; KOFOED, J. P. Measurements Of Overtopping Flow Time Series On The Wave Dragon, Wave Energy Converter. **Renewable Energy**, 2009. v. 34, p. 711–717.
- THORPE, T. W. **A brief review of wave energy**. Harwell Didcot Oxfordshire, UK, 1999.
- TONELLI, M., PETTI, M. Numerical simulation of overtopping at coastal dikes and low-crested structures by means of a shock-capturing Boussinesq model. **Coastal Engineering**. v. 79, p. 75-88, 2013. (DOI: 10.1016/j.coastaleng.2013.04.007).
- VICINANZA, D., CANTESTABILE, P., NORGAARD, J. Q. H., ANDERSEN, T. L. Innovative rubble mound breakwaters for overtopping wave energy conversion. **Coastal Engineering**. p. 154-170, 2014. (DOI: 10.1016/j.coastaleng.2014.02.004).
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics – the Finite Volume Method**, Longman, England, 1995.
- WAVE ENERGY (WAVEC). **Survey of Energy Resources**. World Energy Council. Elsevier, cap. 15, p. 401 – 417, 2004.
- WU, X. Z. Geometric reability analysis applied to wave overtopping of sea defences. **Ocean Engineering**. v. 109, p. 287-297, 2015. (DOI: 10.1016/j.oceaneng. 2015.09.010).
- ZHANG, D.; LI, W.; LIN, Y., Wave energy in Chine: Current status and perspectives, **Renewable Energy**, v. 34, p. 2089-2092, 2009.