

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

ESTUDO NUMÉRICO DA GEOMETRIA DE UM
DISPOSITIVO DE GALGAMENTO *ONSHORE* EM ESCALA
REAL EMPREGANDO *CONSTRUCTAL DESIGN*

por

Marcelo Moraes Goulart

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Modelagem Computacional
no Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade
Federal do Rio Grande – FURG.

Orientador: Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Co-Orientador: Prof. Dr. Liércio André Isoldi

Rio Grande, 07 de agosto de 2014.

G694e Goulart, Marcelo Moraes.

Estudo numérico da geometria de um dispositivo de galgamento
onshore em escala real empregando *constructal design* / Marcelo Moraes
Goulart. - 2014.

124 f. : Il. ; graf. + tab.

Orientador: Dr. Elizaldo Domingues dos Santos.

Co-Orientador: Dr. Liércio André Isoldi

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande/FURG,
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, 07/08/2014.

1. Modelagem computacional. 2. Galgamento. 3. Energia das ondas
do mar. 4. Volume of fluid – VOF. 4. Constructal design. I. Título.
II. Santos, Elizaldo Domingues dos. III. Isoldi, Liércio André.

CDU : 62:004

Catálogo na Fonte Cristiane Oliveira dos Santos – CRB10/1617
Biblioteca Central da FURG

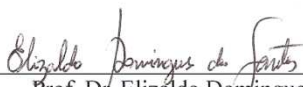
MARCELO MORAES GOULART

“ESTUDO NUMÉRICO DA GEOMETRIA DE UM DISPOSITIVO DE GALGAMENTO
ONSHORE EM ESCALA REAL EMPREGANDO CONSTRUCTAL DESIGN”

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

Aprovada em

BANCA EXAMINADORA



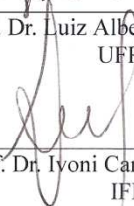
Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Orientador - FURG



Prof. Dr. Jeferson Avila Souza
FURG



Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
UFRGS



Prof. Dr. Ivoni Carlos Acunha Junior
IFRS

Rio Grande -RS
2014



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

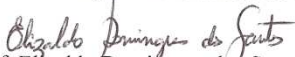
Av. Itália km 8 Campus Carreiros - CEP 96201-900 - Rio Grande/RS
E-mail: ppgmc@furg.br - Tel: (53) 3293 5055

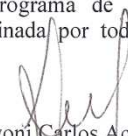


ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

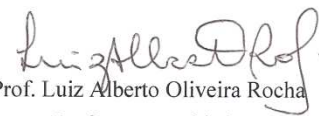
ATA Nº 8/2014

Ao sétimo dia do mês de agosto do ano de dois mil e quatorze, no Mini Auditório da Escola de Engenharia, do Campus Carreiros, da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, realizou-se a oitava sessão de defesa de dissertação do ano de dois mil e quatorze do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional. O mestrando **Marcelo Moraes Goulart** apresentou e defendeu a dissertação **Estudo Numérico da Geometria de um Dispositivo de Galgamento Onshore em Escala Real Empregando Constructal Design**, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional. A sessão foi aberta às nove horas pelo Prof. Elizaldo Domingues dos Santos, orientador da dissertação e presidente da Comissão de Avaliação. A referida Comissão esteve integrada, além do presidente e orientador, pelo Prof. Jeferson Avila Souza da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, pelo Prof. Luiz Alberto Oliveira Rocha da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, e pelo Prof. Ivoni Carlos Acunha Junior do Instituto Federal do Rio Grande do Sul - IFRS (Campus Rio Grande). Depois de cada integrante ter arguido o mestrando e este ter tido a oportunidade de responder a cada um, a Comissão reuniu-se para deliberar sobre o conceito a ser atribuído ao trabalho. A Comissão de Avaliação considerou o candidato **Aprovado** neste requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional. Após, o presidente publicou e encerrou a sessão da qual eu, Jeferson Avila Souza, na qualidade de Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, lavrei a presente ata que vai assinada por todos os membros da Comissão de Avaliação. Rio Grande, sete de agosto de 2014.


Prof. Elizaldo Domingues dos Santos
Orientador


Prof. Ivoni Carlos Acunha Junior
Membro externo


Prof. Jeferson Avila Souza
Professor convidado


Prof. Luiz Alberto Oliveira Rocha
Professor convidado


Jeferson Avila Souza
Coordenador do PPG em Modelagem
Computacional

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me proporcionado mais essa conquista em minha vida.

A todos que de alguma forma participaram e torceram pela minha vitória em especial aos meus filhos e a minha amada esposa Arlete que nas horas difíceis sempre esteve presente com uma palavra de incentivo.

A todos os mestres que colaboraram para minha formação em especial Orientador Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos pela incansável dedicação no auxílio da elaboração deste trabalho e o Co-Orientador Prof. Dr. Liércio André Isoldi que nos momentos difíceis soube mostrar um caminho.

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

RESUMO

O estudo a respeito das tecnologias e princípios de funcionamento de dispositivos de conversão de energia das ondas em energia elétrica tem crescido sensivelmente. Entre os conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica (WEC – do inglês: *Wave Energy Converter*) está o dispositivo de galgamento. O seu princípio físico 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 sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real, empregando *Constructal Design*. O principal propósito aqui é verificar quais geometrias para a rampa (razão entre a altura e comprimento da rampa: H_1/L_1) maximizam a quantidade de massa de água que entra no reservatório do dispositivo para várias distâncias entre o fundo do dispositivo e o fundo do tanque (S) onde o mesmo foi inserido. Vale destacar que, 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. Nas presentes simulações, 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). Para abordar a mistura água e ar, o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é empregado. O emprego do *Constructal Design* permitiu aumentar significativamente o desempenho fluidodinâmico do dispositivo para todas as profundidades analisadas. Os resultados mostraram que as melhores geometrias são obtidas para as menores razões de H_1/L_1 para todas as profundidades analisadas, contrariamente ao que foi observado em estudos preliminares da literatura para um dispositivo no meio do canal em escala de laboratório que simulava um dispositivo de galgamento do tipo *offshore*. Também foi observado que não há uma geometria universal ótima que conduz a maior massa de água que entra no reservatório para as várias profundidades estudadas. Neste estudo, conforme esperado, a diminuição de S conduziu a um aumento da massa de água máxima que entra no reservatório (m_m) e da razão H_1/L_1 ótima, $(H_1/L_1)_o$.

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

ABSTRACT

The study about technologies and operational principles of devices to convert wave energy into electrical one has increased significantly. Among the existing wave energy converters (WEC) is the overtopping device. Its main 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 over the performance of an onshore overtopping device in real scale by means of Constructal Design. The main purpose here is to verify the geometries for the ramp (ratio between the height and length of ramp: H_1/L_1) which maximizes the amount of water that enters into device reservoir for several distances from the bottom of the tank to the bottom of device (S) where the device is inserted. It is worthy to mention that, in this work, it is evaluated only the main operational principle of device. In this sense, the optimal geometries obtained here theoretically guides future studies and buildings 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 analyzed submergences. Results showed that the best shapes were achieved for the lowest ratios of H_1/L_1 for all analyzed depths S , contrarily to what was observed in previous studies of literature for a device in laboratory scale in the middle of a wave tank mimicking an offshore overtopping device. It was also noticed the non-occurrence of an optimal universal geometry which leads to the highest amount of water entering into reservoir for all studied depths (S). In the present study, as expected, the decrease of S led to an increase of water mass once maximized which enters into reservoir (m_m) and the increase of optimal ratio H_1/L_1 , $(H_1/L_1)_o$.

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

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. As Ondas do Mar como uma Fonte Renovável de Energia.....	7
1.2. Tecnologias de Aproveitamento da Energia das Ondas do Mar	9
1.2.1. Dispositivos de Galgamento	12
1.2.1.1. <i>Tapchan</i> (Noruega – <i>Tapered Chanel Wave Power Device</i>)	12
1.2.1.2. <i>Wave Plane</i> (Dinamarca – <i>Wave Plane Production A/S – WPP A/S</i>) .	13
1.2.1.3. <i>Wave Dragon</i> (Dinamarca – <i>Wave Dragon Aps</i>)	14
1.2.1.4. <i>Sea Slot-cone Generator</i> – SSG (Noruega – <i>Wave Energy AS</i>)	17
1.3. Objetivos	18
1.4. Revisão de Estados sobre Energia das Ondas	20
1.4.1. Estado da Arte sobre Dispositivos de Galgamento	20
1.4.2. <i>Constructal Design</i> aplicado em Dispositivos para Conversão da Energia das Ondas em Energia Elétrica	22
1.5. Organização do Texto	28
2. FUNDAMENTOS DE TEORIA DE ONDAS OCEÂNICAS	31
2.1. Introdução à Teoria das Ondas	31
2.2. Como se Formam as Ondas	31
2.3. Elementos de uma Onda	33
2.4. Teoria Linear	37
3. FUNDAMENTOS DE TEORIA CONSTRUCTAL	41
3.1. Introdução à Teoria <i>Constructal</i>	41
3.2. O Método <i>Constructal Design</i>	42
4. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MODELAGEM MATEMÁTICA	47
4.1. <i>Constructal Design</i> Aplicado ao Dispositivo de Galgamento.....	47
4.2. O modelo Multifásico <i>Volume of Fluid</i> (VOF)	49
5. MODELAGEM NUMÉRICA E PROCEDIMENTOS NUMÉRICOS	53
5.1. Modelagem Numérica	53
5.2. Método dos Volumes Finitos (MVF)	56
5.3. Discretização Temporal das Equações de Conservação	63
5.4. Tratamento dos Termos Advectivos das Equações de Conservação	65
5.5. Resolução de Equações Aplicando o Método de Solução Segregado.....	67
5.6. Acoplamento Pressão-Velocidade	68

5.7. Método <i>Geo-Reconstruction</i>	69
5.8. Procedimentos Numéricos	70
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	95
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Utilização de energia no Brasil de 1970 a 2010 (BEN, 2011).....	3
Figura 1.2 - Consumo de energia (renováveis e não renováveis) no Brasil no ano de 2013 (BEN, 2014)	4
Figura 1.3 - Distribuição fontes de energia elétrica no Brasil, em 2013 e 2012 (BEN, 2014).....	5
Figura 1.4 - Potencial de energia das ondas ao redor do mundo (Ghosh e Praelas, 2011). 8	
Figura 1.5 - Localização dos dispositivos conversores de energia das ondas (López et al., 2013).....	9
Figura 1.6 - Tecnologias de conversores de energia das ondas (Adaptado de Fadaeenejad et al., 2014).	11
Figura 1.7 - Princípio de Funcionamento do Galgamento (Li e Yu, 2012).....	12
Figura 1.8 - Dispositivo <i>Tapchan</i> : a) Ilustração do esquema de funcionamento, b) imagem real do equipamento (Pereira, 2010).....	13
Figura 1.9 - <i>Wave Plane</i> (López et al., 2013).....	14
Figura 1.10 - <i>Wave Dragon</i> – Visão Frontal (Tedd e Kofoed, 2009).	14
Figura 1.11 - Representação da secção de rampa e principais partes constituintes do <i>Wave Dragon</i> vista em corte com as suas dimensões em metros (Morais, 2009; Christensen et al., 2006)	15
Figura 1.12 - Ilustração de um dispositivo do tipo SSG: a) vista lateral, b) ilustração da instalação do dispositivo (Margheritini et al., 2009).....	17
Figura 1.13 - Dispositivo SSG: (a) turbina de 3 estágios, (b) ilustração de uma usina de geração de energia empregando o princípio SSG (Margheritini et al., 2009).....	18
Figura 1.14 - Arranjo com 5 dispositivos <i>Wave Dragon</i> instalados em um arranjo desalinhado (Adaptado de Beels et al., 2010)	22
Figura 2.1 - Elementos da Onda (Carneiro, 2007)	33

Figura 2.2 - Teoria das ondas (Carneiro, 2007).....	35
Figura 2.3 - Aplicabilidade das teorias de ondas (Chakrabarti, 2005)..	36
Figura 4.1 - Domínio computacional de um dispositivo de galgamento em escala real com dois graus de liberdades.....	48
Figura 4.2 - Ilustração do processo de otimização aplicado ao dispositivo de galgamento com dois graus de liberdade	49
Figura 5.1 - Métodos de resolução para problemas físicos (Adaptado de Maliska, 2004)	54
Figura 5.2 - Etapas da simulação numérica.....	55
Figura 5.3 - Técnica de discretização (Maliska, 2004).....	57
Figura 5.4 - Volume de controle típico (Maliska, 2004).....	58
Figura 5.5 - Volume de controle empregado em MVF para um domínio bidimensional (Adaptado de Patankar, 1980)	62
Figura 5.6 - Conexão espacial e temporal do volume P (Maliska, 2004)	63
Figura 5.7 - Tipos de formulações no tempo (Adaptado de Maliska, 2004).....	65
Figura 5.8 - Obtenção de ϕ_f em uma face do volume de controle (Adaptado de Dos Santos 2011)	67
Figura 5.9 - Algoritmo de solução segregada (Adaptado de FLUENT 6.3, 2007)	68
Figura 5.10 - (a) Interface Real e (b) Interface Geo-Reconstruction (Adaptado de FLUENT 6.3, 2007)	70
Figura 5.11 - Discretização espacial aplicada ao dispositivo de galgamento <i>onshore</i> em escala real	71
Figura 5.12 - Teste de independência do passo de tempo para as simulações realizadas	72
Figura 5.13 - Verificação da solução numérica com solução analítica obtida pela teoria linear de Airy.....	74

Figura 6.1 - Vazão mássica instantânea de água no dispositivo de galgamento em função do tempo ($0.0 \text{ s} \leq t \leq 100.0 \text{ s}$) para varias razões de H_1/L_1	75
Figura 6.2 - Vazão mássica instantânea de água no dispositivo de galgamento em função do tempo ($50.0 \text{ s} \leq t \leq 65.0 \text{ s}$) para varias razões de H_1/L_1	76
Figura 6.3 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 48.0 \text{ s}$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	78
Figura 6.4 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 49.0 \text{ s}$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	78
Figura 6.5 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 50.0 \text{ s}$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	79
Figura 6.6 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 51.0 \text{ s}$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	79
Figura 6.7 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 52.0 \text{ s}$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	80
Figura 6.8 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 53.0 \text{ s}$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	80
Figura 6.9 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 55.0 \text{ s}$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	81
Figura 6.10 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 55.0 \text{ s}$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	81
Figura 6.11 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 56.0 \text{ s}$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	82
Figura 6.12 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 57.0 \text{ s}$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	82
Figura 6.13 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 48.0 \text{ s}$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	84

Figura 6.14 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 49.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	84
Figura 6.15 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 50.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	85
Figura 6.16 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 51.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	85
Figura 6.17 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 52.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	86
Figura 6.18 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 53.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	86
Figura 6.19 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 54.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	87
Figura 6.20 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 55.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	87
Figura 6.21 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 56.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	88
Figura 6.22 - Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 57.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades.	88
Figura 6.23 - Efeito da razão H_1/L_1 sobre a quantidade de massa de água acumulada no reservatório. ($0.0 \text{ s} \leq t \leq 100.0 \text{ s}$).....	90
Figura 6.24 - Efeito de H_1/L_1 sobre a quantidade de massa de água que entra no reservatório para vários profundidades relativas: $d / \lambda = 0,3, 0,5$ e $0,62$ (Dos Santos et al., 2014).....	91
Figura 6.25 - Efeito da profundidade (S) sobre a quantidade de massa acumulada (m_m) uma vez maximizada	92
Figura 6.26 - Efeito de S sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada($(H_1/L_1)_o$).	93

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1– Oferta interna de energia no Brasil. (BEN, 2014)	4
Tabela 1.2 - Oferta interna de energia elétrica no Brasil, em 2013 e 2012 (BEN, 2014)..	5
Tabela 5.1 - Valores de φ , Γ^φ e S^φ usados na Equação (5.9)	60
Tabela 5.1 - Valores de altura da superfície livre da onda (η) no tempo de 15.0 s para os passos de tempo estudados e suas variações	60

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BEN	Balanço Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
CORDIS	<i>Community Research and Development Information Service</i>
EDP	Equação Diferencial Parcial
Eq.	Equação
Fig.	Figura
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
IFRS	Instituto Federal Rio Grande do Sul
INPI	Instituto da Propriedade Intelectual
MDF	Método de Diferenças Finitas
MEF	Método de Elementos Finitos
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
MVF	Método dos Volumes Finitos
NAE	Nível Estático (ou Nível Médio) da Água
NEO	Núcleo de Estudantes de Oceanografia
OWC	Coluna de Água Oscilante (<i>Oscillating Water Column</i>)
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

LISTA DE SÍMBOLOS

A_r	Área da rampa	[m ²]
A_T	Área do tanque de ondas	[m ²]
C	Celeridade	[m.s ⁻¹]
$\vec{F}$	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	Altura da onda	[m]
H_I	Altura da rampa	[m]
H_T	Altura total do tanque	[m]
k	Número de onda	[m ⁻¹]
L_1	Comprimento da rampa	[m]
L_R	Comprimento do reservatório	[m]
L_T	Comprimento total do tanque	[m]
M	Massa	[kg]
$\dot{m}$	Fluxo de massa ou Vazão mássica instantânea	[kg/s]
m_m	Massa de água máxima que entra no reservatório	[kg]
m_{mm}	Massa de água duas vezes maximizada que entra no reservatório	[kg]
P	Ponto principal de um volume de controle	
P	Pressão	[Pa]
P_{abs}	Pressão atmosférica	[kPa]
P_{man}	Pressão manométrica	[Pa]
S	Distâncias entre o fundo do dispositivo e o fundo do tanque	[m]
t	Tempo	[s]
T	Período de onda	[s]
U_r	Número de Ursell	
$\vec{v}$	Vetor velocidade	[m/s]
t	Coordenada temporal	[m]
w	Coordenada espacial	[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 de 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	Relação entre área da rampa e a área do tanque de ondas	
σ	Frequência da onda	[s ⁻¹]
$\overset{=}{\tau}$	Tensor taxa de deformação	[Pa]
Δ	Variação da componente em relação ao tempo ou ao espaço	

Subscritos

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

Sub-índices

() _o	Uma vez otimizado
() _{oo}	Duas vezes otimizado
() _m	Uma vez maximizado
() _{mm}	Duas vezes maximizado

1. INTRODUÇÃO

A energia está muito presente na vida contemporânea das pessoas, sendo necessária para o funcionamento de residências e indústrias, tornando-se indispensável para a vida na sociedade e para o desenvolvimento de regiões. De acordo com Jannuzi e Swisher (1997), no contexto da energia, a ênfase deve ser dada à energia elétrica devido a sua atual participação na matriz energética mundial e facilidade de transmissão. Outro aspecto que merece destaque é a necessidade de diversificação nas formas de obtenção de energia, devido ao constante aumento na demanda de energética elétrica para aplicações residenciais, comerciais e industriais.

No passado, os seres humanos dependiam basicamente de sua própria força física ou ainda da força dos animais. As quantidades de energia obtidas nesses processos eram demasiadamente pequenas e suas condições de vida desenvolviam-se lentamente. No entendimento de Ghosh e Prelas (2011), com o surgimento da eletricidade, durante o século XIX, o uso de energia foi revolucionado e, na sequência, amplamente aplicado em diversas áreas, como: moradia, saúde, comunicações, transporte e assim por diante. O uso maciço de carvão viabilizou um aumento significativo no padrão de vida do homem. A posterior exploração de petróleo, gás e energia nuclear ampliaram este fenômeno. A energia, portanto, desempenha um papel essencial no desenvolvimento econômico da humanidade, além de melhorar a qualidade de vida das pessoas de uma forma geral.

Considerando, basicamente, o crescimento da população mundial, a tendência é de ocorrer um aumento significativo na demanda global de energia. Para atender a estas necessidades adicionais, pensando ainda na preservação da natureza, é necessário promover o uso das energias ditas alternativas, as quais atualmente representam apenas 20% do consumo de energia mundial (Cruz e Sarmiento, 2004).

Todas as fontes de energia têm suas próprias vantagens e desvantagens, em termos de impactos ambientais e de custos. Por esse motivo, não há uma única solução idealizada. A melhor fonte de energia poderá ser a combinação de mais de um tipo, adequando-se aos recursos da região. Existe uma tendência das fontes de energia permanecerem provindas das queimas de combustíveis fósseis, especialmente o petróleo. Atualmente, os combustíveis fósseis representam quase 90% da energia consumida em nível comercial e, em curto prazo, nada pode substituí-los quantitativamente ou economicamente (Echarri, 2012).

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

A geração de energia envolve aspectos científicos, econômicos, políticos, fiscais, ambientais e etc. Três fatores desempenham um papel importante no consumo de energia: a tecnologia, que permite que o consumo seja reduzido, proporcionando um serviço de igual ou melhor qualidade; os governos, que através do estabelecimento de regulamentações, padrões e tributações, podem conduzir o consumidor para o uso de fontes específicas de energia nos padrões de consumo e o consumidor, que tem um papel de escolha por tecnologias de baixo ou alto consumo energético (Cruz e Sarmento, 2004).

Embora ainda seja relativamente fácil a obtenção de energia denominada não renovável, muitos países já buscam soluções que primam pelos métodos de geração de recursos energéticos renováveis, por serem de baixo impacto ambiental (desenvolvimento sustentável). O mundo precisará de mais eletricidade para atender às novas necessidades, assim, será necessário melhor aproveitamento de energia, eficiência de conversão e transmissão, ou seja, uma melhor gestão dos sistemas de energia (Ngô, 2010).

Em nosso planeta, encontramos diversos tipos de fontes de energia. Elas podem ser classificadas em dois grupos: renováveis ou não renováveis. Por exemplo, a energia eólica faz parte das fontes de energia renováveis. Por outro lado, os combustíveis fósseis (derivados do petróleo e do carvão mineral) são classificados como não renováveis (Echarri, 2012).

Conforme Ghosh e Prelas (2011), entre as energias renováveis, destacam-se a energia dos ventos, solar, hidráulica, energia geotérmica, energia oceânica (objeto desse trabalho), energia biotérmica, etanol e a energia do hidrogênio. As maiores dificuldades em algumas fontes renováveis de energia estão relacionadas às dificuldades técnicas de obtenção e custo de construção e manutenção dos dispositivos de conversão de energia. Dentre as fontes de energia não renováveis, encontram-se: o carvão, petróleo, gás e o urânio. A Figura 1.1 demonstra a utilização da energia renovável e não renovável no Brasil, destacando o uso expressivo da energia renovável, sobretudo nos anos 70, devido à crise do petróleo. Vale destacar que, especificamente no Brasil, o uso de

energia hidroelétrica aumenta sensivelmente o emprego de energias denominadas renováveis. Conforme o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), nessa década houve um declínio acentuado das reservas mundiais de petróleo, o que acabou por provocar duas grandes crises de fornecimento de petróleo. A primeira ocorreu em 1973, onde o preço do petróleo saltou de US\$ 3 para US\$ 12 por barril, enquanto a segunda ocorreu em 1979, atingindo US\$ 32 (em valores correntes da época) (BNDES, 2013).

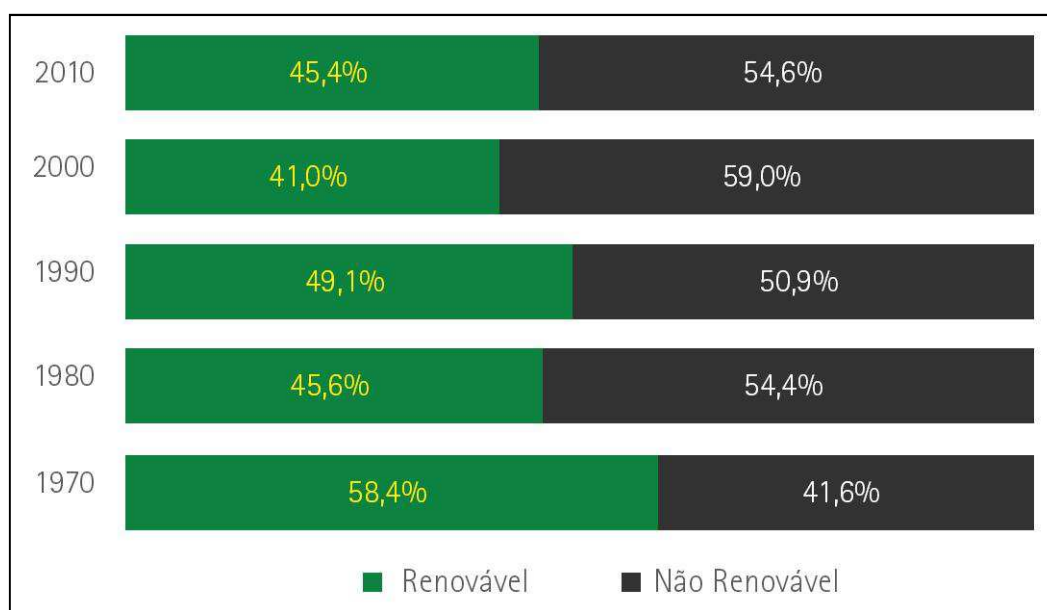


Figura 1.1 - Utilização de energia no Brasil de 1970 a 2010 (BEN, 2011).

A Tabela 1.1 demonstra o consumo brasileiro de energias renováveis e não renováveis entre 2012 e 2013. A unidade de medida correspondente à tonelada equivalente de petróleo (tep), ou seja, a unidade de energia de referência, correspondendo à quantidade de energia contida em uma tonelada de petróleo de referência. Adotada no Balanço Energético Nacional (BEN) e em diversas outras publicações internacionais, corresponde a 10.000 Mcal (megacaloria) e não é equivalente ao petróleo médio processado no Brasil (BEN, 2014).

A Figura 1.2 ilustra o consumo de energia (renováveis e não renováveis) no Brasil, no ano 2013 (BEN, 2014). Referente à energia elétrica, a Tabela 1.2 dá uma ideia da oferta interna no Brasil, entre 2013 e 2012.

Tabela 1.1– Oferta interna de energia no Brasil. (BEN, 2014).

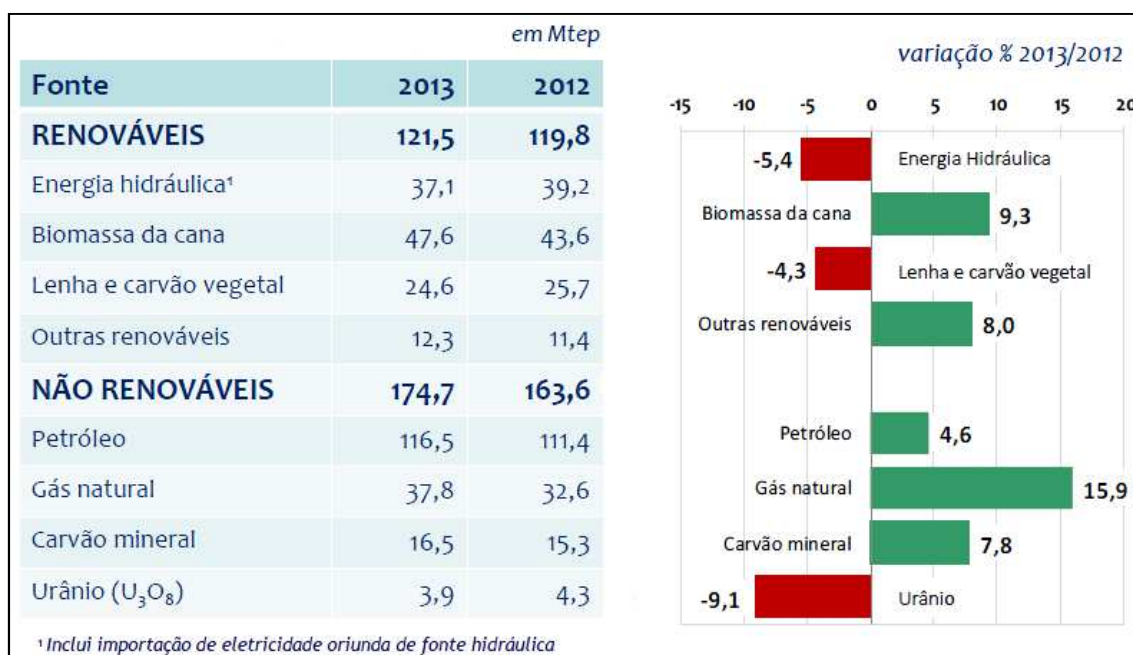


Figura 1.2 – Consumo de energia (renováveis e não renováveis) no Brasil no ano de 2013 (BEN, 2014).

A maior fonte de energia elétrica no Brasil é renovável (energia hidráulica). A Figura 1.3 ilustra a distribuição de fontes de energia elétrica no Brasil, em 2013 e 2012.

É importante destacar que o Brasil tem no seu histórico a aplicação de energia renovável desde os anos 70.

Tabela 1.2 – Oferta interna de energia elétrica no Brasil, em 2013 e 2012 (BEN, 2014).

Fonte	2013	2012	Δ 13 / 12
Hidrelétrica	390.992	415.342	-5,9%
Gás Natural	69.017	46.760	47,6%
Biomassa ¹	39.679	34.662	14,5%
Derivados do Petróleo ²	22.090	16.214	36,2%
Nuclear	14.640	16.038	-8,7%
Carvão Vapor	14.801	8.422	75,7%
Eólica	6.579	5.050	30,3%
Outras ³	12.241	10.010	22,3%
Geração Total	570.025	552.498	3,2%

¹ Inclui lenha, bagaço de cana e lixívia
² Inclui óleo diesel e óleo combustível
³ Inclui outras recuperações, gás de coqueria e outras secundárias

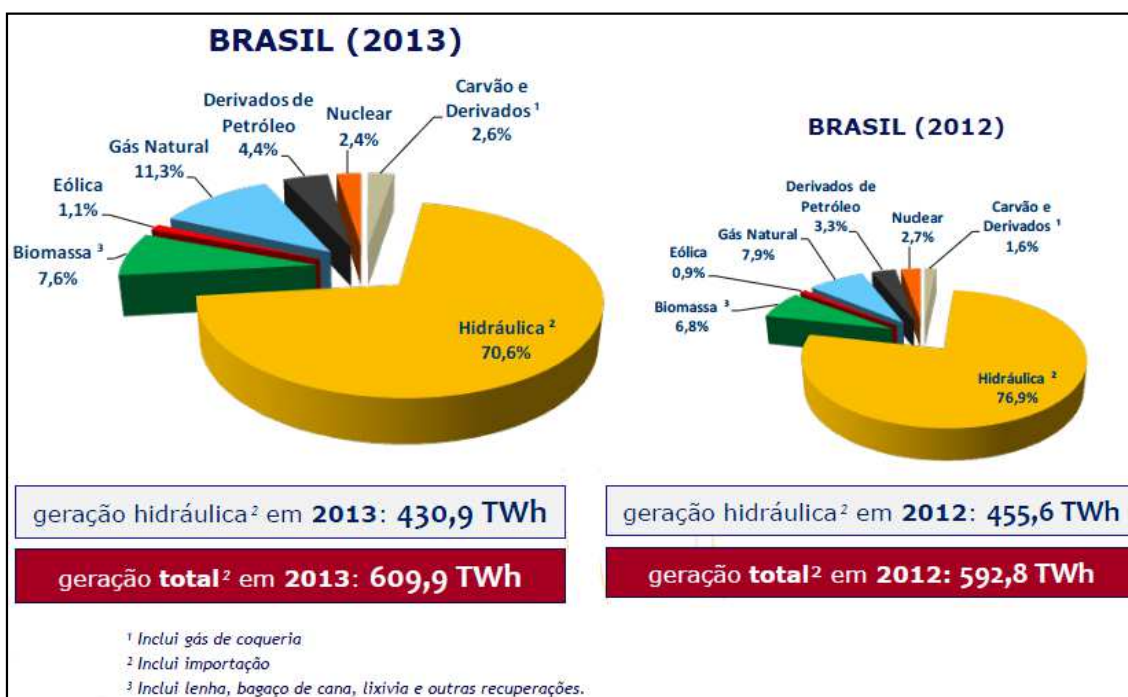


Figura 1.3 – Distribuição fontes de energia elétrica no Brasil, em 2013 e 2012 (BEN, 2014).

O presente trabalho está relacionado com a conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica (WEC – do inglês: *Wave Energy Conversion*), mais precisamente será avaliado o princípio de funcionamento do dispositivo de galgamento. A ideia de conversão da energia das ondas em outras formas de energia não é nova. A

primeira patente data de 1799, com o trabalho de Girard e Son, na França. Historicamente, o interesse pelo desenvolvimento da conversão da energia das ondas começou depois da crise dos preços do petróleo em 1973 (WAVEC, 2004).

Alguns países europeus com condições de exploração da energia das ondas introduziram pesquisas nesse âmbito. Desta forma, importantes programas de investigação de exploração da energia das ondas com apoio governamental e privado começaram a surgir, principalmente na Dinamarca, Irlanda, Noruega, Portugal, Suécia e no Reino Unido, que desenvolveram tecnologias de conversão, na sua grande maioria com a fabricação de protótipos em escala real e reduzida, com futuro objetivo de conectar as redes de transmissão para futura comercialização desta energia extraída do mar (INPI, 2013).

Nesses países, ficou evidente que a extração de energia do mar é uma tarefa relativamente difícil. Por esse motivo, a comissão europeia considerou importante ajudar o desenvolvimento de tecnologias, financiando projetos, dando desta forma passos na direção de comprovar a possibilidade da extração desta energia. Como consequência, surgiram dois bons resultados: a estação piloto do Pico (Portugal) e da ilha Islay (Escócia - atualmente em funcionamento). A Comissão apoiou uma série de conferências internacionais de energia das ondas (Edimburgo - UK, 1993, Lisboa - Portugal, 1995, Patras - Grécia, 1998 e Aalborg - Dinamarca, 2000), que contribuíram significativamente para a estimulação e coordenação de atividades realizadas pela Europa com universidades, centros de pesquisa e indústria (NEO, 2013).

Nos últimos 25 anos, a energia das ondas tem passado por um processo cíclico com fases de entusiasmo, desapontamento e reconsideração. No entanto, o persistente esforço na investigação, desenvolvimento e a experiência acumulada durante estes anos passados, tem constantemente aumentado o desempenho das técnicas de obtenção de energia a partir das ondas. Isso tem levado o recurso da energia das ondas a uma maior proximidade da exploração comercial que, até agora, não tinha sido vista. De 2009 até os dias de hoje, diversos tipos de dispositivos foram desenvolvidos para extração da energia das ondas (Falcão, 2010).

1.1. As Ondas do Mar como uma Fonte Renovável de Energia

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, sem dúvida 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. 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.

A exploração da enorme reserva energética das ondas representa um domínio de inovação, onde quase tudo ainda está por fazer. Em teoria, se fosse possível equipar os litorais do planeta com conversores energéticos, as centrais elétricas existentes poderiam em teoria ser desativadas. O valor do recurso energético proveniente dos mares torna-se extremamente atrativo se considerarmos que o valor global da energia das ondas encontra-se em torno de 2 TW, valor este que é equiparável à potência elétrica média anual consumida mundialmente (Cruz e Sarmento, 2004). Este valor global apresenta-se distribuído de modo irregular pelo globo terrestre, sendo sua avaliação estimada em termos de potência por comprimento de frente de onda (kW/m). Na Figura 1.4 é possível observar a distribuição mundial do potencial energético das ondas do mar, onde nesse contexto o Brasil destaca-se devido a sua imensa faixa litorânea.

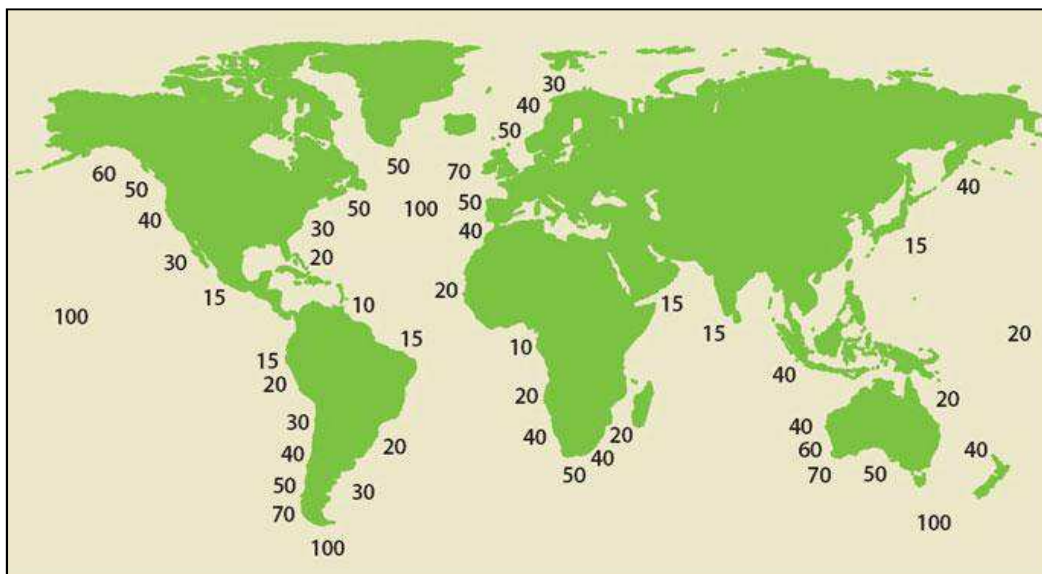


Figura 1.4 – Potencial de energia das ondas ao redor do mundo (Ghosh e Prelas, 2011).

Conforme Falcão (2010), um bom potencial energético pode ser encontrado em regiões afastadas da linha do Equador, onde a média anual encontra-se entre 40 e 100 kW/m por frente de onda. O potencial de energia das ondas estimado no sul do Brasil é de aproximadamente 30 kW/m, justificando a implementação de uma possível fonte de energia alternativa na região.

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.

Dado o baixo nível de experiência prática em relação ao tema “energia das ondas”, muito em função do reduzido número de protótipos reais atualmente existentes para pesquisa, estimativas de impactos ambientais relacionados a este tipo de exploração de energia se tornam cada vez mais relevantes. Os efeitos sobre o ecossistema costeiro são os mais variados, dentre os quais se destacam: 1) os biológicos (fauna e flora); 2) os físicos, onde se destacam processos costeiros como a alteração do padrão de comportamento das ondas, ocasionando efeitos nos processos de erosão costeira e/ou transporte de sedimentos; 3) os visuais, relacionados à altura dos dispositivos acima do nível do mar e ocupação do mesmo na costa; 4) os acústicos, como os ruídos relacionados à interação fluido-estrutura; 5) os vibratórios, que podem afetar o sistema sonar de animais marinhos e 6) os socioeconômicos, com efeitos sobre a pesca, dentre outros.

1.2. Tecnologias de Aproveitamento da Energia das Ondas do Mar

Conforme Ghosh e Prelas (2011), a quantidade de energia armazenada pelos oceanos é gigantesca. Os oceanos cobrem mais de 70% da superfície da Terra. A energia pode ser obtida a partir do mar, aproveitando as ondas, a corrente de maré, e os gradientes térmicos que existem dentro da lâmina de água.

Apesar dos oceanos poderem satisfazer as necessidades de consumo de energia do mundo em muitas vezes, essa energia é extremamente difícil de ser extraída, sendo por esse motivo que ainda não há a produção em larga escala (Ghosh e Prelas, 2011).

Para realizar a transformação da energia das ondas do mar em energia elétrica existem diversos tipos de conversores com diferentes classificações. Uma proposta foi realizada por Cruz e Sarmiento (2004) onde os dispositivos podem ser classificados quanto ao seu local de instalação. A Figura 1.5 mostra esta classificação quanto ao seu local de instalação e as faixas de profundidades para instalação dos dispositivos *nearshore* e *offshore*:

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

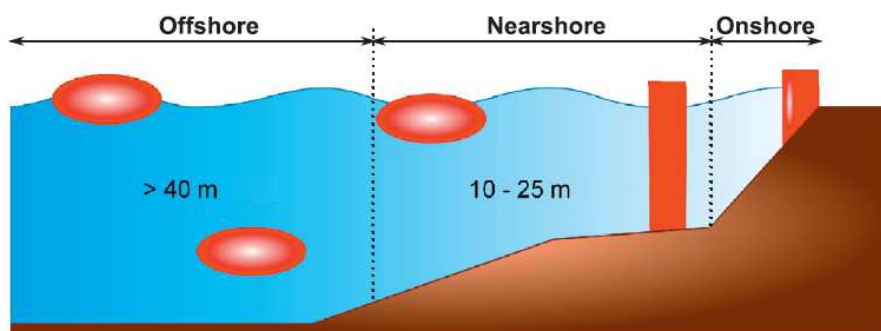


Figura 1.5 – Localização dos dispositivos conversores de energia das ondas (López et al., 2013).

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. Adicionalmente, não necessitam de cabos de ancoragem e nem cabos submarinos. Porém, o potencial

energético é menor, pois as ondas que chegam à costa interagem com o leito oceânico e, conseqüentemente, têm a sua energia diminuída. Também possuem dificuldades em relação ao planejamento de proteção e conservação de costas (impacto ambiental). Os mais desenvolvidos utilizam o princípio da Coluna D'Água Oscilante (OWC – do inglês: *Oscillating Water Column*).

Por outro lado 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.

Por fim 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.

Uma outra classificação possível está associada ao modo de conversão de energia das ondas em energia elétrica, isto é, ao tipo de dispositivo. Dessa forma, têm-se três classes principais de conversores de energia das ondas, que podem ser dados por (Cruz e Sarmiento, 2004):

- Coluna de Água Oscilante (OWC): trata-se 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. Conseqüentemente, 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*.

- Corpos Oscilantes (*Oscillating devices*), podendo ser de absorção pontual (*Point Absorbers*) ou progressivos (*Surging devices*): são dispositivos em que a passagem da onda provoca oscilações, sendo a energia extraída desse movimento.

Na absorção pontual, o flutuador se move verticalmente ou em torno de um eixo, relativamente a uma estrutura fixa ao fundo. Enquanto nos progressivos, os componentes se movem relativamente sobre sua própria estrutura quando a onda passa.

Os corpos submersos podem aproveitar o movimento da translação ou da rotação da estrutura. O movimento oscilatório do conversor impulsiona sistemas hidráulicos que acionam um gerador, produzindo, então, eletricidade.

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

A Figura 1.6 ilustra as tecnologias de conversores de energia das ondas, hoje conhecidas.

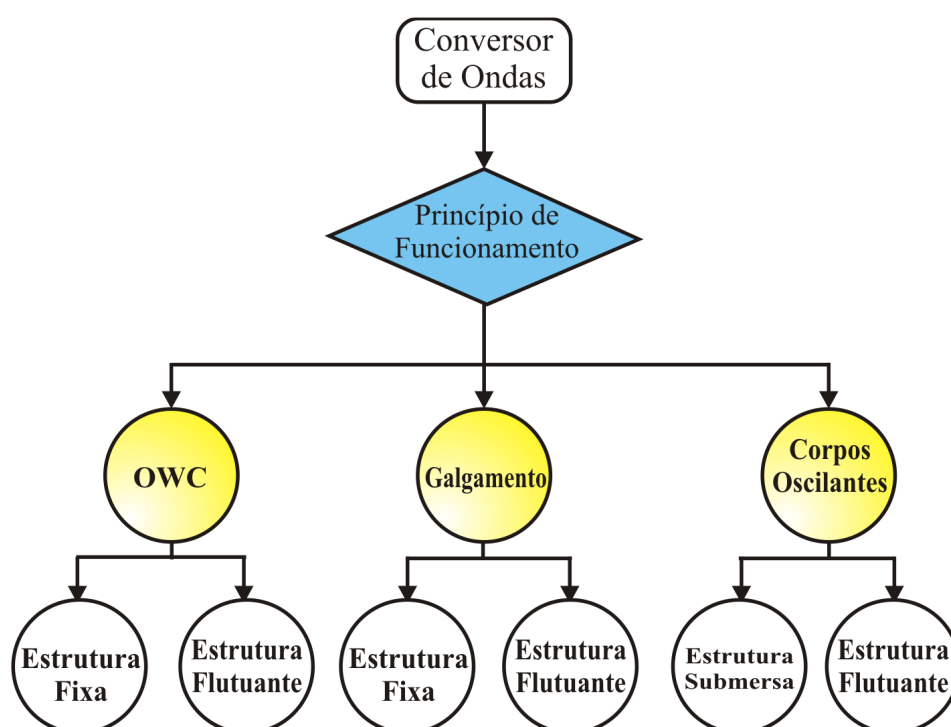


Figura 1.6 – Tecnologias de conversores de energia das ondas (Adaptado de Fadaeenejad et al., 2014).

Entende-se que são muitas as variáveis que definem qual dispositivo utilizar. Portanto, se deve conhecer os conversores com detalhes, bem como o clima de ondas da região em que se pretende instalar um dispositivo. Após isso, testam-se as diferentes opções e até mesmo pode se propor novas tecnologias de conversão.

No presente trabalho foi desenvolvido um estudo numérico relacionado à influência da geometria (rampa e afundamento) sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento em escala real *onshore*. Para tal será empregado o método *Constructal*

Design, que é baseado no uso de restrições e objetivos. A seguir serão apresentadas maiores informações, bem como aplicações do dispositivo de galgamento, que é o foco desta pesquisa.

1.2.1. Dispositivos de Galgamento

Os dispositivos de galgamento são tecnologias flutuantes ou fixas, para aplicação, respectivamente, em alto mar ou *onshore*. Seu princípio de funcionamento baseia-se na acumulação de água em um reservatório sobrelevado em relação ao nível médio da superfície livre do mar (Fig. 1.7). A água acumulada é devolvida ao mar através de turbinas hidráulicas de baixa queda 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).

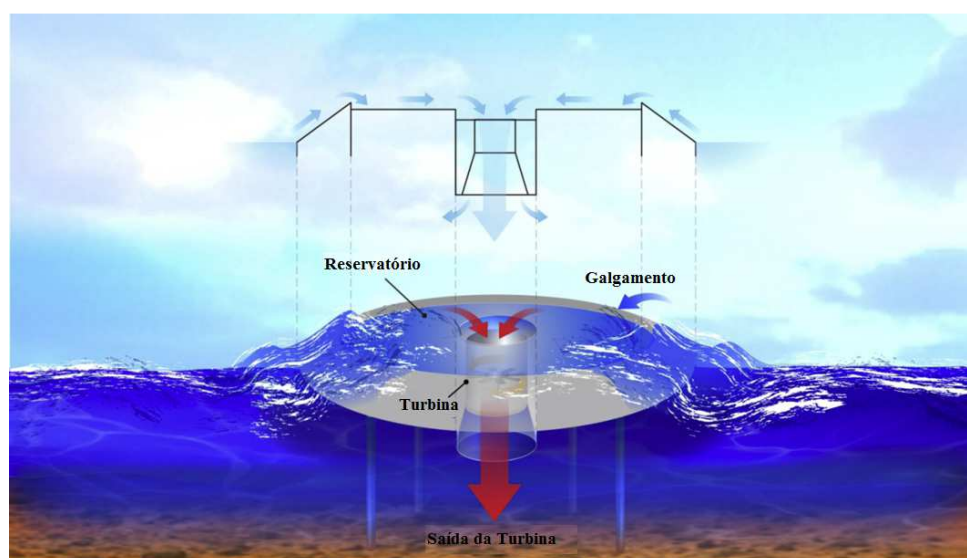


Figura 1.7 – Princípio de Funcionamento do Galgamento (Li e Yu, 2012).

Os dispositivos com o princípio de funcionamento baseados no galgamento que existem em escala real estão em fase de testes ou são protótipos. Os principais exemplos são apresentados nas seções a seguir.

1.2.1.1. *Tapchan* (Noruega – *Tapered Chanel Wave Power Device*)

O equipamento *Tapchan* desenvolvido na Noruega nos anos 80 está instalado em Toftestallen desde 1985 com uma capacidade de 350kW. O coletor está cavado na rocha

e vai estreitando de modo a concentrar as ondas incidentes que neste protótipo chega aos 3 m de altura que é a altura do reservatório. O reservatório tem cerca de 8500 m² de área superficial o que é muito importante pois é necessária uma área suficientemente grande para o correto funcionamento de uma turbina que neste caso é uma turbina *Kaplan* (Pereira, 2010). A Figura 1.8 (a) apresenta um esquema de funcionamento do equipamento e a Fig. 1.8 (b) uma fotografia do *Tapchan*.

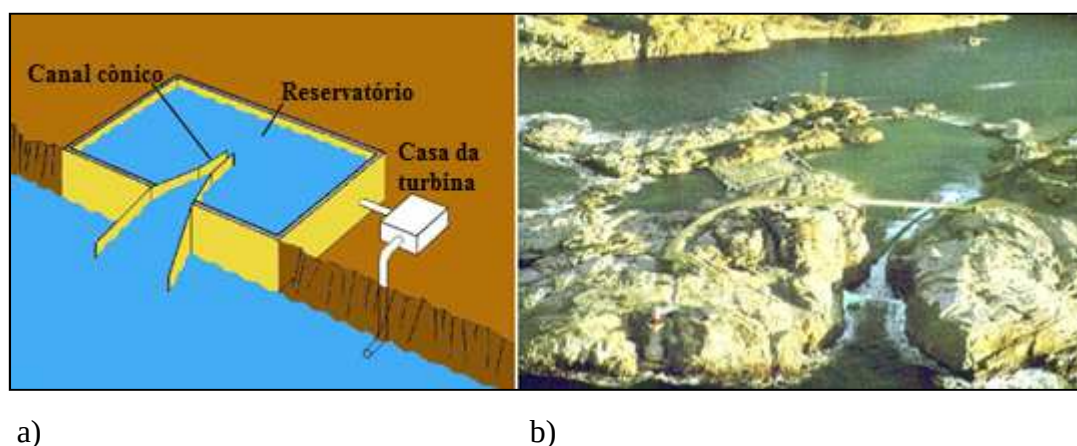


Figura 1.8 – Dispositivo *Tapchan*: a) Ilustração do esquema de funcionamento, b) imagem real do equipamento (Pereira, 2010).

1.2.1.2. *Wave Plane* (Dinamarca – *Wave Plane Production A/S* – *WPP A/S*)

É um dispositivo de galgamento cuja localização pode ser tanto próximo da costa como afastado da costa, cujo projeto possui uma construção simétrica. Este dispositivo é equipado com uma praia artificial para tornar a captura da energia das ondas do mar mais eficiente. Em ambos os lados a captura da água das ondas é realizada para diferentes alturas, com objetivo de aproveitar ao máximo a energia cinética das mesmas. Essa energia é transformada em um fluxo de água, que causa a rotação de turbinas de canalização, as quais são equipadas com um gerador que é ligado à rede elétrica, devolvendo então a água novamente ao oceano. A Figura 1.9 mostra o equipamento.

Desde 1990, quando seu conceito foi criado por seu inventor Erik Skaarup, o *Wave Plane* tem sido desenvolvido. O primeiro teste oficial ocorreu na Irlanda em 1996, na *University College Cork*. Já o seu primeiro protótipo, localizado no Grenaa Píer, ficou pronto em 2008. Inicialmente seria testado no porto, para então ser rebocado para o local de testes em Hanstholm (Iahnke, 2010).



Figura 1.9 – *Wave Plane* (López et al., 2013).

1.2.1.3. *Wave Dragon* (Dinamarca – *Wave Dragon Aps*)

De acordo com Beels et al. (2010) o *Wave Dragon* (WD), é um conversor flutuante, do tipo galgamento, para uma localização *offshore*, consistindo basicamente em dois refletores que concentram e elevam a altura das ondas incidentes, canalizando-as em uma rampa para o interior de um reservatório. A água, contida temporariamente nesse reservatório, desce pela ação da gravidade passando por turbinas hidráulicas de baixa queda, situadas em sua região central, para a produção de energia elétrica, usando o mesmo princípio de centrais hidroelétricas. As Figuras 1.10 e 1.11 apresentam a imagem de seu protótipo e a representação da secção de rampa e principais partes constituintes do *Wave Dragon* (vista corte) respectivamente.



Figura 1.10 – *Wave Dragon* – Visão Frontal (Tedd e Kofoed, 2009).

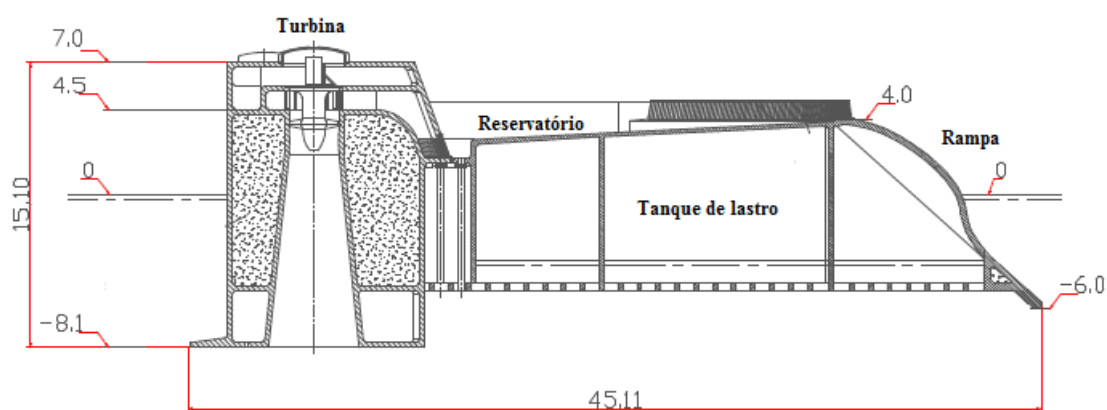


Figura 1.11 – Representação da secção de rampa e principais partes constituintes do *Wave Dragon* vista em corte com as suas dimensões em metros (Morais, 2009; Christensen et al., 2006).

No final de 1980 o projeto do WD começou a ser desenvolvido por seu inventor, MSc Erik Friis-Madsen. Desde então, uma variedade de universidades e de parceiros industriais tem se envolvido no desenvolvimento e aprimoramento deste equipamento. Seu modelo em escala reduzida (em escala 1:4.5) foi instalado em Nissum Bredning, sendo testado de Maio de 2003 até Janeiro de 2005, destacando-se como primeiro dispositivo *offshore* a ser ligado a uma rede elétrica.

Foi verificado, também, que este dispositivo foi testado em condições reais de mar, acumulando mais de 20.000 h de experiência fornecendo eletricidade a lares domésticos. Sua produção de energia, num clima de ondas típicas de 16 kW/m, encontradas no local de teste foi de 50 a 500 MWh/mês (3.2 GWh/ano) neste período. Entretanto, como aponta Frigaard et al. (2006) este valor poderia ter alcançado facilmente 6.5 GWh/ano.

No projeto do dispositivo WD podem ser identificados alguns parâmetros que influenciam na produção da potência útil do dispositivo (Kofoed, 2002; Tedd e Kofoed, 2009):

- galgamento: determinada pela geometria da rampa e refletores, altura efetiva das ondas e dimensão física dos conversores (rampas, refletores e etc).
- saída de água do dispositivo: determinada pelo tamanho do reservatório, geometria da turbina e estratégia de funcionamento da turbina;

- sistema de amarração: livre ou restrito em direção à orientação das ondas;
- escala do conversor de energia;
- clima das ondas: determinado pela energia na onda frontal (kW/m), pela distribuição da altura da onda e pela probabilidade de galgamento da onda incidente.

De acordo com Kofoed (2002), em situações de ambiente extremo (temporais, vendavais e etc) o WD foi projetado para que apenas as turbinas atuem como partes móveis, mantendo-se as estruturas como rampa e defletores fixos. Isso é feito não somente para minimizar os efeitos do mar sobre o dispositivo, mas também para reduzir os custos com manutenção do dispositivo.

Foi constatado que ondas gigantes não foram problemas para esse equipamento, visto que o modelo de testes demonstrou que estas simplesmente correm sobre sua plataforma. Da mesma forma, os ventos fortes praticamente não afetam sua estrutura, por ser relativamente baixa, não ficando exposta aos mesmos.

De acordo com o fabricante, os principais componentes de um WD (Fig. 1.11) são:

- corpo principal com uma rampa; em concreto reforçado (armado) e/ou estrutura metálica;
- dois refletores em aço e/ou de concreto reforçado (armado);
- sistema de amarração;
- turbinas com geradores de ímã permanente;

Com relação às dimensões físicas de um WD, foi constatado que esse poderá ser otimizado de acordo com o clima de ondas do local de instalação. Nos testes realizados em Nissum Bredning o WD foi construído de modo a coincidir com um clima de ondas com cerca de apenas 0.4 kW/m (dispositivo feito para fins de ensaios).

Segue ainda, que o corpo principal ou plataforma flutuante de um WD consiste, basicamente, de um grande reservatório. Para garantir a produção de eletricidade é recomendado que o dispositivo seja grande e pesado.

Estima-se que num clima de alta energia de ondas, como encontrado ao largo da costa oeste da Escócia e da Irlanda, uma unidade do WD poderá produzir 50 GWh/ano,

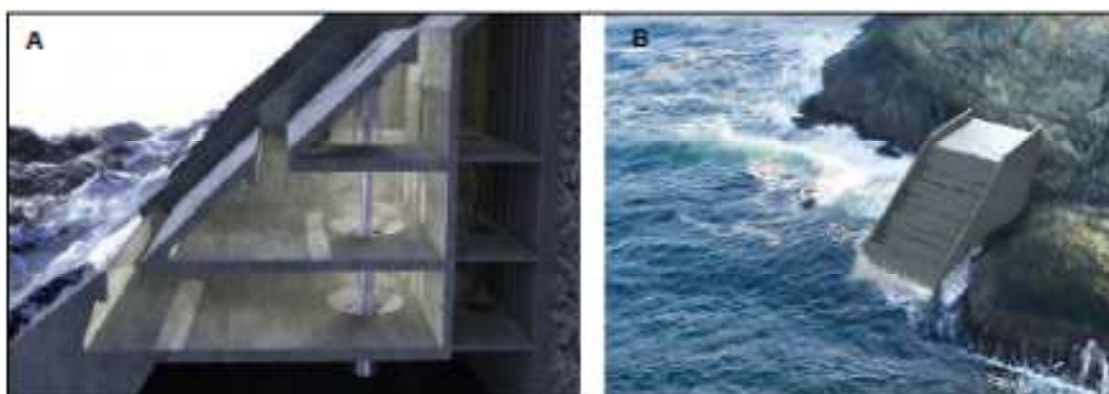
compensando 39.000 t de dióxido de carbono, quando se compara com a produção de energia elétrica gerada à base do carvão.

Nota-se que uma das principais características deste equipamento é que ele se ajusta à mudança de altura das ondas, alterando a sua própria altura flutuante. Isto é conseguido através da alteração da pressão do ar nas câmaras-abertas-de-ar.

Em relação aos custos, segundo Tedd e Kofoed (2009), uma única unidade do WD, com 260 m de largura e uma potência nominal de 4 MW, dependendo do clima de ondas do local onde será instalado, estava avaliada em 2009 entre 10 e 12 milhões de dólares, isso sem levar em consideração o sistema de amarração e a interconexão elétrica, ou seja, são sistemas bastante onerosos.

1.2.1.4. *Sea Slot-cone Generator – SSG (Noruega – Wave Energy AS)*

Desenvolvido pela *Wave Energy AS* a partir de 2004, o *Sea Slot-cone Generator* (SSG) é um dispositivo costeiro (*onshore*) de galgamento para a conversão da energia das ondas em eletricidade, através do armazenamento da energia potencial das ondas em vários reservatórios colocados um acima do outro. A água captada passará por uma turbina, convertendo dessa forma a energia potencial da água em energia mecânica de eixo. Esta é ligada a um gerador elétrico que converterá a energia mecânica em energia elétrica, para então abastecer à rede. A Figura 1.12 (a) representa uma vista lateral em corte do equipamento e a Fig. 1.12 (b) mostra uma ilustração com sua possível forma de instalação.

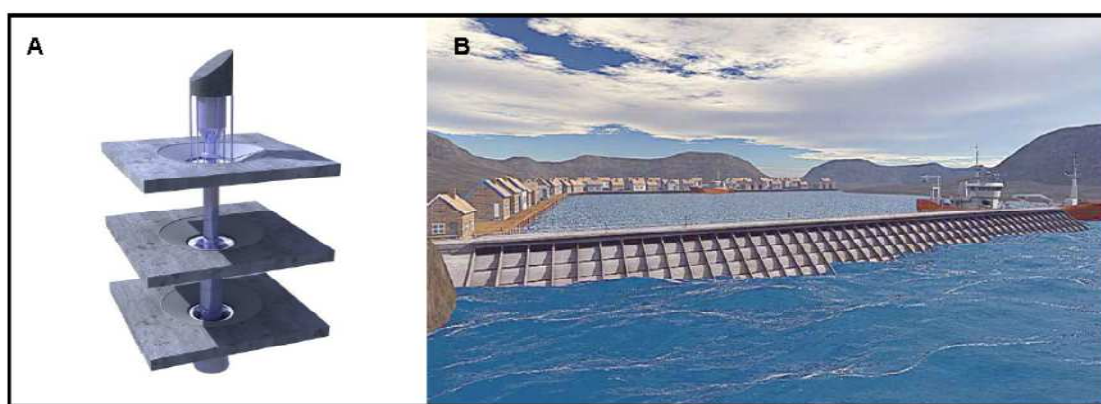


a)

b)

Figura 1.12 – Ilustração de um dispositivo do tipo SSG: a) vista lateral, b) ilustração da instalação do dispositivo (Margheritini et al., 2009).

Sabe-se ainda que o SSG é uma estrutura de concreto com uma turbina de eixo de múltiplos estágios. No projeto desenvolvido pela *Wave Energy*, o dispositivo possui três reservatórios um acima do outro, podendo operar sob diferentes condições de ondas. Dessa forma, é possível obter um fluxo ininterrupto de água para a operação da turbina, tornando o dispositivo mais eficiente em relação a estruturas com apenas um reservatório. Seu projeto piloto está instalado na costa da Noruega, na ilha de Kvitsøy, com uma potência aproximada de 150 kW e 10 m de largura em um clima de ondas de 19 kW/m. A Figura 1.13(a) apresenta sua turbina de múltiplos estágios e a Fig. 1.13(b) uma ilustração de um dispositivo em escala real.



a) b)

Figura 1.13 – Dispositivo SSG: (a) turbina de 3 estágios, (b) ilustração de uma usina de geração de energia empregando o princípio SSG (Margheritini et al., 2009).

É possível verificar que um dispositivo comercial, em escala real, com 500 m de comprimento, produziria 10-20 GWh/ano, sendo a tarifa da energia elétrica em torno de 0.12 €/kWh no ano de 2008. Contudo, no futuro, com o desenvolvimento técnico e a utilização da tecnologia, o preço final seria na ordem de 0.04-0.06 €/kWh (Frigaard et al., 2006). De acordo com a comunidade de pesquisa e serviço de desenvolvimento de informação (CORDIS – do inglês: *Community Research and Development Information Service*) o custo total para construir, instalar e testar esse sistema seria de € 3.5 milhões (CORDIS, 2007).

1.3. Objetivos

No presente trabalho, tem-se como objetivo estudar numericamente a forma geométrica da rampa que conduz ao melhor desempenho fluidodinâmico de um

dispositivo de galgamento *onshore* em escala real. Esta análise será realizada através do método *Constructal Design* e considerando o dispositivo com várias distâncias entre o fundo do tanque e a superfície inferior do reservatório (submersão do dispositivo). Foi definido como objetivo maximizar a quantidade massa de água das ondas incidentes que entram no reservatório do dispositivo em um intervalo de tempo. O problema proposto possui dois graus de liberdade (razão entre altura e comprimento da rampa e a submersão) e uma restrição geométrica (área ocupada pela rampa no tanque de ondas simulado). Vale destacar que será avaliado apenas o princípio físico de funcionamento do dispositivo. Portanto, este estudo foi baseado em prova de conceito, ou seja, se a metodologia de otimização se aplicar para o princípio de funcionamento, certamente se aplicará para um dispositivo real.

Além disso, o trabalho tem como objetivos específicos:

- atualizar o estudo do estado-da-arte sobre os dispositivos de galgamento e seus princípios físicos de funcionamento;
- realizar revisão bibliográfica sobre energia das ondas do mar; teoria de ondas oceânicas;
- empregar uma discretização espacial com elementos retangulares do tipo *stretched* para a simulação do escoamento sobre o dispositivo, algo que não havia sido realizado no grupo de pesquisa no qual este trabalho está inserido, para a simulação deste tipo de dispositivo que apresenta uma geometria complexa;
- avaliar a influência da submersão (S) sobre a massa que entra no reservatório uma vez maximizada;
- avaliar a influência da submersão (S) sobre a geometria da rampa uma vez otimizada, $(H_1/L_1)_o$.
- 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 quantidade de água que entra no reservatório, realizando as variações geométricas através do *Constructal Design*;
- comparar os resultados obtidos no item anterior do efeito de H_1/L_1 sobre o galgamento com aqueles obtidos no estudo de Dos Santos et al. (2014) para um dispositivo *offshore* em escala de laboratório.

1.4. Energia das Ondas

Com relação aos dispositivos de conversão de energia das ondas em energia elétrica, como mencionado anteriormente, diversos princípios físicos de funcionamento podem ser encontrados na literatura: coluna de água oscilante (OWC), corpos oscilantes e galgamento (Cruz e Sarmento, 2004), que é o escopo do presente trabalho. Importantes revisões a respeito das tecnologias empregadas, assim como a sua evolução ao longo do mundo tem sido apresentados na literatura (Zhang et al., 2009; Falcão, 2010; Bahaj, 2011; Zabihian e Fung, 2011, Lin e Fang, 2012), bem como a utilização do *Constructal Design* para a otimização geométrica de conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica.

1.4.1. Estado da Arte sobre Dispositivos de Galgamento

No que se refere aos dispositivos de galgamento, poucos trabalhos têm investigado o princípio de funcionamento deste dispositivo. De acordo com Tedd e Kofoed (2009), grande parte da literatura existente sobre galgamento (*overtopping*) investigou os escoamentos sobre quebra-mares e barragens. Como o interesse tem sido em estruturas de defesa costeira devem ter sempre superfícies livres do dispositivo maiores do que a altura da crista da onda para que o fluxo de água seja o menor possível. Para fins de obtenção de energia das ondas, as maiores vazões mássicas são desejadas e estruturas de menor altura são requeridas.

Dentre os trabalhos realizados, há uma maior concentração no desenvolvimento de estudos experimentais para avaliação de parâmetros construtivos do dispositivo de galgamento. Os principais estudos 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 examinados. 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, a forma do projeto das paredes de orientação 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. Baseou-se nos dados experimentais para prever procedimentos da descarga da água no galgamento acima da encosta são propostas (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 . Em um segundo momento o um novo protótipo em escala reduzida de 1:4.5 do *Wave Dragon*, foi colocado em Nissum Bredning, na Dinamarca, sendo ligado à rede maio 2003 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 realizada 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.

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, 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 analisados, resultando em recomendações sobre a inclinação da rampa do dispositivo. Contudo, não foi empregado o método *Constructal Design* 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.

Margheritini et al. (2009) analisaram um dispositivo denominado *Sea Slot-cone Generator* (SSG). De acordo com os autores, uma chave para o êxito do SSG é o baixo custo da estrutura e a sua robustez. Este artigo descreve 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, clima de ondas. Os resultados dos testes de laboratório foram usados para projetar uma planta piloto e para definir suas características construtivas.

No âmbito numérico, Beels et al. (2010) empregaram um modelo que resolve equações transientes denominado *mild-slope*. O modelo numérico desenvolvido foi implementado em um único *Wave Dragon* e em diversas formações de *Wave Dragon*, 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), conforme ilustra a Fig. 1.14. Como resultado, os autores concluíram que uma fazenda de cinco conversores *Wave Dragon* instalados com um arranjo desalinhado, conforme ilustra a Fig. 1.14, torna-se mais eficiente para o aproveitamento do espaço, sem provocar interferências significativas no rendimento do conversor.

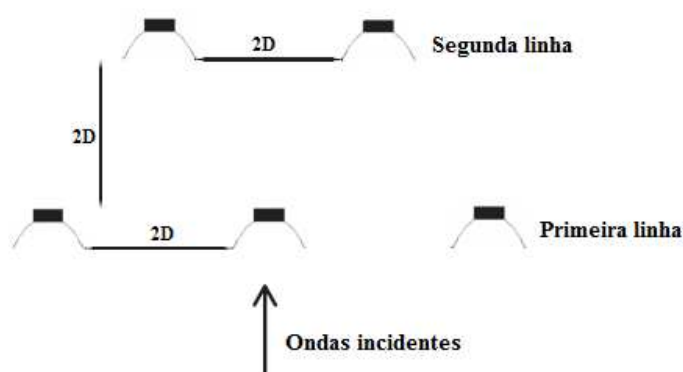


Figura 1.14 – Arranjo com 5 dispositivos *Wave Dragon* instalados em um arranjo desalinhado (Adaptado de Beels et al., 2010).

Iahnke (2010) avaliou a inclinação da rampa de um dispositivo de galgamento em um escoamento bidimensional. 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° . Vale destacar que a área da rampa variava para cada caso, não foi empregado o *Constructal Design* para avaliação das geometrias estudadas.

1.4.2. *Constructal Design* aplicado em Dispositivos para Conversão da Energia das Ondas em Energia Elétrica

A otimização é de fundamental importância na área da engenharia, pois a função clássica do engenheiro é projetar novos sistemas, mais eficientes e mais econômicos, de forma a elaborar planos e procedimentos para a melhoria do funcionamento de sistemas existentes. Portanto, o *Constructal Design*, com base em Teoria *Constructal*, é uma

ferramenta amplamente aplicável para otimização em problemas de engenharia de uma forma geral.

Com relação a aplicação da Teoria *Constructal* na otimização de dispositivos para conversão da energia das ondas em energia elétrica, podemos destacar alguns trabalhos, tais como:

Lopes et al. (2011) foi empregado *Constructal Design* para a otimização geométrica de um sistema de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo OWC, variando o grau de liberdade definido pela razão entre o comprimento do diâmetro da chaminé (l) e o comprimento da câmara OWC (L). Neste estudo foi adotada uma onda com características de laboratório, onde tanto o comprimento da câmara OWC (L) quanto à altura da câmara (H_1) foram mantidos constantes, enquanto que o diâmetro de saída da chaminé (l) foi variado, possibilitando a variação do grau de liberdade l/L . O resultado principal indica que a razão “ótima” é quando $(l/L)_o = 0.6$. O principal objetivo foi maximizar o fluxo de massa de ar na chaminé de saída do dispositivo OWC.

Além disso, Lopes (2012) investigou a influência da geometria de um conversor OWC sobre seu desempenho. O desempenho do conversor é influenciado pelo fluxo de ar que passa pelo dispositivo. Para isso, foram analisadas diferentes dimensões para a geometria da câmara e da chaminé, empregando modelos computacionais 2D e aplicando a Teoria *Constructal*, o que foi inédito, além de modelos computacionais 3D, onde se variou somente a forma da câmara. Esses modelos numéricos foram desenvolvidos no software FLUENT, adotando o método multifásico *Volume of Fluid* (VOF). Foi utilizado o Método dos Volumes Finitos (MVF) para a discretização das equações governantes. O software GAMBIT foi usado para gerar e discretizar o domínio computacional.

Em Oliveira et al. (2012), foi aplicado o *Constructal Design* para otimizar as dimensões da câmara de ar de um dispositivo do tipo OWC. A proposta de otimização foi investigar a relação H_1/L , onde H_1 é a altura e L é o comprimento da câmara OWC, que possibilita extrair a máxima potência disponível na onda incidente. Neste estudo específico foi observado que a melhor geometria para a câmara ocorre para uma relação unitária entre altura e largura do dispositivo OWC.

Em Gomes et al. (2012a) foi realizado um estudo numérico bidimensional sobre otimização geométrica, utilizando *Constructal Design*, de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar do tipo OWC *offshore* em um domínio bidimensional, onde

H_1/L (razão entre a altura e comprimento da câmara OWC) foi variada e H_2/l (razão entre a altura e o diâmetro da chaminé) foi mantido constante. A área da câmara do dispositivo OWC (ϕ_1) e a área total do dispositivo OWC (ϕ_2) foram mantidos constantes, sendo estas as restrições do problema, conforme o *Constructal Design*. Para essa análise foi considerado um clima de ondas regular em escala de laboratório, com período $T = 0.8$ s e comprimento de onda $\lambda = 1.0$ m. A recomendação teórica a respeito da geometria ideal foi definida por $(H_1/L)_o = 0.84$, que é aproximadamente dez vezes mais eficiente do que a pior geometria ($H_1/L = 0.14$). É importante destacar que neste estudo a profundidade de submersão da câmara OWC H_3 é mantida fixa.

A estratégia aplicada em Gomes et al. (2012a) foi estendida para uma onda com período $T = 5$ s, ou seja, uma onda com características reais. Em Gomes et al. (2013a) além do grau de liberdade H_1/L (razão entre a altura e o comprimento da câmara OWC) a profundidade de submersão da câmara OWC (H_3) também foi otimizada. Os resultados apontaram uma recomendação teórica sobre a geometria da câmara OWC que maximiza a eficiência do dispositivo OWC. A maior eficiência obtida (cerca de 40%) é obtida quando $(H_1/L)_o = 0.13$ e $H_3 = 9.50$ m. Por outro lado, a configuração geométrica com o pior desempenho (cerca de 4.40 %) é obtida quando $H_1/L = 0.03$ e $H_3 = 9.00$ m. Ou seja o melhor caso apresenta uma eficiência cerca de dez vezes maior em relação ao pior caso.

Posteriormente, em Gomes et al. (2013b), foi realizada uma comparação entre um dispositivo *onshore* e um dispositivo *offshore*. Foi observado que o melhor desempenho foi obtido para um dispositivo com a configuração offshore para uma razão ótima intermediária da razão entre a altura e comprimento da câmara do OWC, $H_1/L = 0.13$. Outra observação importante é que, em ambas as configurações (*onshore* ou *offshore*) o emprego do *Constructal Design* permitiu a otimização geométrica do dispositivo. Contudo, o efeito da razão H_1/L sobre a potência do dispositivo foi diferente para as duas localizações estudadas.

Em Dos Santos et al. (2013), baseado nos estudos de Gomes (2010) e Lopes (2012), foi empregado *Constructal Design* para a otimização geométrica de um sistema de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo OWC, variando o grau de liberdade definido pela razão entre o comprimento do diâmetro da chaminé (l) e o comprimento da câmara OWC (L). Neste estudo foi adotada uma onda com características de laboratório e, tanto o comprimento da câmara OWC (L), quanto a altura da câmara (H_1), foram mantidos constantes, enquanto que o diâmetro de saída da

chaminé (l) foi variado, possibilitando a variação do grau de liberdade l/L . O objetivo foi maximizar o fluxo de massa de ar na chaminé de saída do dispositivo OWC. O resultado principal indica que a razão ótima foi obtida para $(l/L)_o = 0.6$.

Grimmler (2013) analisou numericamente o princípio de funcionamento do dispositivo de OWC. O objetivo de seu estudo foi investigar a influência de diferentes formas geométricas da câmara sobre a vazão mássica de ar que passava pela turbina. Para isso, geometrias diferentes para o conversor foram analisadas empregando modelos computacionais 2D e 3D. Um modelo computacional desenvolvido nos softwares GAMBIT e FLUENT foi utilizado, em que o conversor OWC foi acoplado a um tanque de ondas. O método *Volume of Fluid* (VOF) e a teoria de 2ª ordem de Stokes foram utilizados para gerar ondas regulares, permitindo uma interação mais realista entre água, ar e OWC. O Método dos Volumes Finitos (MVF) foi utilizado para a discretização das equações governantes. Neste trabalho o *Constructal Design* foi aplicado pela primeira vez em estudos numéricos tridimensionais de OWC para fim de encontrar uma geometria que mais favorece o desempenho do dispositivo. A função objetivo foi a maximização da vazão mássica de ar que passa através da chaminé do dispositivo OWC. Os resultados indicaram que a forma geométrica da câmara influencia na transformação da energia das ondas em energia elétrica. As geometrias das câmaras analisadas que apresentaram maior área da face de incidência das ondas (sendo altura constante), apresentaram também maior desempenho do conversor OWC. A melhor geometria, entre os casos desse estudo, ofereceu um ganho no desempenho do dispositivo em torno de 30% em comparação com o dispositivo com pior desempenho.

Machado et al (2011) estudaram um WEC de galgamento. O princípio operacional do dispositivo é constituído por uma rampa de entrada que conduz ondas para um reservatório um pouco elevado do nível do mar. A energia potencial de água aprisionada no reservatório é então convertida em energia elétrica devido à passagem da água por uma turbina ligada a um gerador. Foi realizado um estudo numérico referente à otimização geométrica de um dispositivo de galgamento por meio de *Constructal Design*. O problema de otimização bidimensional consiste em encontrar a melhor combinação para várias geometrias (variando dimensões de rampa e reservatório) para dispositivos de galgamento. As geometrias foram inseridas em um tanque de ondas regulares. As equações de conservação de massa e quantidade de movimento são resolvidas no código comercial FLUENT, baseado em MVF, aplicando VOF para a interação entre ar, água e o dispositivo. A estrutura foi submetida a duas restrições: o

volume total do tanque e a fração de volume do dispositivo. A razão entre o volume da rampa do dispositivo e o volume total do tanque foi mantida constante. Além disso, o problema apresentou outros parâmetros fixos de concepção, como a razão entre a altura e o comprimento de onda, também conhecida como a inclinação da onda, a relação entre a profundidade e comprimento de onda, a profundidade relativa, e a relação entre a altura da onda e a profundidade (altura relativa da onda). O objetivo foi maximizar vazão mássica de água que passou pela rampa. Como resultado desse estudo, foi obtida a inclinação da rampa que melhor explorou a energia da onda incidente e, portanto, produziu uma quantidade maior de energia elétrica. Os resultados mostraram que havia uma proporção intermediária ideal de que maximizou o valor de massa que passou pelo reservatório (objetivo). Além disso, o galgamento não ocorreu para as relações extremas, comprovando a aplicabilidade do *Constructal Design* para a otimização de problemas de conversão de energia das ondas do mar em elétrica através desse dispositivo.

Posteriormente, em Machado (2012) o princípio operacional de um dispositivo de galgamento é numericamente analisado para dois casos. No primeiro estudo tem-se por objetivo obter uma recomendação teórica, através do método *Constructal Design*, aplicado a um modelo numérico bidimensional, para a otimização geométrica de um conversor do tipo galgamento para dois climas de ondas: $h/\lambda = 0.50$ e $h/\lambda = 0.62$. No segundo estudo é realizada uma abordagem numérica tridimensional de um dispositivo de galgamento com propósito de investigar a influência do ângulo de abertura da rampa sobre a vazão mássica de água que entra no reservatório, ou seja, qual rampa irá conduzir a uma maior geração de energia elétrica. O domínio computacional (2D e 3D) foi gerado com o software GAMBIT e a análise numérica foi realizada com um código de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) baseado no Método de Volumes Finitos (MVF), FLUENT. O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) e um gerador de ondas foram adotados para gerar ondas regulares em um tanque de ondas onde foi inserido o dispositivo de galgamento, garantindo uma interação adequada entre ar, água e o dispositivo. Os resultados mostraram a aplicabilidade do método *Constructal Design* para a otimização de dispositivos de conversão de energia das ondas em energia elétrica do tipo galgamento. Por exemplo, para o clima de ondas $h/\lambda = 0.50$, a geometria ótima teve um desempenho 20 vezes maior do que a pior geometria onde o galgamento ocorreu. Além disso, os resultados encontrados para o caso tridimensional foram promissores e encorajam a realização de novos estudos de otimização.

Com relação ao dispositivo de galgamento, em Dos Santos et al. (2013) foi realizado um estudo numérico referente à otimização geométrica de um dispositivo de galgamento *offshore* e em escala de laboratório por meios do *Constructal Design*. A ideia básica foi semelhante ao estudo realizado em Iahnke (2010) e Machado (2012) contudo em Dos Santos et al. (2013): o volume total e a fração de volume da rampa foram definidas como restrições. Assim, a razão entre o volume da rampa do dispositivo e o volume total do tanque foi mantida constante. Além disso, o problema apresentou outros parâmetros fixos referentes ao tipo de onda empregado, como, por exemplo, a razão entre a altura e o comprimento de onda (declividade da onda), a relação entre a profundidade e comprimento de onda (profundidade relativa) e a relação entre a altura da onda e a profundidade (altura relativa da onda). O objetivo foi maximizar vazão mássica de água que entrou no reservatório do dispositivo. Os resultados mostraram que havia uma razão ótima intermediária de $(H_1/L_1)_o = 0.6$, que maximizou a quantidade de massa que entrou no reservatório (objetivo). Além disso, o galgamento não ocorreu para as relações extremas. Para o caso estudado também foi observada uma razão ótima local para $H_1/L_1 = 1.0$. Os resultados de uma forma geral comprovaram a aplicabilidade do *Constructal Design* para a otimização de problemas de conversão de energia das ondas do mar em elétrica através desse dispositivo.

Posteriormente, em Dos Santos et al. (2014), foi realizado um estudo numérico para determinar a otimização geométrica de um WEC do tipo galgamento para algumas profundidades relativas: $h/\lambda = 0.3, 0.5$ e 0.62 empregando o *Constructal Design*. O objetivo principal é a avaliação da influência da profundidade relativa sobre a da geometria da rampa (relação entre a altura e o comprimento da rampa: H_1/L_1), bem como, investigar a razão que conduz a uma maior quantidade de água ao reservatório. No estudo apresentado, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e a equação para o transporte de fração volumétrica foram resolvidas com o método dos volumes finitos (MVF). Para a solução da interface água-ar é utilizado o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF). Os resultados mostraram que a forma ótima, $(H_1/L_1)_o$, tem uma forte dependência da profundidade relativa, isto é, não há uma geometria universal que conduza ao melhor desempenho de um dispositivo de galgamento para diversas condições de onda.

Em todos os estudos acima mencionados os resultados indicaram que o *Constructal Design* pode ser usado de maneira satisfatória para a maximização do desempenho de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia

elétrica. Apenas com algumas redistribuições geométricas (imperfeições do problema) foi possível obter geometrias que conduzem a desempenhos muito superiores comparado com geometrias não otimizadas. Ainda deve ser destacado que das três classificações apresentadas no item 1.2. por Cruz e Sarmento (2004), que são associadas ao modo de conversão de energia das ondas em energia elétrica, não foram realizadas aplicações do *Constructal Design* em dispositivos classificados como de Corpos Oscilantes pois, esta aplicação não foi localizada na literatura para estes conversores.

Vale destacar ainda que, os estudos relacionados à otimização geométrica dos dispositivos de galgamento empregando o *Constructal Design* foram realizadas em dimensões de escala de laboratório e para uma localização *offshore*. Consequentemente, entende-se que a avaliação da geometria para um dispositivo de galgamento em escala real com uma localização *onshore* representa uma nova contribuição do presente trabalho. Também se ressalta que não foram encontrados estudos na literatura relacionados a proposta feita aqui.

1.5. Organização do Texto

A disposição do texto é estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução

O capítulo inicial é de introdução, onde é apresentada uma descrição sobre a atual situação das fontes de energia, uma revisão bibliográfica sobre as ondas do mar como uma fonte renovável de energia, atualização do estudo do estado-da-arte sobre as tecnologias de aproveitamento da energia das ondas do mar, com foco nos dispositivos de galgamento, uma revisão de estudos sobre energia das ondas descrevendo o estado da arte sobre dispositivos de galgamento e o *Constructal Design* aplicado em dispositivos para conversão da energia das ondas em energia elétrica e, por fim, os objetivos do presente trabalho e a sua organização.

Capítulo 2: Fundamentos de Teoria de Ondas Oceânicas

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre teoria de ondas oceânicas, começando por uma introdução à teoria das ondas, após indicando os

elementos de uma onda, e, por fim, mostrando a teoria linear das ondas, empregada neste trabalho.

Capítulo 3: Fundamentos de Teoria *Constructal*

No capítulo 3 são abordados aspectos básicos encontrados na bibliografia sobre a Teoria *Constructal*. Em seguida, são feitas algumas considerações teóricas e sobre a aplicação do método *Constructal Design* em problemas de engenharia de uma forma geral.

Capítulo 4: Descrição do Problema e Modelagem Matemática

Neste capítulo é apresentada a modelagem matemática empregada para modelar o fenômeno físico em análise e a aplicação *Constructal Design* no dispositivo de galgamento. São especificados os parâmetros fixos empregados e as restrições impostas para a otimização dos dispositivos. 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. As componentes de velocidade na direção de propagação de onda (x) e na direção vertical (z) para o canal de entrada são baseados na teoria linear de Airy. Essas funções tem o propósito de imitar o efeito de um gerador de ondas inserido na entrada do tanque de ondas, sem a necessidade de impor geradores de ondas que iriam requerer uso de técnicas computacionais como malhas móveis.

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 de um dispositivo de galgamento, utilizando *Constructal Design*, em escala real. Para as situações foram analisados e otimizados 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).

Capítulo 7: Conclusões e Propostas de Continuidade

No capítulo 7 são expostas as conclusões referentes ao estudo numérico da geometria de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real empregando *Constructal Design*, as contribuições desta pesquisa. Além disso, são apresentadas sugestões de continuidade do trabalho.

Capítulo 8: Referências Bibliográficas

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

2. FUNDAMENTOS DE TEORIA DE ONDAS OCEÂNICAS

2.1. Introdução à Teoria das Ondas

A palavra onda sugere uma larga distribuição de energia, preenchendo o espaço através do qual a mesma se desloca. Classificam-se então as ondas em três tipos: Ondas Mecânicas, Ondas Eletromagnéticas e Ondas de Matéria (Halliday et al., 2002).

As Ondas Mecânicas são as mais encontradas, existem ondas sonoras no ar e na água e ondas sísmicas na crosta, no manto (segunda camada da Terra, localizada entre a crosta e o núcleo terrestres) e no núcleo da Terra. Suas principais características são que, além de governadas pelas Leis de Newton, necessitam de um meio físico como ar, água, uma bandeira, uma corda esticada ou uma haste de aço para existir. Já as Ondas Eletromagnéticas não necessitam de meio físico para se propagar. A mais familiar destas ondas é a luz visível, quase tão familiar quanto os raios X, as micro-ondas e as ondas responsáveis por ativar aparelhos de rádio e televisão. Todas as ondas eletromagnéticas se propagam através do vácuo a velocidade da luz. Menos familiares são as Ondas de Matéria que são governadas pelas leis da física quântica, associadas a feixes de partículas, tais como prótons e elétrons (Halliday et al., 2002).

Neste trabalho foram empregadas as Ondas Mecânicas, já que as Ondas Oceânicas se classificam nesta classe, pois mesmo não transportando massa são capazes de transportar energia cinética. Justificando assim sua aplicação na transformação desta energia em energia elétrica.

2.2. Como se Formam as Ondas

As ondas na superfície livre de líquidos existem devido à tendência natural de permanecer no estado de equilíbrio. Quando um objeto é largado num tanque de água, um distúrbio é criado e forma a onda de superfície. 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 (McCormick, 1973).

Segundo Dean e Dalrymple (1991), outro fator que pode causar um distúrbio na superfície livre é a ação dos ventos. E ainda afirmam que as ondas podem ocorrer de

todos os tamanhos e formas, dependendo da magnitude das forças que agem sobre a água.

De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), as ondas começam com o vento, que surge como resultado do aquecimento da Terra pelo sol. Devido ao formato irregular da Terra, o sol não a aquece de maneira uniforme. Normalmente, alguns pontos ficam mais aquecidos que outros. À medida que parte do ar se aquece, ele se torna menos denso (torna-se mais leve) e desloca-se para cima. Isso gera espaço disponível para ar mais denso e frio, que pode mover-se para ocupar esse espaço. O influxo de ar nesses espaços denomina-se brisa. À medida que essa brisa percorre a superfície da água, a fricção gera atrito, causando ondulações. O vento continua a fazer pressão contra essas ondulações, em um efeito causa/consequência que, por fim, gera uma grande onda. Desta forma, pode-se afirmar que essa ação é uma transferência de energia solar do vento para as ondas.

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).

Desta forma, descrever ondas no oceano é de grande complexidade, uma vez que elas são produto de diversas interações e superposições. Os principais fatores que influenciam na agitação marítima são as ondas gravitacionais, as marés, os ventos, as tempestades e os deslocamentos de gelo ou de terra (Carneiro, 2007).

Os modelos para descrição do comportamento de ondas podem ser classificados de acordo com teorias de ondas regulares e irregulares. Essa classificação também é 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 (Gomes, 2010). 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 de um dispositivo de galgamento. Na Figura 2.1, é possível observar as principais características das ondas regulares.

2.3. Elementos de uma Onda

Os elementos básicos de uma onda oceânica são descritos na Fig. 2.1.

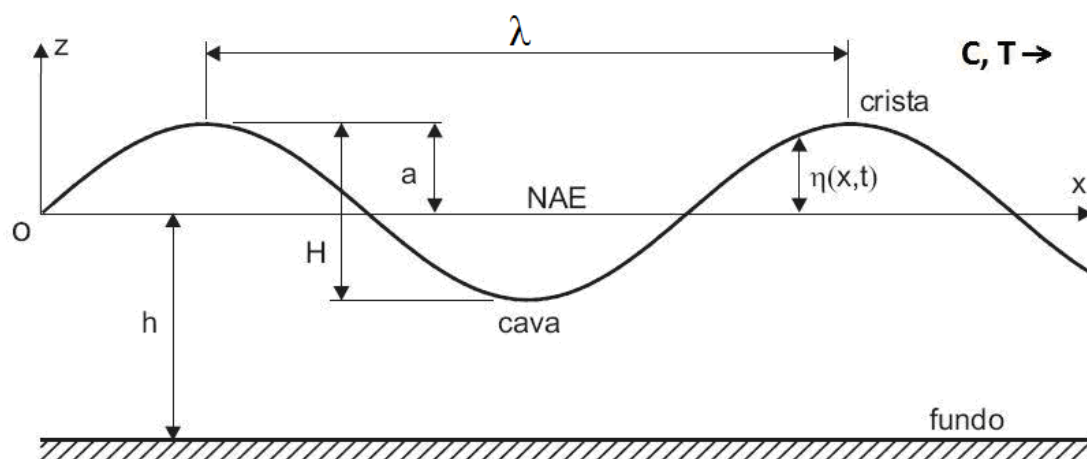


Figura 2.1 – Elementos da Onda (Carneiro, 2007).

Ainda de acordo com a Fig. 2.1, os principais elementos de uma onda são:

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

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.

Diversas teorias de ondas foram desenvolvidas, as quais podem ser aplicadas para diferentes casos, dependendo das condições ambientais. Os principais fatores que devem ser levados em consideração para a determinação da teoria a ser aplicada são a altura 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.

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).

Segundo 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. 2.2.

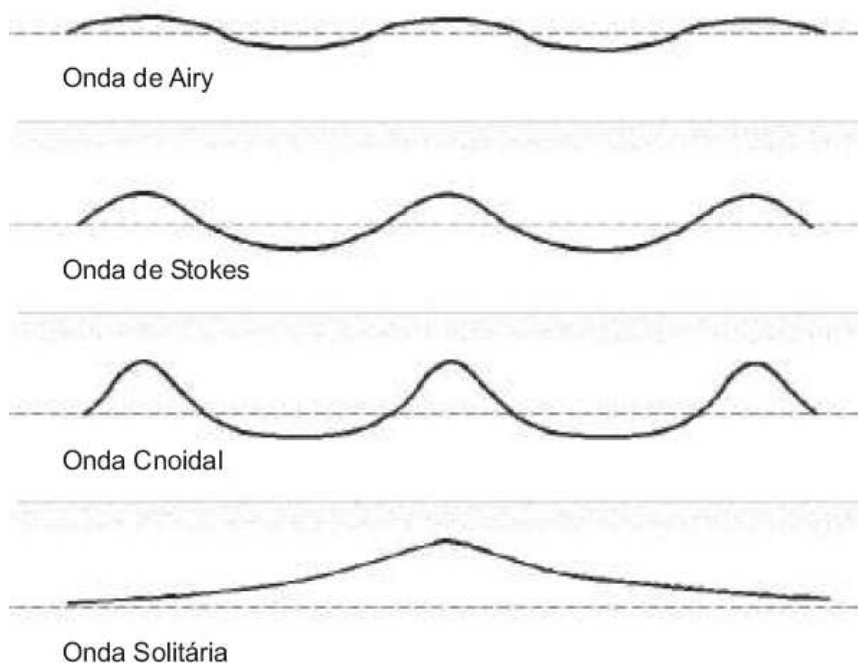


Figura 2.2 – Teoria das ondas (Carneiro, 2007).

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 Figura 2.3 é possível comparar o formato dos tipos de ondas de gravidade. Conhecendo-se os parâmetros h , H , T e g (gravidade) e com a ajuda do gráfico apresentado na Fig. 2.3 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 assim o efeito de um gerador de ondas, simulando o efeito do escoamento no mar.

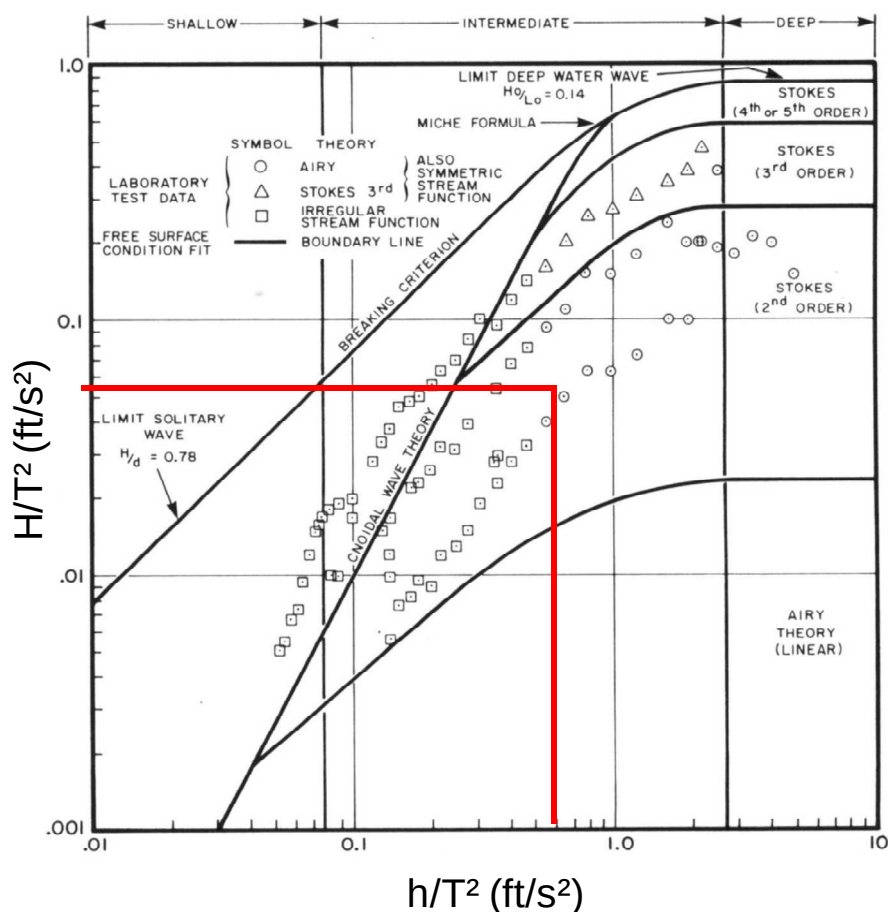


Figura 2.3 – Aplicabilidade das teorias de ondas (Chakrabarti, 2005).

Considerando as características da onda empregada nesse trabalho ($T = 7.5$ s, $H = 1.0$ m, $\lambda = 65.4$ m e $h = 10.0$ m) a mesma possui uma melhor descrição através da Teoria de Stokes de 2ª ordem. Contudo, de acordo com Chakrabarti (2005) nesta faixa de aplicação existem resultados experimentais que demonstram que a consideração da

teoria linear não causa prejuízos na caracterização dos campos de velocidade e na fenomenologia do escoamento. Em função disso e também pela maior simplicidade de aplicação e facilidade de convergência, neste estudo considerou-se a teoria linear para definir a onda empregada nas presentes simulações.

2.4. Teoria Linear

A abordagem mais elementar da teoria de ondas superficiais de gravidade é conhecida como teoria linear ou teoria de pequena amplitude. Desenvolvida por Airy em 1845. Como já foi comentado, essa teoria é válida quando a declividade, a profundidade relativa e a altura de onda relativa são pequenas, portanto, ondas de pequena amplitude e pequeno comprimento em grandes profundidades (Dean e Dalrymple, 1991).

A teoria linear das ondas pode ser aplicada a um conjunto muito particular de ondas que não existem na natureza, porém este modelo é útil para a compreensão de muitos fenômenos e na solução de um grande número de problemas reais (Carneiro, 2007).

Na abordagem da teoria linear das ondas podem-se realizar as seguintes simplificações: fluido incompressível, portanto a massa específica da água será considerada constante; altura da onda considerada pequena quando comparada ao seu comprimento e com a profundidade da água; profundidade da água constante; desconsideração dos efeitos da turbulência, viscosidade e tensão superficial; escoamento bidimensional e irrotacional (vorticidade nula).

Serão estudadas as equações que modelam o problema de acordo com Holthuijsen (2007), Gomes (2010) e Dos Santos et al. (2014), sendo a equação da continuidade:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

definindo-se

$$u_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.2)$$

e

$$u_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2.3)$$

substituindo a Eq. (2.2) e a Eq. (2.3) na Eq. (2.1), podemos representá-la pela equação de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.4)$$

onde: u_x e u_z representam a velocidade nas direções x e z , respectivamente; ϕ o potencial de velocidade; x e z as coordenadas do plano cartesiano.

Na Equação (2.4) as seguintes condições de contorno são assumidas:

Condição de contorno cinemática na superfície de fundo, considerando-a rígida e impermeável:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \text{ em } z = -h \quad (2.5)$$

Condição de contorno cinemática na superfície livre:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t}, \text{ em } z = 0 \quad (2.6)$$

Condição de contorno dinâmica na superfície livre:

$$p = 0, \text{ em } z = 0 \quad (2.7)$$

onde p representa a pressão na superfície da água. A equação de Bernoulli na superfície $z = \eta$ é dada por:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0, \text{ em } z = 0 \quad (2.8)$$

onde g representa a aceleração da gravidade.

Segundo Massel (1999), a solução da Eq. (2.4) é dada por:

$$\phi(x, z, t) = \frac{H}{2} \frac{g}{\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t) \quad (2.9)$$

onde k representa o número de onda e é dado por:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (2.10)$$

e σ representa a frequência da onda que pode ser calculada por:

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (2.11)$$

A partir das Eqs. (2.8) e (2.9) é obtida a equação da elevação da superfície do mar:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.12)$$

E a partir das Eqs. (2.6), (2.9) e (2.12) a seguinte equação é obtida:

$$\tanh(kh) = \frac{\sigma^2}{gk} \quad (2.13)$$

Então, substituindo as Eqs. (2.10) e (2.11) na Eq. (2.13), obtém-se:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (2.14)$$

Para águas profundas ($L < 2h$), kh é grande e $\tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) = 1$. Assim, é possível calcular o comprimento de onda por:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.15)$$

Esta teoria, apesar de válida em alguns casos, 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 não é a que conduz aos melhores resultados em uma comparação com medições experimentais do comportamento das ondas (Carneiro, 2007). Contudo, há situações dentro da região predita pela teoria de Stokes de 2ª ordem onde medições experimentais mostram que a teoria linear é adequada para a caracterização dos campos de velocidades (Chakrabarti, 2005).

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 linear de Airy e são dadas respectivamente por Chakrabarti (2005). Estas equações serão apresentadas no capítulo 4, Eqs. (4.10) e (4.11), quando forem descritas as condições de contorno.

3. FUNDAMENTOS DE TEORIA CONSTRUCTAL

3.1. Introdução à Teoria *Constructal*

A Teoria *Constructal* foi criada por Adrian Bejan, em 1997, quando uma filosofia para solução geométrica foi aplicada para o arrefecimento de um condutor eletrônico. Esse estudo teve uma importância significativa, pois foi o ponto de partida para aplicação da Teoria da Constructal em problemas de engenharia e outros ramos da ciência (Bejan, 1997; Bejan, 2000).

De uma maneira geral, a Teoria *Constructal* explica como a geração de estruturas submetidas a alguma espécie de fluxo, que são vistas em qualquer lugar na natureza (secção transversal de rios, pulmões, movimentação de massas na atmosfera, tecidos vascularizados entre outros), pode ser fundamentada através de um princípio físico do acesso aos fluxos no tempo (Bejan, 2000).

Este princípio é a Teoria *Constructal* que afirma que para um sistema de fluxo persistir no tempo (sobreviver) ele deve evoluir de tal modo que permita o acesso mais fácil para as correntes que fluem através do mesmo. Esse não é apenas um princípio físico no qual a forma geométrica e a estrutura são deduzidas e que servem para mostrar que as formas da natureza são geradas deterministicamente, mas também um método de engenharia para avaliação das geometrias em qualquer sistema de fluxo, desde problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor a problemas de mecânica dos sólidos (Bejan e Lorente, 2006a).

Na natureza, a forma e estrutura dos sistemas de fluxo animados ou inanimados se adaptam de forma a proporcionar o seu melhor fluxo global, ou seja, de forma a distribuir otimamente as imperfeições existentes no sistema, independente dos sistemas serem animados ou inanimados (Bejan e Zane, 2012).

A Teoria *Constructal* está ligada à melhor disposição e distribuição de geometrias. Exemplos de sistemas construídos que se adaptam para melhor conduzir o seu sistema de fluxo podem ser encontrados na natureza, como por exemplo a ramificação dos vasos sanguíneos nos pulmões de um corpo humano, que é necessária para que o sangue oxigenado chegue aos demais órgãos. Outro exemplo é a ramificação das árvores, que tem a função de transporte da seiva que nutre a planta. Dessa maneira, a forma circular da seção transversal dos dutos (veias, tubos, canais), a forma das seções transversais dos rios e a maneira como as veias se interligam para atingir o coração, são

determinadas por um princípio, isto é, existe uma direção favorável e, portanto, dita preferencial, para onde os sistemas abertos (vivos) se deslocam. De uma forma geral, os escoamentos que ocorrem na natureza apresentam o mesmo formato estrutural, isso se deve à tendência desses sistemas buscarem o melhor acesso ao fluxo ou, ainda, minimizar as resistências ao escoamento (Bejan, 2000). As configurações ramificadas (em forma de árvore) são muito comuns na natureza pois refletem a melhor distribuição de escoamentos de ponto para volume ou volume para ponto.

Como resultado da Teoria *Constructal* as formas (arquiteturas) dos sistemas de fluxo não se desenvolvem por acaso, mas como resultado da luta permanente para um melhor desempenho sendo, portanto, necessária uma evolução no tempo. Em sistemas de engenharia e na natureza são permanentes essas modificações na geometria ao longo do tempo, baseadas no fluxo, como podem ser constatadas em bacias hidrográficas, circulações globais, árvores e formas dos animais (Bejan e Lorente, 2006b).

Um efeito básico da Teoria *Constructal* é o de que o formato de um sistema e a arquitetura do escoamento interno não se desenvolve por acaso, mas são resultados de uma busca permanente por um melhor desempenho e, por esse motivo, devem evoluir com o tempo. Sabe-se que simetria translacional em relação à temperatura, pressão e potencial químico representam, respectivamente, equilíbrio térmico, mecânico e químico. No entanto, é quase impossível encontrar a geometria perfeita para sistemas animados, pois eles se encontram muito longe do equilíbrio. Mesmo assim, os sistemas trabalham de modo a minimizar e balancear as resistências apresentadas pelas várias correntes internas e externas sob as existentes restrições globais. Falta de equilíbrio significa escoamento assimétrico e imperfeições. As imperfeições podem ser geométricas ou físicas e são otimamente dispostas ao longo do sistema (Bejan, 2000). A forma atual dos sistemas naturais que estavam livres para se modificarem no passado é resultado de uma distribuição ótima das imperfeições, enquanto que sistemas de engenharia seguem o mesmo objetivo e metodologia a fim de encontrar o desempenho ótimo.

3.2. O Método *Constructal Design*

Constructal Design é o método empregado para aplicar a Lei *Constructal*, sendo baseado no princípio de objetivos e restrições (locais e globais). O Método *Constructal* fundamenta-se na geração de uma arquitetura de escoamento. Por exemplo, uma

arquitetura em formato de árvore desenvolve-se a partir de partes menores até grandes conjuntos. A estrutura ótima é construída a partir da otimização de um volume em cada uma de suas escalas de comprimento, em uma sequência hierárquica que começa em blocos menores e procede até os maiores, os quais são chamados construções (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008).

O *Constructal Design* é um método empregado para a obtenção de formas geométricas ótimas de sistemas submetidos a alguma espécie de fluxo. De acordo com este método o fluxo é maleável e a geometria é deduzida a partir de um princípio de maximização do desempenho global. Além disso, a geometria deve ser submetida a restrições globais e variada de acordo com seus graus de liberdade (Bejan, 2000). Para aplicar o *Constructal Design* na otimização geométrica de um sistema físico é necessário, basicamente, um objetivo (uma grandeza a ser otimizada: vazão mássica, potência, energia e etc.), graus de liberdade (parâmetros geométricos que podem variar durante o processo de otimização) e restrições geométricas (parâmetros que são mantidos constantes ao longo do processo de otimização) (Bejan e Lorente, 2008).

De acordo com o Método *Constructal*, cada sistema em escoamento existe por um propósito (ou objetivo, função). Na natureza o escoamento ocorre sob um largo intervalo de escalas com o propósito de reduzir os gradientes existentes (temperatura, pressão). Este princípio é utilizado para produção de projetos novos em diversas áreas, como por exemplo na eletrônica e em células de combustível (Bejan e Lorente, 2006b). Em estruturas de engenharia, os fluxos de massa e calor ocorrem pelo mesmo motivo e, através da dissipação mínima de energia, os sistemas reduzem a quantidade de combustível necessária, tornando-os mais eficientes (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008).

O propósito de um conversor de energia das ondas, por exemplo, é extrair o máximo trabalho possível do escoamento. O desempenho é uma medida de quanto o sistema consegue alcançar seu propósito. O projeto de sistemas de engenharia evolui ao longo do tempo em direção às configurações que oferecem melhor desempenho, ou seja, melhor alcance de seu propósito.

O objetivo do sistema é global. É apresentado com restrições fixas como, por exemplo a área da rampa de um equipamento de conversão da energia das ondas de galgamento. O projetista do sistema agrupa todos os componentes do sistema e otimiza a organização a fim de atingir o máximo desempenho. Para isso, ele “constrói” a arquitetura de escoamento ótima. Assim, a arquitetura do escoamento (formato,

estrutura) é deduzida, não assumida em antecipação. Diferentemente de processos de otimização baseados em variáveis operacionais, a Teoria *Constructal* foca-se na construção da arquitetura de escoamento ótima, interna e externa.

A otimização apenas faz sentido quando um propósito existe e o sistema possui liberdade para alterar sua configuração a fim de encontrar a melhor solução no âmbito de um conjunto de soluções. As restrições podem variar desde materiais disponíveis, propriedades de materiais, área ou volume alocado para o sistema, requisitos para não atingirem-se valores máximos de temperatura, pressão e tensões, por exemplo. Dependendo da natureza do sistema, a otimização pode se focar, por exemplo, em análises de energia útil disponível (exergia) ou termoeconômicas e, ainda, na minimização dos valores máximos de temperatura, pressão ou tensão (Reis, 2006).

A Lei *Constructal* agregou ao estudo de otimização em problemas de engenharia o conhecimento de que a estrutura do escoamento não é assumida em antecipação, mas sim uma consequência. O objetivo da otimização depende das características do problema. Em geral, a Lei *Constructal* define regras para a estrutura otimizada em cada escala, desde o sistema elementar (a menor escala) até as maiores construções (escalas de mais alta ordem). As regras são deduzidas, não assumidas. Resultados mostram que essas regras mudam de um nível de escala para outro, conforme o tamanho da complexidade aumenta (Reis, 2006).

A otimização é de fundamental importância na área da engenharia, pois a função clássica do engenheiro é projetar novos sistemas, mais eficientes e mais econômicos, bem como, elaborar planos e procedimentos para a melhoria do funcionamento de sistemas existentes. Portanto, o *Constructal Design*, com base em Teoria *Constructal*, é uma ferramenta amplamente aplicável para otimizar os sistemas de fluxo em problemas de engenharia.

Conforme Ravindran et al. (2006), na engenharia de projetos a otimização do design de peças que irão compor uma estrutura vem a facilitar o processo final de produção, pois a forma de cada peça pode ser otimizada a fim de aumentar a eficiência do sistema. Para isso, o problema de otimização se resume à seleção dos valores das dimensões da peça e à seleção das variáveis que irão resultar no melhor desempenho a partir dos critérios estipulados.

Nos problemas de engenharia, a aplicabilidade do *Constructal Design* tem sido amplamente discutida em diversos problemas de engenharia como trocadores de calor, turbinas, geradores de vapor e otimização com base na viabilidade econômica para

construção de equipamentos térmicos. Alguns exemplos são apresentados nos trabalhos de Azad e Amidpour (2011), Beyene e Peffley (2009), Kang et al. (2010), Kim et al. (2010) e Kim et al. (2011). Esse método foi utilizado nesses estudos, predominantemente nas áreas de mecânica dos fluidos e transferência de calor. Entretanto, no trabalho de Isoldi et al. (2013) o *Constructal Design* foi empregado na área de mecânica dos sólidos, para otimizar o comportamento mecânico de placas finas perfuradas sujeitas à tração e à flambagem.

Dentro desse mesmo assunto, Lorente et al. (2010) apresentaram uma analogia entre a configuração de calor e do fluxo de fluido com a distribuição de tensões, denominada de “fluxo de tensões” (“*flow of stresses*”). O princípio comum é a evasão de estrangulamentos de fluxo, esta que indica os sistemas de fluxo (fluido, calor e tensões), apresenta alguns exemplos e trata de estabelecer uma relação entre o valor do fluxo de tensões, do escoamento de fluido e fluxo de calor e assim gerar a configuração do sistema de fluxo de acordo com a Lei *Constructal*.

A Teoria *Constructal* foi empregada por Bello-Ochende e Bejan (2005), para determinar a configuração geométrica que leva à maximização da taxa de transferência de calor em dutos e escoamentos cruzados sobre feixes de tubos. O Método *Constructal Design* também tem sido utilizado para a otimização da transferência de calor em aletas em forma de T-Y (Bejan e Almogbel, 2000; Lorenzini e Rocha, 2006) e T-Y com aletas estendidas (Lorenzini et al., 2011), bem como, para minimização da resistência térmica global de corpos submetidos à geração de energia com remoção desta através do uso de cavidades ou aletas invertidas (Biserni et al., 2004).

No âmbito dos problemas com múltiplos objetivos, Gosselin et al. (2004) apresentaram um estudo de otimização que leva em consideração a transferência de calor e a resistência mecânica. Essas duas funções são consideradas desde o início do projeto. Neste trabalho é demonstrado que formas e estruturas de vigas podem ser otimizadas para enfrentar ataques térmicos. Fundamentalmente o trabalho defende que podem ser combinadas várias funções caracterizando um projeto multi-objetivo a fim de obter, nesse caso, um melhor desempenho na resistência mecânica frente à transferência de calor. Os autores ainda destacaram a possibilidade de realizar tarefas multi-objetivas em outros projetos de dinâmica dos fluidos computacional (CFD, do inglês - *Computational Fluids Dynamics*).

A Teoria *Constructal* também tem sido utilizada para otimizar a configuração da geometria de dissipadores de calor, canais de refrigeração e micro-canais, vide estudos

de Bello-Ochende et al. (2007a), Bello-Ochende et al. (2007b). O objetivo do estudo apresentado por Bello-Ochende et al. (2007a) foi a maximização da condutividade térmica global, ou a minimização de resistência térmica. Para atingir este objetivo, a configuração da geometria foi submetida às seguintes restrições globais: volume fixo do dissipador de calor de resfriamento de canal e volume fixo do sólido condutor.

O trabalho de Wang et al. (2010) trata dos casos onde, nos moldes sólidos, a criação de uma estrutura de canais é eficiente para que ocorra o escoamento de resina, oportunizando uma estrutura vascular de canais de baixa resistência sobre um meio de alta resistência.

É possível observar na literatura que, de uma forma geral, o uso do *Constructal Design* associado à modelagem computacional tem sido bem sucedido para a recomendação da forma e estrutura em diversos problemas de engenharia. Em função disso, recentemente, tem se buscado a aplicação desse método para a avaliação geométrica dos dispositivos conversores de energia das ondas em energia elétrica, auxiliando na obtenção de recomendações de dispositivos com maior capacidade de aproveitamento da energia contida na onda.

4. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MODELAGEM MATEMÁTICA

Em ambos os estudos o domínio computacional foi gerado com 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 tange a geração da onda, a mesma foi realizada através da imposição de um campo de velocidades conhecido e caracterizado pela teoria linear de ondas, que no software FLUENT é realizado 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) e Dos Santos et al. (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) e Iahnke (2010).

4.1. Constructal Design 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 é 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 para um escoamento com uma profundidade $h = 10.0$ m para uma onda com comprimento de onda de $\lambda = 65.4$ m (profundidade relativa de $h/\lambda = 0.15$) e período $T = 7.5$ s. Neste estudo será mantida fixa a relação entre as áreas da rampa e do tanque de ondas ($\phi = A_r/A_T = 0.012$). Também foram mantidos fixos outros parâmetros $H_T/L_T = 0.0612$ 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, será 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 simulados 7 diferentes submersões. Para cada valor de S foram simulados várias razões de H_1/L_1 .

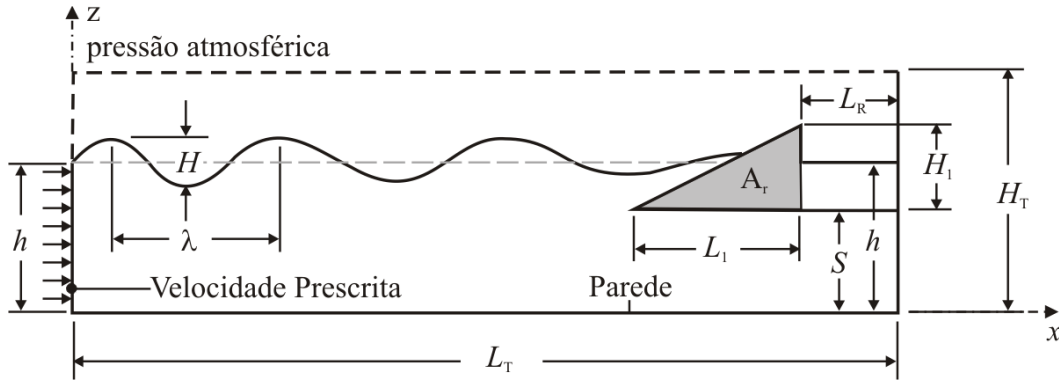


Figura 4.1 – Domínio computacional de um dispositivo de galgamento em escala real com dois graus de liberdades.

No âmbito do *Constructal Design*, a otimização 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 volume (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, o mesmo é dividido em dois passos conforme ilustrado na Fig. 4.2. 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 . O valor máximo encontrado para a massa de água que entra no

reservatório será denominada a massa de água uma vez maximizada, m_m , e a correspondente razão H_1/L_1 será denominada a razão uma vez otimizada, $(H_1/L_1)_o$. Em um segundo momento, o mesmo processo é repetido para vários valores da submersão S (para cada S a razão H_1/L_1 é novamente variada). Nesse caso, a massa de água máxima obtida é duas vezes maximizada, m_{mm} , e a razão H_1/L_1 é duas vezes otimizada, $(H_1/L_1)_{oo}$. Neste estudo específico foi realizado um total de 72 simulações distribuídas da seguinte forma para cada submersão: $S = 3.5$ m (7 casos), $S = 4.0$ m (8 casos), $S = 4.5$ m (9 casos), $S = 5.0$ m (14 casos), $S = 5.5$ m (11 casos), $S = 6.0$ m (13 casos) e $S = 6.5$ m (10 casos).

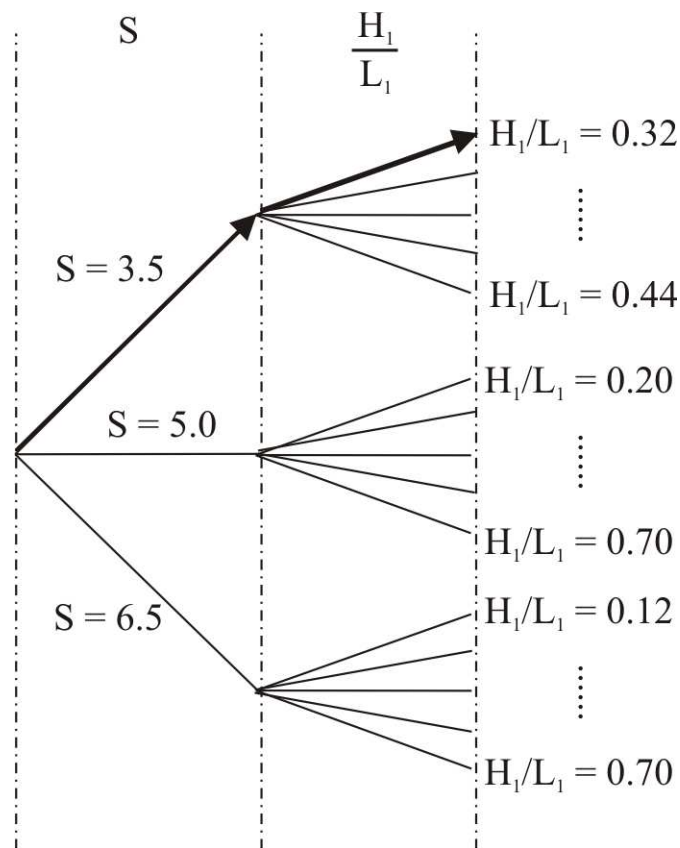


Figura 4.2 – Ilustração do processo de otimização aplicado ao dispositivo de galgamento com dois graus de liberdade.

4.2. O modelo Multifásico *Volume of Fluid* (VOF)

A análise consiste em encontrar a solução de um escoamento de uma mistura ar-água. Por isso, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma

equação para o transporte de fração volumétrica são resolvidas com o MVF. Mais especificamente usando o software FLUENT.

A equação de conservação da massa para a mistura ar e água em um escoamento isotérmico, laminar e incompressível é dada por (Schlichting, 1979; Dos Santos et al., 2014):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4.4)$$

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

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.5)$$

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, consequentemente o vetor de forças externas será desconsiderado. O termo $\bar{\bar{\tau}}$ é o tensor taxa de deformação (N/m^2), que para um fluido Newtoniano, é dado por:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[\left(\nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot \vec{v}^T \right) \right] \quad (4.6)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica (kg/(ms)), I é um tensor unitário. O segundo termo do lado direito da Eq. (4.6) descreve as tensões desviadoras ou deviatórias (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.

Para lidar com o escoamento da mistura de ar e água e avaliar a sua interação com o dispositivo, é empregado o método *Volume of fluid* (VOF). O VOF é um modelo multifásico usado para escoamentos de fluido com duas ou mais fases. Neste modelo, as fases são imiscíveis, ou seja, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra fase (Ling et al., 2001; Lv et al., 2011).

Nas simulações deste estudo, são consideradas 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):

$$\frac{\partial(\rho\alpha_{\text{água}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\alpha_{\text{água}} \vec{v}) = 0 \quad (4.7)$$

Vale ressaltar que 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:

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (4.8)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (4.9)$$

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 onda (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 linear de Airy e são dadas respectivamente por (Chakrabarti, 2005):

$$u(x, z) = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(h + z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (4.10)$$

$$w(x, z) = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(h + z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (4.11)$$

onde H é a altura de onda (m), k é o número de onda dado por $k = 2\pi/\lambda$ (m^{-1}), h é a profundidade da água (m), T é o período da onda (s), σ é a frequência dada por $\sigma = 2\pi/T$ (rad/s) e t é o tempo (s).

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 - veja as superfícies tracejadas na Fig. 4.1). Nas superfícies inferior, lateral direita, bem como, na superfície do dispositivo de galgamento é imposta uma condição de não-deslizamento e impermeabilidade ($u = w = 0$ m/s).

Com relação 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

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

5.1. Modelagem Numérica

Três tipos de métodos podem ser empregados na solução de um problema de engenharia: experimentais analíticos e numéricos. Cada um destes tipos de métodos apresenta vantagens e desvantagens sobre os demais dependendo do problema e dos recursos disponíveis para resolvê-lo. Discussões a respeito podem ser vistas nos textos de Ferziger e Peric (1997), Maliska (2004), Fortuna (2000), Versteeg e Malalasekera (1995), Patankar (1980) e Tannehill et. al (1997). Este trabalho descreve uma resolução teórica, aplicando a conservação das equações de movimento, massa, energia e condições de contorno, uma vez que a resolução proposta aplica a Modelagem Matemática e Métodos Numéricos, conforme pode ser observado na Fig. 5.1.

O uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos da engenharia e da física é hoje uma realidade, graças ao vertiginoso desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento. Em função dessa disponibilidade computacional, que cresce exponencialmente, o desenvolvimento de algoritmos para a solução dos mais diversos problemas tem recebido enorme atenção dos analistas numéricos e engenheiros, fazendo aumentar, também em taxas acentuadas, o número de pesquisadores e usuários da simulação numérica. Além disso, a versatilidade e generalidade dos métodos numéricos para simulação de problemas de engenharia, e a relativa simplicidade de aplicação dessas técnicas, são outros fatores motivadores para seu uso (Maliska, 2004).

Ainda 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.

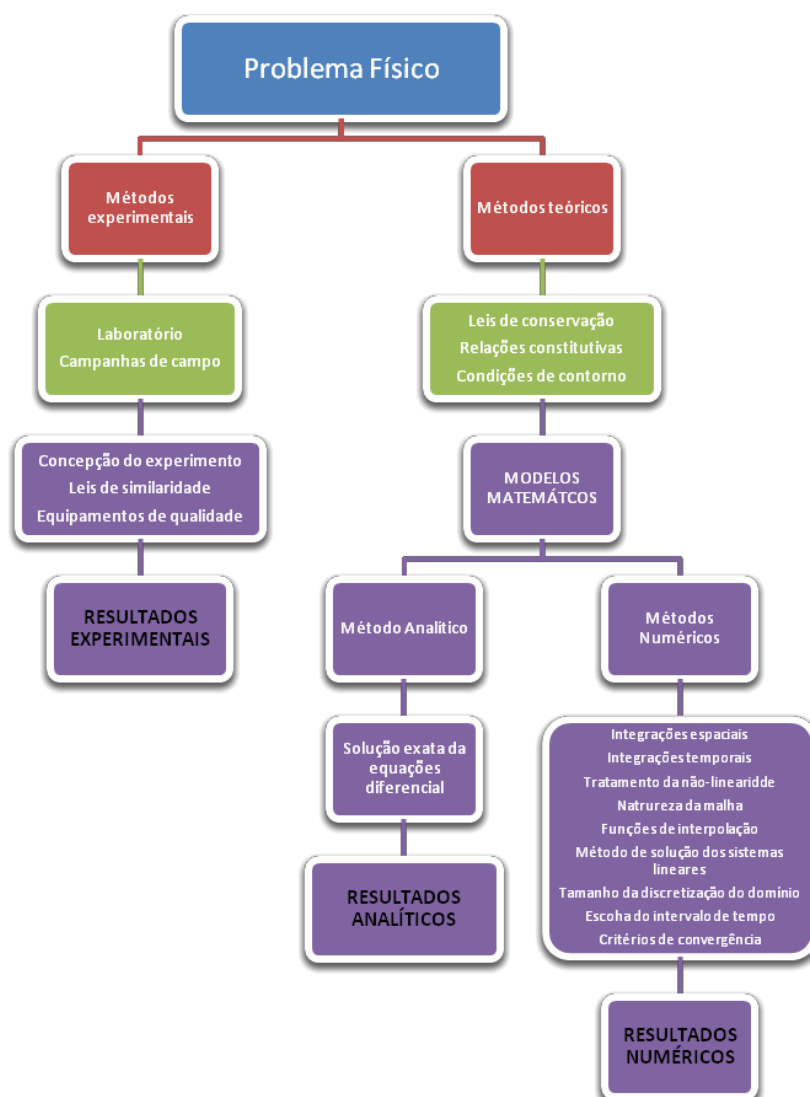


Figura 5.1 – Métodos de resolução para problemas físicos (Adaptado de Maliska, 2004).

Segundo 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* – ou simplesmente CFD, e apresenta as seguintes vantagens: redução substancial de tempo e custo em novos projetos, capacidade em estudar sistemas onde análises experimentais são complexas ou impossíveis e nível praticamente ilimitado de detalhamento de resultados.

De uma maneira geral, os pacotes comerciais de CFD apresentam sofisticadas interfaces aos usuários, facilitando a definição do problema e a análise dos resultados. Para isso, estes códigos são divididos em três etapas principais: o pré-processamento, a solução (processamento) e o pós-processamento (Versteeg e Malalasekera, 1995) e (Tannehill et al., 1997). Na Figura 5.2 é possível observar esquematicamente as três fases de uma simulação numérica.



Figura 5.2 – Etapas da simulação numérica.

A etapa inicial consiste na introdução do problema no programa de CFD e na subsequente transformação de tais informações em uma forma adequada para a solução do problema. Então, no pré-processamento: é definida a região de interesse (domínio computacional), esse domínio é dividido em uma quantidade determinada de subdomínios (a malha é gerada), é selecionado o fenômeno físico que será modelado, enquanto se defini as propriedades físico-químicas do fluido e se aplica condições de contorno e iniciais adequadas.

Na fase do processamento, existem diversos métodos aplicáveis para a solução numérica de sistemas de equações diferenciais parciais. A principal diferença entre eles consiste na forma como as variáveis do escoamento são aproximadas com o processo de

discretização empregado em cada método (Maliska, 2004; Versteeg e Malalasekera, 1995).

Finalmente, na etapa de pós-processamento os pacotes de CFD dispõem de versáteis ferramentas para a visualização dos resultados (Versteeg e Malalasekera, 1995), tanto qualitativamente, como por exemplo, topologias dos campos de velocidade e de pressão, quanto quantitativamente, como perfis de velocidade, vazão mássica, coeficientes de arrasto e sustentação, entre outros.

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

Conforme foi mencionado anteriormente, neste trabalho as simulações computacionais são realizadas através do software de CFD FLUENT, e este é baseado no MVF. Portanto, a seguir serão abordados aspectos relacionados ao MVF (usando os softwares GAMBIT e FLUENT), a discretização das equações empregadas e os principais procedimentos numéricos empregados na solução do problema (esquema de advecção, metodologia de acoplamento pressão-velocidade).

5.2. Método dos Volumes Finitos (MVF)

A tarefa do método numérico é transformar uma equação diferencial, definida num domínio, em um sistema de equações algébricas. Para isso as derivadas da função existente 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 dessa grandeza que atravessa a área de uma fronteira. A quantidade líquida desta grandeza, que atravessa um volume de controle, por unidade de tempo, é calculada pela integração, sobre essas fronteiras, da diferença entre os fluxos que entram e os que saem

deste volume, o que é conseguido de forma mais geral pela integração das EDPs (Maliska, 2004; Bortoli, 2000; Fortuna, 2000).

Como já foi dito, a tarefa de um método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. 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 (Maliska, 2004).

A Figura 5.3 ilustra a técnica de discretização empregada pelo método numérico, o qual converte uma equação diferencial em um sistema de equações algébricas.

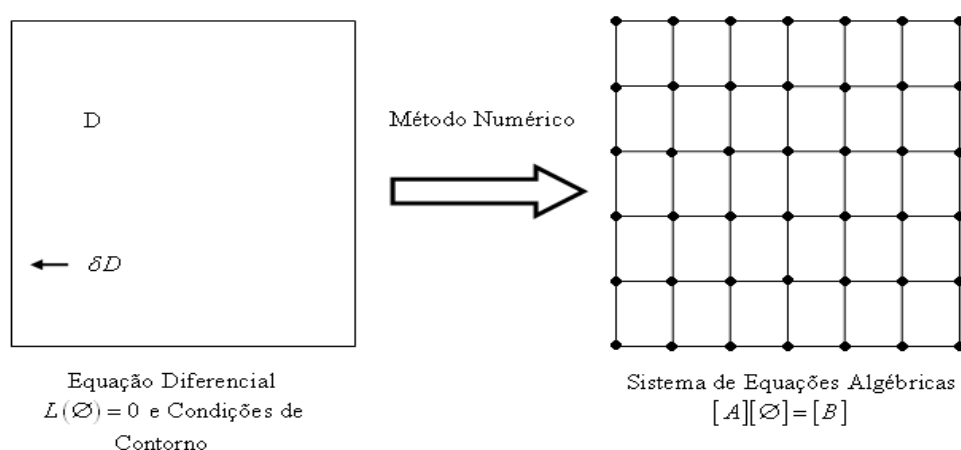


Figura 5.3 – Técnica de discretização (Maliska, 2004).

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.

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 5.4 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 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 .

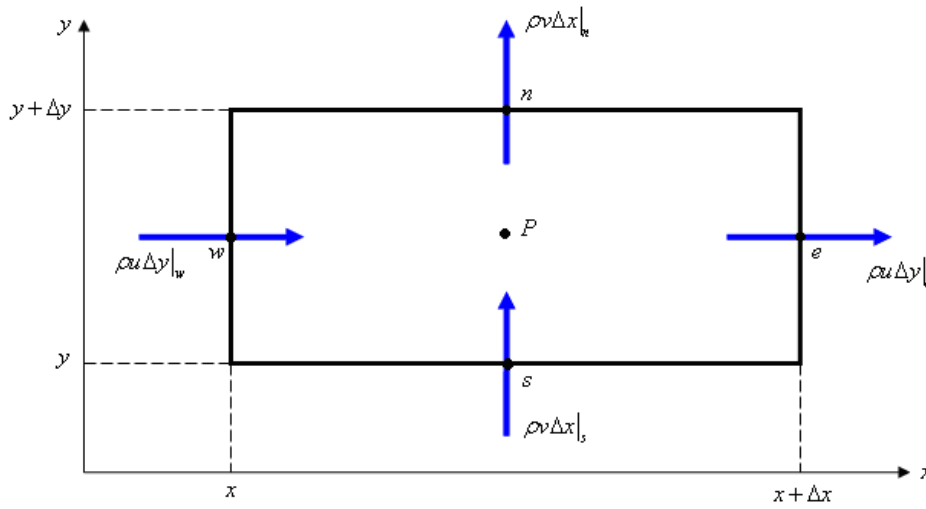


Figura 5.4 – Volume de controle típico (Maliska, 2004).

Para realizar a dedução da equação diferencial que representa a conservação da massa para um escoamento incompressível (divergência do campo de velocidades igual a zero) essa dedução é realizada a partir do balanço de massa no volume de controle, mostrado na Fig. 5.4:

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

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 que representa a vazão mássica que cruza as fronteiras do volume de controle especificado na Fig. 5.4 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 , componente da velocidade na direção y e massa específica. 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 (5.2) 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 governantes do escoamento da mistura água e ar apresentados no capítulo 4. Mais precisamente será comentado sobre as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e do transporte da fração volumétrica.

Com o intuito de simplificar a apresentação do modelo numérico, as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e transporte da fração volumétrica são definidas na forma geral apresentada por Maliska (2004):

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

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	v_i	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 $\varphi = 1$. As equações de conservação da quantidade de movimento nas três direções coordenadas são obtidas fazendo-se $\varphi = v_1, v_2$ e v_3 com o apropriado termo fonte, que, neste caso, inclui o gradiente de pressão. Para o transporte

da fração volumétrica, o valor de $\phi = \alpha_{\text{água}}$ e o termo fonte é nulo. Para a equação de conservação da quantidade de movimento $\Gamma_\phi = \mu$.

O primeiro passo para obter uma solução aproximada pelo MFV é 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 (Versteeg e Malalasekera, 1995):

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

onde $\bar{u}$ 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. 5.5.

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

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

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 5.5 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.

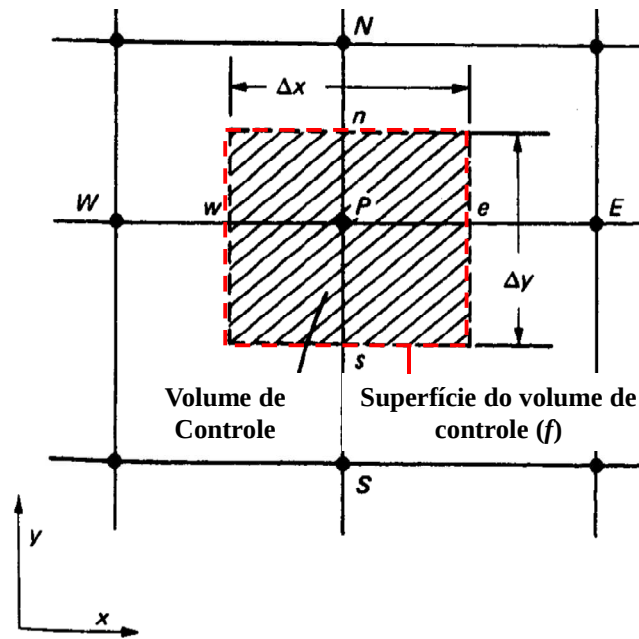


Figura 5.5 – Volume de controle empregado em MVF para um domínio bidimensional (Adaptado de Patankar, 1980).

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 (Dos Santos, 2011):

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

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 e o produto entre o coeficiente e a variável escalar no ponto P no passo de tempo anterior. 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 pode variar de acordo com a linearização do termo fonte de cada equação.

5.3. Discretização Temporal das Equações de Conservação

Depois de realizar a discretização espacial da equação é importante definir qual o tipo de formulação será utilizada para resolver o problema no tempo. Para se poder 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 (Maliska, 2004).

Os esquemas 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 (Dos Santos, 2011).

A Figura 5.6 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.

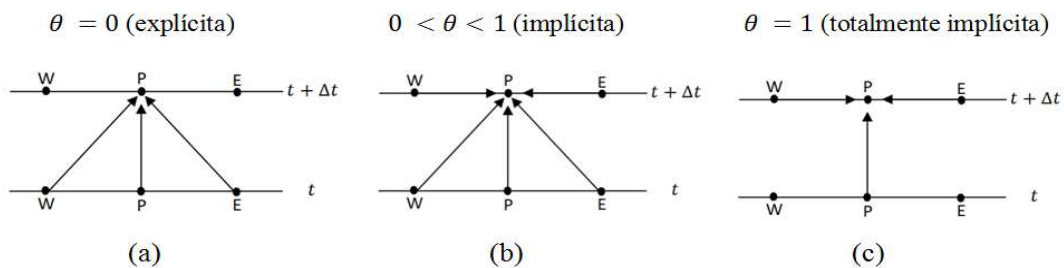


Figura 5.6 – Conexão espacial e temporal do volume P (Maliska, 2004).

Neste estudo é utilizado o esquema de avanço temporal totalmente implícito, conforme é ilustrado na Fig. 5.6 (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:

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

Analizando 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. 5.6 (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).

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 e no fim do intervalo de tempo (Maliska, 2004).

Na formulação totalmente implícita, Fig. 5.6 (c), considera-se $\theta = 1$, todas as incógnitas estarão no mesmo nível de tempo. Consequentemente, 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).

Ao observar a Fig. 5.6 (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).

Na formulação totalmente implícita, Fig. 5.6 (c), considera-se $\theta = 1$, todas as incógnitas estarão no mesmo nível de tempo. Consequentemente, 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).

Ao observar a Fig. 5.6 (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).

Este tipo de solução também produzirá um sistema de equações algébricas. Um resumo dessas formulações pode ser visto na Fig. 5.7.

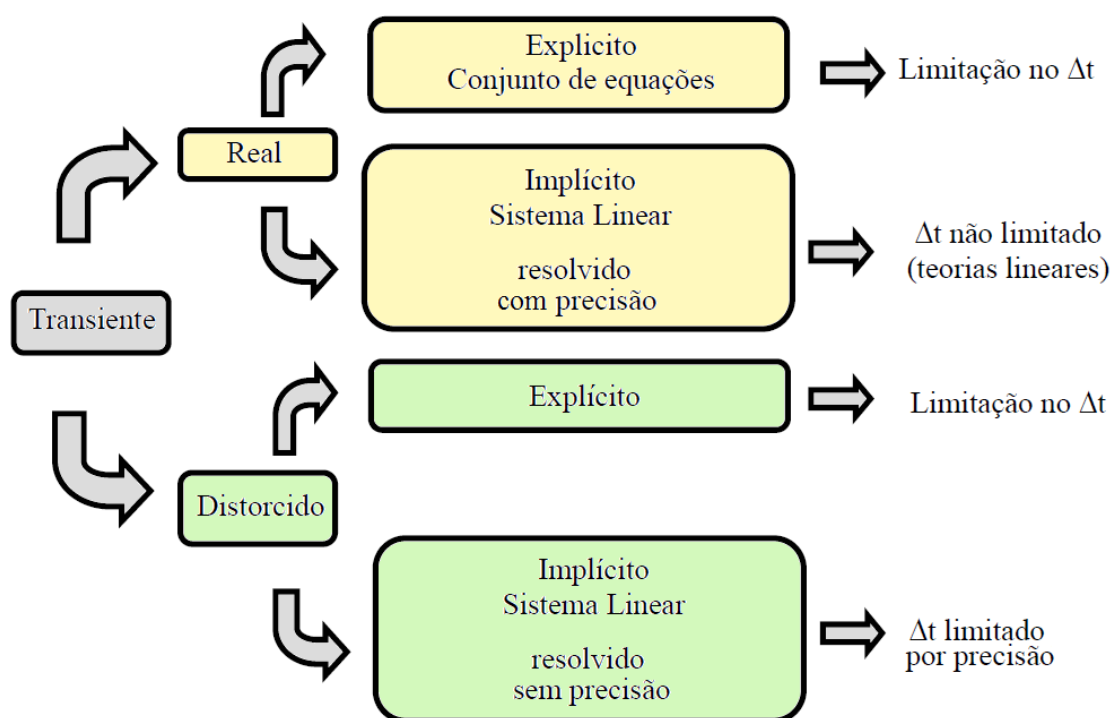


Figura 5.7 – Tipos de formulações no tempo (Adaptado de Maliska, 2004).

5.4. Tratamento dos Termos Advectivos das Equações de Conservação

Conforme Maliska (2004), os escoamentos advectivos-dominantes possuem grandes instabilidades numéricas quando se adotam discretizações por diferenças finitas centrais no tratamento dos termos advectivos. As soluções frequentemente apresentam oscilações espúrias nos campos de velocidades, pressão e temperaturas. Tais oscilações podem ser reduzidas empregando um maior refinamento de malha. Conforme explica

Maliska (2004) e Dos Santos (2011), entretanto, não é possível empregar este tipo de refinamento em problemas reais devido ao elevado esforço computacional. 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).

Neste trabalho, foi utilizado 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 (Dos Santos, 2011). Aliado a isso, como grande vantagem, se tem que a função de interpolação *upwind* é a simplicidade de sua aplicação em algoritmos de CFD (Brum, 2013).

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, conforme ilustra a Fig. 5.8, a variável ϕ_e (na face leste) será dada por:

$$\phi_e = \phi_P \text{ se } F_e = (\rho v_1)_e > 0 \quad (5.14)$$

$$\phi_e = \phi_E \text{ se } F_e = (\rho v_1)_e < 0 \quad (5.15)$$

Para face oeste, tem-se:

$$\phi_w = \phi_W \text{ se } F_e = (\rho v_1)_e > 0 \quad (5.16)$$

$$\phi_w = \phi_P \text{ se } F_e = (\rho v_1)_e < 0 \quad (5.17)$$

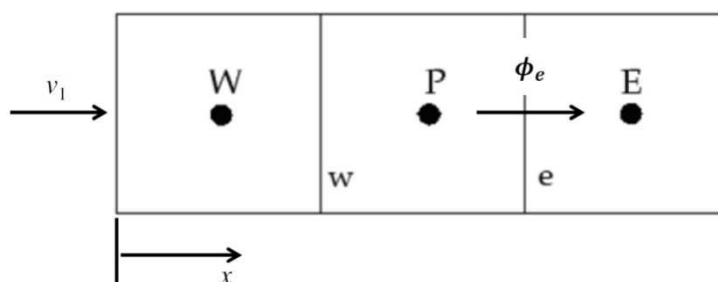


Figura 5.8 – Obtenção de ϕ_f em uma face do volume de controle
(Adaptado de Dos Santos 2011).

5.5. Resolução de Equações Aplicando o Método de Solução Segregado

O FLUENT permite escolher entre dois métodos numéricos: segregado (*segregated solver*) ou acoplado (*coupled solver*). Usando qualquer método, o FLUENT integra as equações (da conservação da massa, da quantidade de movimento) 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 com um altíssimo índice de esparsidade, 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. 5.9 (Duarte, 2006).

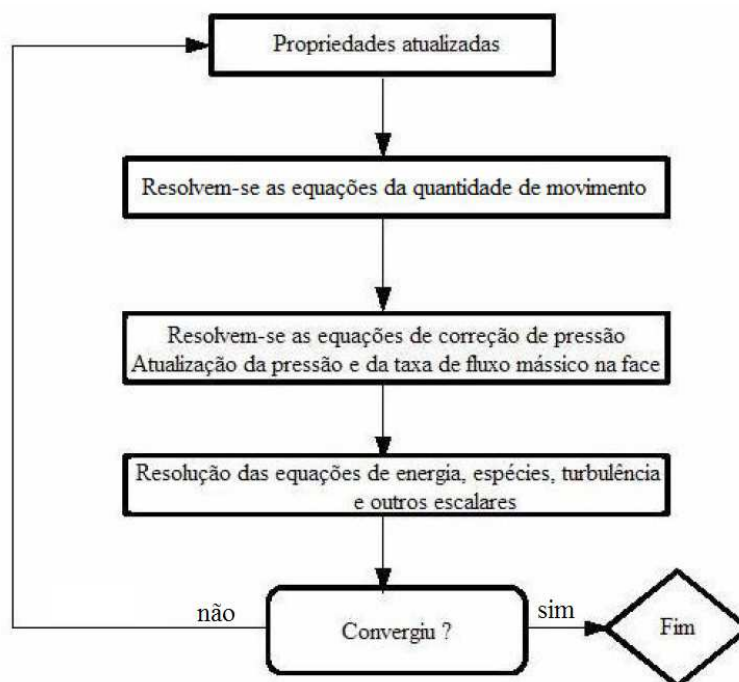


Figura 5.9 – Algoritmo de solução segregada (Adaptado de FLUENT 6.3, 2007).

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 velocidade 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*

Segundo 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. 5.10. 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*.

Nesse método considera-se 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 calculo do fluxo de advecção do fluido pelas faces do volume de controle (Gomes, 2010).

Na primeira etapa 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.

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

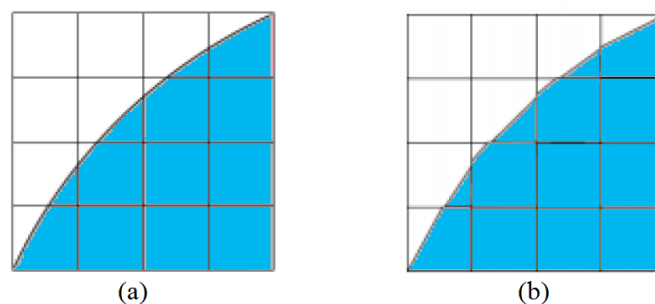


Figura 5.10 – (a) Interface Real e (b) Interface Geo-Reconstruction (Adaptado de FLUENT 6.3, 2007).

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). Para a determinação da superfície ocupada pela água é empregado o método Geo-reconstruction (Gomes, 2010; Iahnke, 2010). Além disso, fatores de sub-relaxação de 0.3 e 0.7 serão impostos para as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, respectivamente. Conforme já mencionado no capítulo anterior, esta metodologia numérica já foi validada em estudos anteriores, por exemplo, Gomes (2010), Lopes (2012), Machado (2012), Grimler (2013).

As soluções obtidas aqui 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).

Nos estudos anteriores de Barreiro (2009) e Gomes et al. (2012b) é apresentada uma recomendação para o número de elementos empregados ao longo do domínio. De acordo com os autores, na região da superfície livre devem ser adotados elementos com dimensões equivalentes a $H/20$ na direção z (perpendicular ao sentido de propagação do escoamento) e com 50 volumes por comprimento de onda (λ) na direção x (na direção principal de propagação do escoamento). A Figura 5.11 ilustra a malha empregada no presente trabalho e também as condições de contorno empregadas no domínio. O número de volumes na direção z na região da superfície livre foi $H/30$ na direção z e 70 volumes por comprimento de onda na direção x . Esse maior refinamento foi adotado 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. Vale destacar ainda que, esse tipo de malha com elementos retangulares não havia sido empregado para a simulação de dispositivos de galgamento. 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. Consequentemente, o uso dessa técnica para esse problema é uma contribuição adicional do presente trabalho.

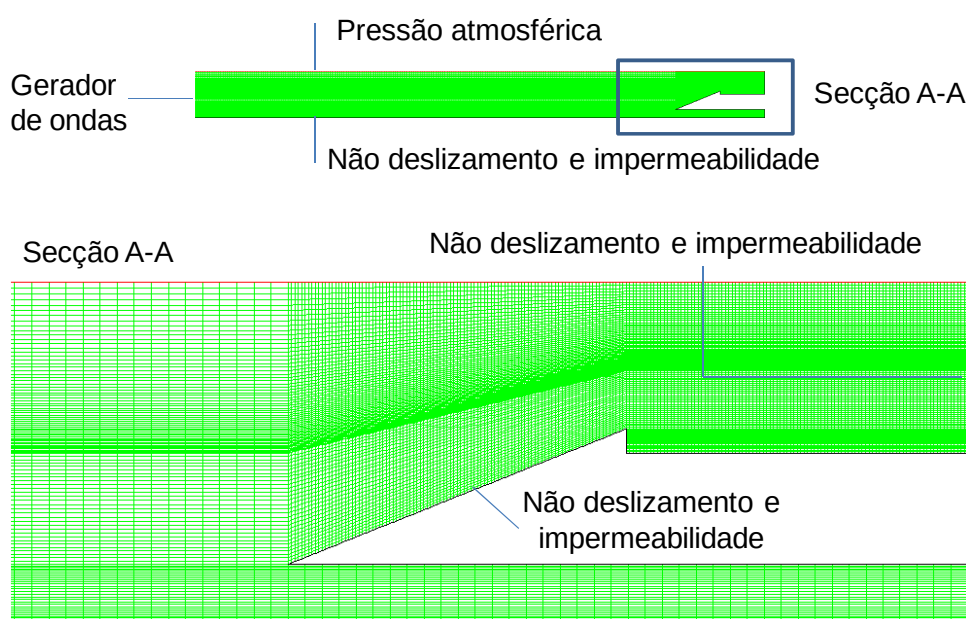


Figura 5.11 – Discretização espacial aplicada ao dispositivo de galgamento *onshore* em escala real.

Posteriormente, a determinação da discretização espacial empregada, foi realizado um estudo de independência do passo de tempo uma vez que se está abordando um problema transiente. Para este estudo foram realizadas 4 simulações variando apenas o passo de tempo e 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. Foram avaliados os seguintes passos de tempo: $\Delta t = 5.0 \times 10^{-3}$ 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 5.12 mostra o comportamento transiente da superfície livre da onda para os vários passos de tempo estudados. 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.

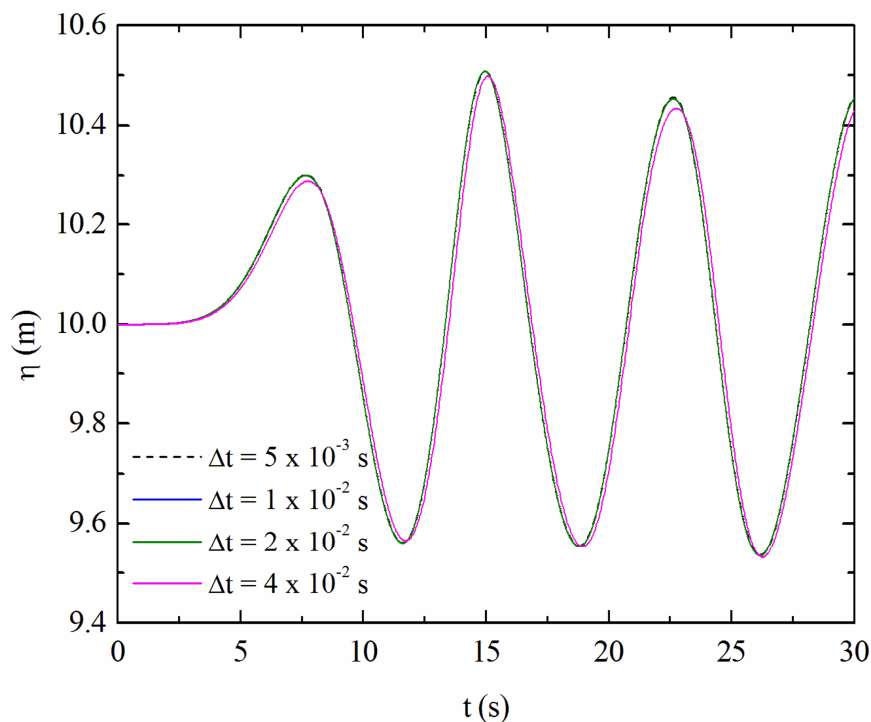


Figura 5.12 – Teste de independência do passo de tempo para as simulações realizadas.

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 (%)
5.0×10^{-3} s	10.50779 m	1.9×10^{-4} %
1.0×10^{-2} s	10.50777 m	6.6×10^{-4} %
2.0×10^{-2} s	10.50770 m	1.1×10^{-1} %
4.0×10^{-2} s	10.49640 m	-

Posteriormente, ao estudo das discretizações espacial e temporal, é necessário realizar uma verificação do modelo numérico empregado. Para isso foi realizada 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. 5.13. A Figura 5.13 mostra que a estabilização da solução numérica ocorreu 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 $15.0 \text{ s} \leq t \leq 80.0$ 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 foi aproximadamente a 0.1 % comparando-se as alturas da superfície livre e aproximadamente 8.0 % comparando-se somente a variação de altura da superfície livre, apresentando assim uma boa concordância entre os resultados. Com a definição dos procedimentos numéricos a serem empregados, bem como, a verificação do modelo numérico é possível partir para o estudo de avaliação da influência da geometria da rampa e seu afundamento sobre a quantidade de água que entra no reservatório.

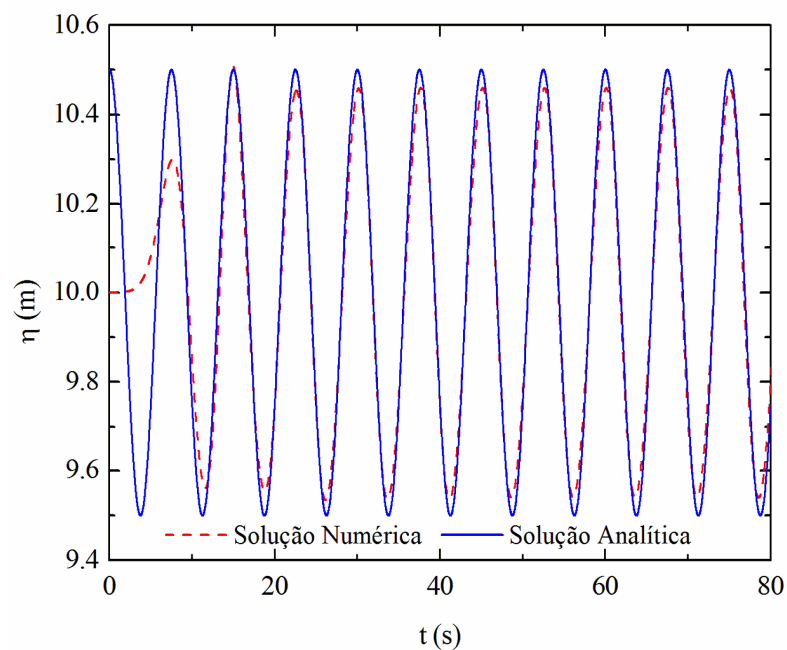


Figura 5.13 – Verificação da solução numérica com solução analítica obtida pela teoria linear de Airy.

Finalmente, cabe destacar que as simulações foram realizadas usando um computador com dois processadores de Intel dual-core com clock de 2.67 GHz e 8 GB de memória ram. Emprega-se uma Biblioteca de Passagem de Mensagem (MPI – do inglês: *Message Passing Interface*) para paralelização. O tempo de processamento de cada simulação foi de aproximadamente 1.44×10^5 s (40 h).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seção apresenta os resultados obtidos ao longo deste estudo. A otimização de um dispositivo de galgamento foi realizada empregando-se *Constructal Design*. Além disso, para a otimização do dispositivo tipo galgamento, foram analisadas as alturas $S = 3.5$ 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 para varias razões de H_1/L_1 (conforme descrito no Capítulo 4). Desta forma, cada valor fixo de S representa uma posição relativa fixa entre a superfície do fundo do reservatório e o fundo do tanque. Vale destacar que o escoamento da onda possui as mesmas características em todas as simulações, ou seja, foram mantidos constantes os parâmetros de onda e profundidade da lâmina de água ($\lambda = 65.4$ m; $T = 7.5$ s; $h = 10.0$ m e $H = 1.0$ m).

A Figura 6.1 apresenta a vazão mássica instantânea de água no dispositivo de galgamento ($\dot{m}$) em função do tempo ($0.0 \text{ s} \leq t \leq 100.0 \text{ s}$) para três diferentes razões de H_1/L_1 : $H_1/L_1 = 0.14$, $H_1/L_1 = 0.18$ e $H_1/L_1 = 0.22$ (que representam uma razão extrema mínima, uma intermediária e uma razão máxima onde ocorrem galgamento de forma representativa). Os casos que foram demonstrados referem-se a três resultados de galgamento ($0.0 \text{ s} \leq t \leq 47.0 \text{ s}$ não ocorreu galgamento) para uma altura de $S = 6.0$ m.

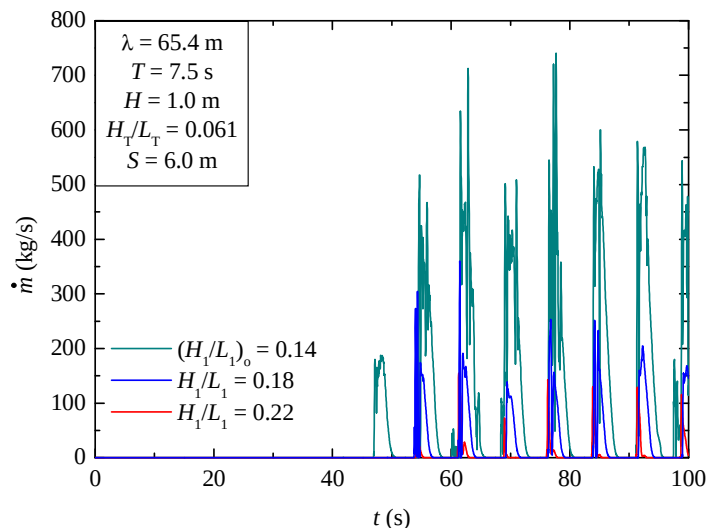


Figura 6.1 – Vazão mássica instantânea de água no dispositivo de galgamento em função do tempo ($0.0 \text{ s} \leq t \leq 100.0 \text{ s}$) para varias razões de H_1/L_1 .

Na Figura 6.1 é possível observar que para todos os casos os picos de vazão mássica começaram a ocorrer em um instante de tempo de aproximadamente $t \sim 55.0$ s,

com exceção do caso $H_1/L_1 = 0.14$ onde o galgamento inicial ocorreu em um instante de tempo anterior ($t \sim 48.0$ s), ou seja, para uma onda incidente anterior. Para $H_1/L_1 = 0.14$ a maior magnitude foi observada em $t \sim 77.0$ s e seu valor foi $\dot{m} = 720.29$ kg/s, enquanto que para os casos $H_1/L_1 = 0.18$ e 0.22 os maiores galgamentos ocorreram nos instantes de tempo de aproximadamente $t \sim 61.0$ s com magnitudes de $\dot{m} = 360.02$ kg/s e $\dot{m} = 154.70$ kg/s, respectivamente. Consequentemente, os resultados mostram que a geometria possui uma grande influência sobre a magnitude da vazão mássica instantânea, bem como influencia os instantes de tempo em que o galgamento ocorre. Outra observação importante é que 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. Vale destacar que entre todas as geometrias simuladas para $S = 6.0$ m, o caso ótimo foi obtido para $(H_1/L_1)_o = 0.14$, justificando a apresentação do sub-índice “o” para esta razão de H_1/L_1 na Fig. 6.1. Em geral, para $(H_1/L_1)_o = 0.14$, a magnitude da vazão mássica foi superior em todo o intervalo de tempo observado em comparação com os casos com maior razão de H_1/L_1 .

A Figura 6.2 destaca a vazão mássica instantânea de água no dispositivo de galgamento para uma faixa mais restrita de tempo ($50.0 \text{ s} \leq t \leq 65.0 \text{ s}$) para os casos apresentados na Fig. 6.1.

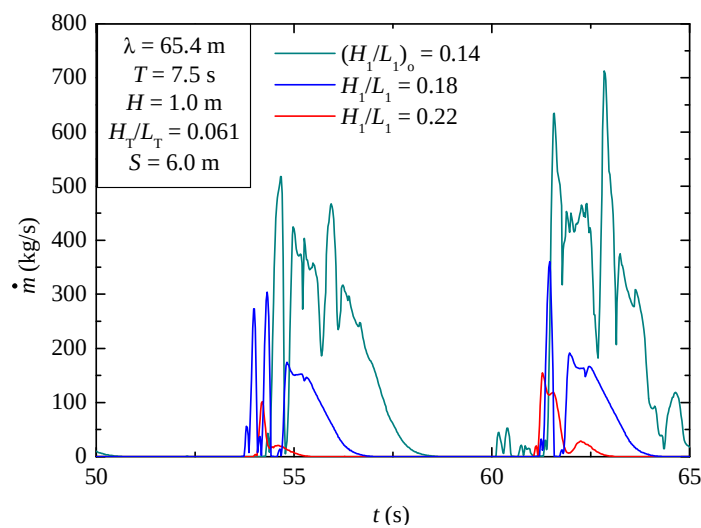


Figura 6.2 – Vazão mássica instantânea de água no dispositivo de galgamento em função do tempo ($50.0 \text{ s} \leq t \leq 65.0 \text{ s}$) para varias razões de H_1/L_1 .

O principal propósito desse novo gráfico é destacar as diferenças entre os picos de galgamento para cada razão de H_1/L_1 . É possível observar primeiramente que, conforme visto na Fig. 6.1, há uma diferença na magnitude da vazão mássica instantânea de água que entra no reservatório. Também é observado que para a geometria onde ocorreu uma pequena quantidade de galgamento ($H_1/L_1 = 0.22$) houve apenas a ocorrência de um ou dois picos de vazão mássica para cada ocorrência de galgamento em um determinado período, indicando a necessidade de acúmulo de energia da onda para que a água entre no reservatório. Nos casos onde ocorreu maior galgamento ($H_1/L_1 = 0.14$ e 0.18) pode ser notado que há a ocorrência de vários picos, que são influenciados pela reflexão da onda que incide sobre a rampa (reflexo da massa de água que não galgou a rampa e desce a mesma colidindo com a onda incidente e afetando a nova quantidade de água que entrará no reservatório). Além disso, pode ser notado um espalhamento do galgamento no tempo para os casos com menores razões de H_1/L_1 . Por exemplo, para $(H_1/L_1)_0 = 0.14$ o primeiro galgamento na Fig. 6.2 foi observado na faixa de tempo $54.3 \text{ s} \leq t \leq 58.5 \text{ s}$, enquanto que para $H_1/L_1 = 0.22$ essa faixa foi restringida para $54.0 \text{ s} \leq t \leq 55.3 \text{ s}$, ou seja, o período de tempo para a ocorrência do galgamento se mostrou inversamente proporcional à razão H_1/L_1 .

Em geral, pode ser observado que a geometria da rampa possui uma forte influência sobre o comportamento transiente do escoamento da mistura ar-água, afetando diretamente a quantidade de água acumulada no reservatório. Este mesmo estudo foi realizado para outros valores de S e o comportamento do escoamento foi bastante semelhante. Por simplificação, esses resultados de vazão mássica instantânea em função do tempo para esses outros casos não serão apresentados no texto.

As Figuras 6.3 a 6.12 mostram o comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$, ou seja, um dos casos apresentados nas Figs. 6.1 e 6.2. Mais precisamente, são apresentadas a distribuição da fração volumétrica de água e o campo de velocidades no domínio para vários instantes de tempo. Nos campos de fração volumétrica, a água é representada na cor vermelha, enquanto o ar é representado com a cor azul. As topologias são apresentadas para os seguintes instantes de tempo: $t = 48.0 \text{ s}$ a 57.0 s , com incremento de 1.0 s (Figs. 6.3 – 6.12) respectivamente.

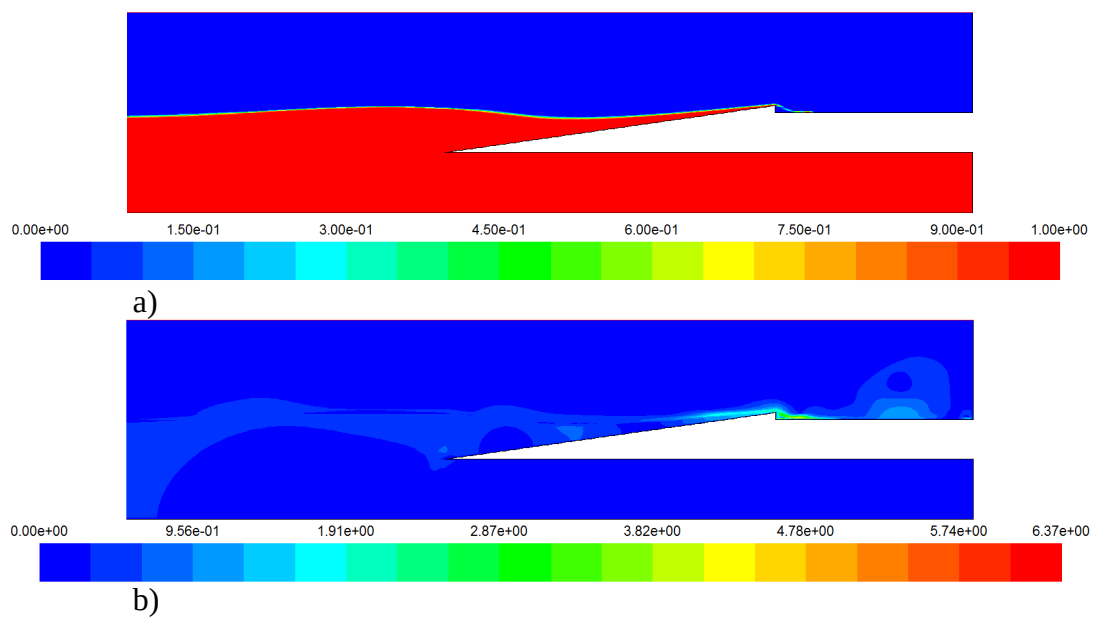


Figura 6.3 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 48.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

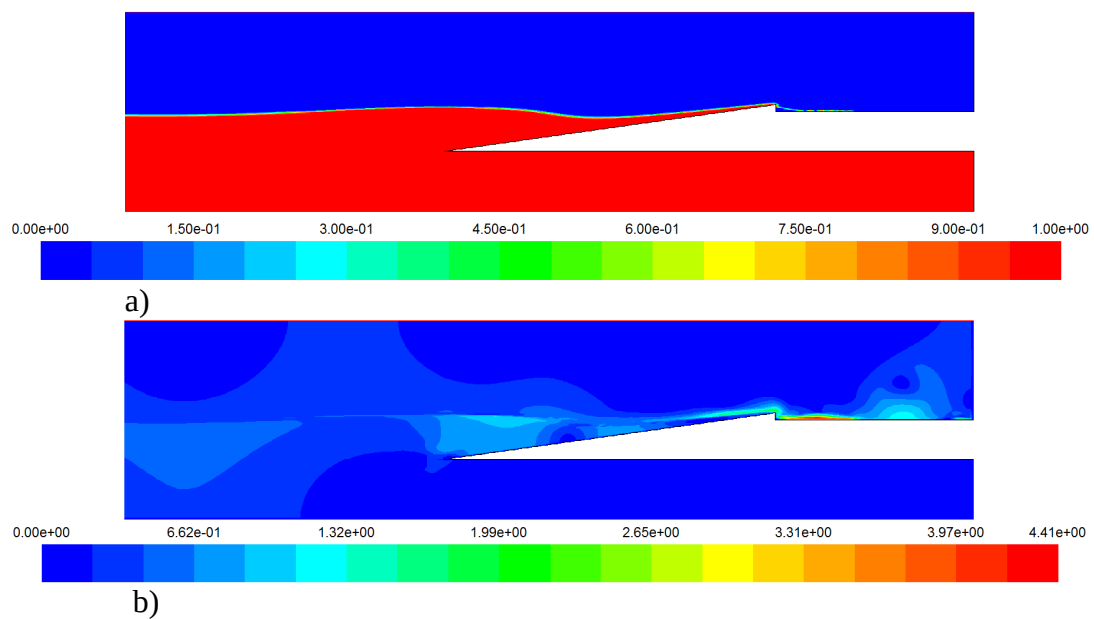


Figura 6.4 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 49.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

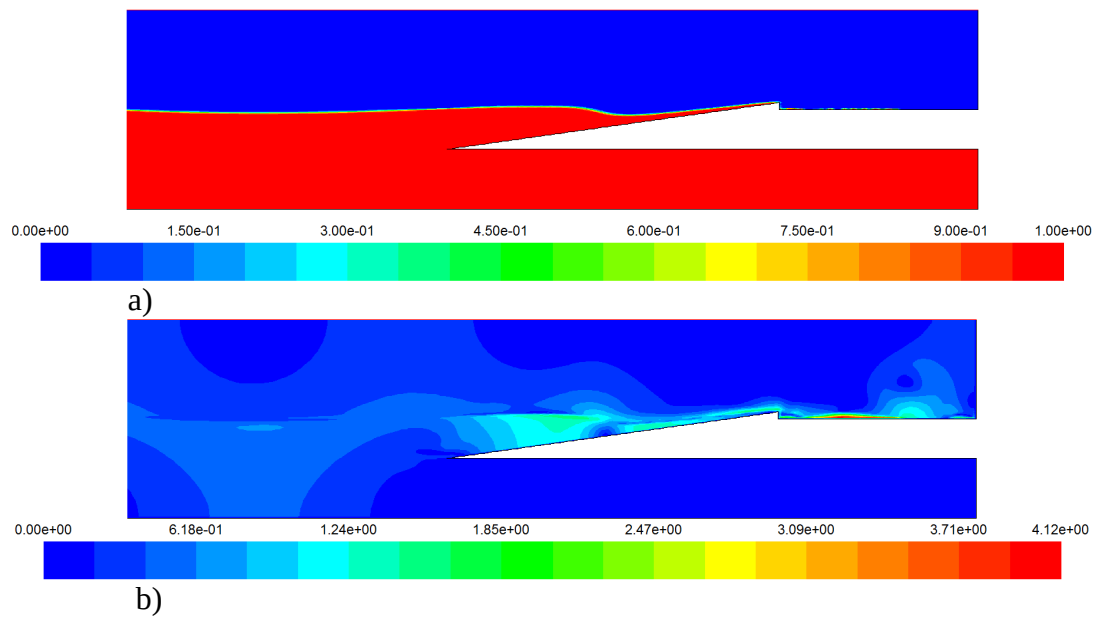


Figura 6.5 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 50.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

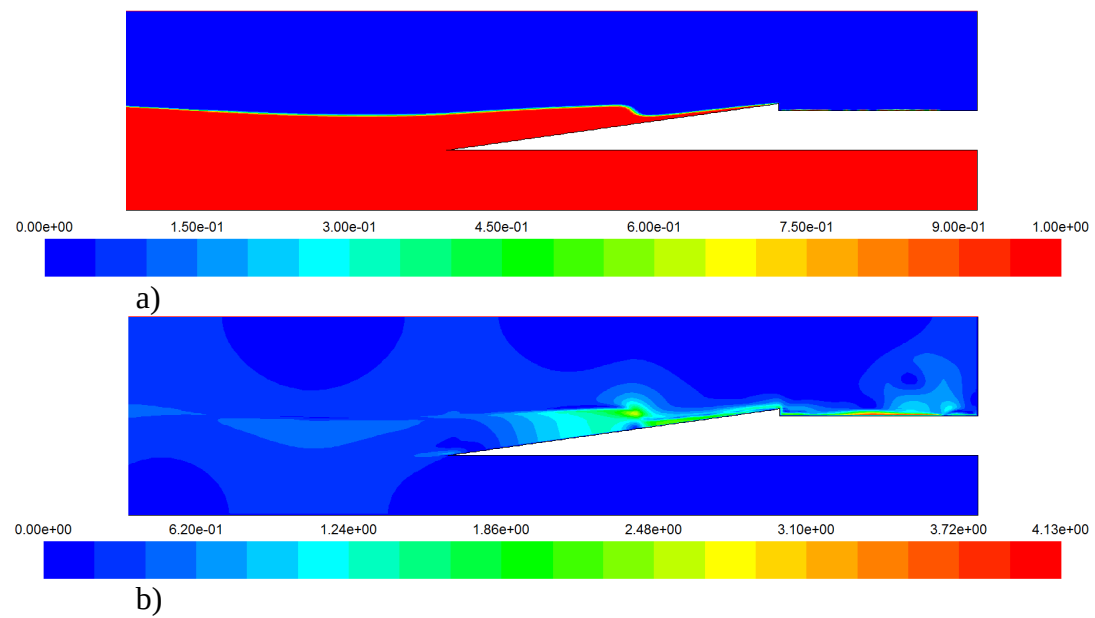


Figura 6.6 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 51.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

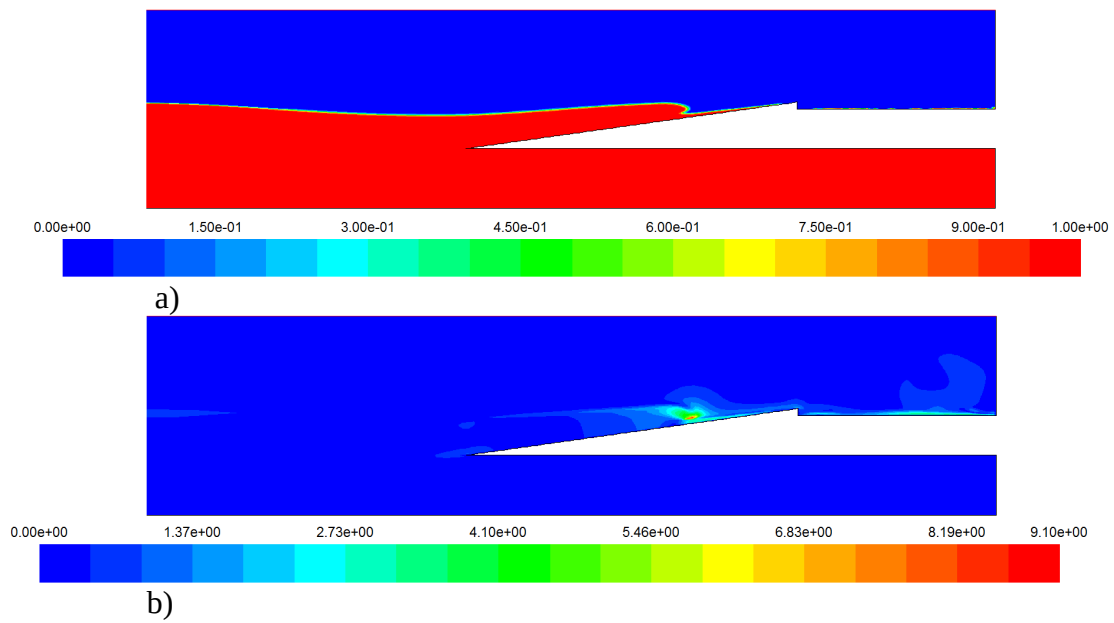


Figura 6.7 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 52.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

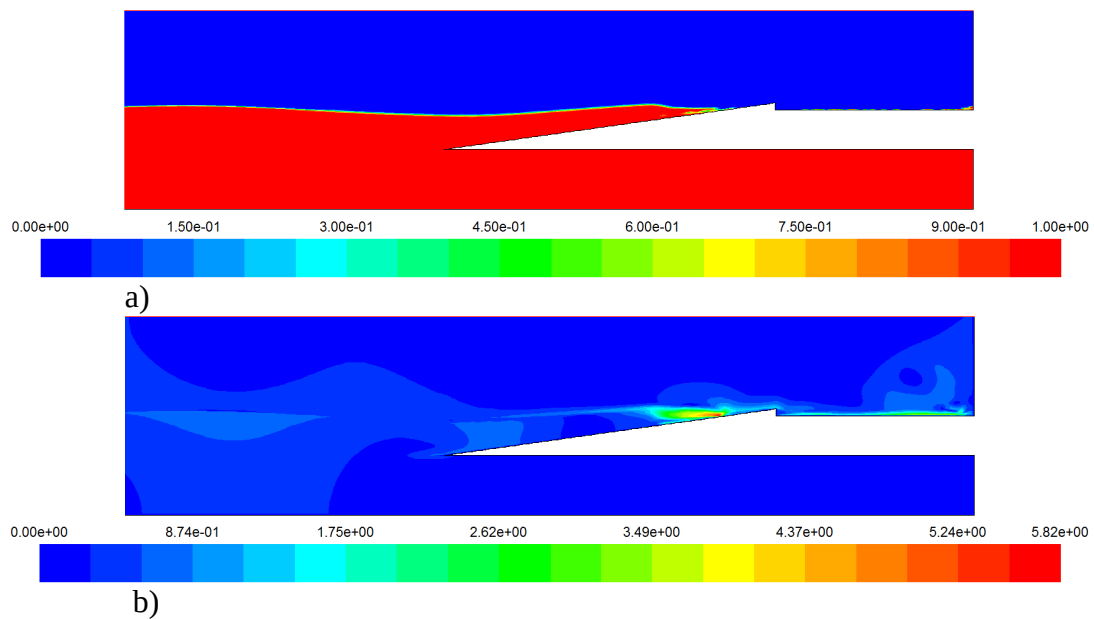


Figura 6.8 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 53.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

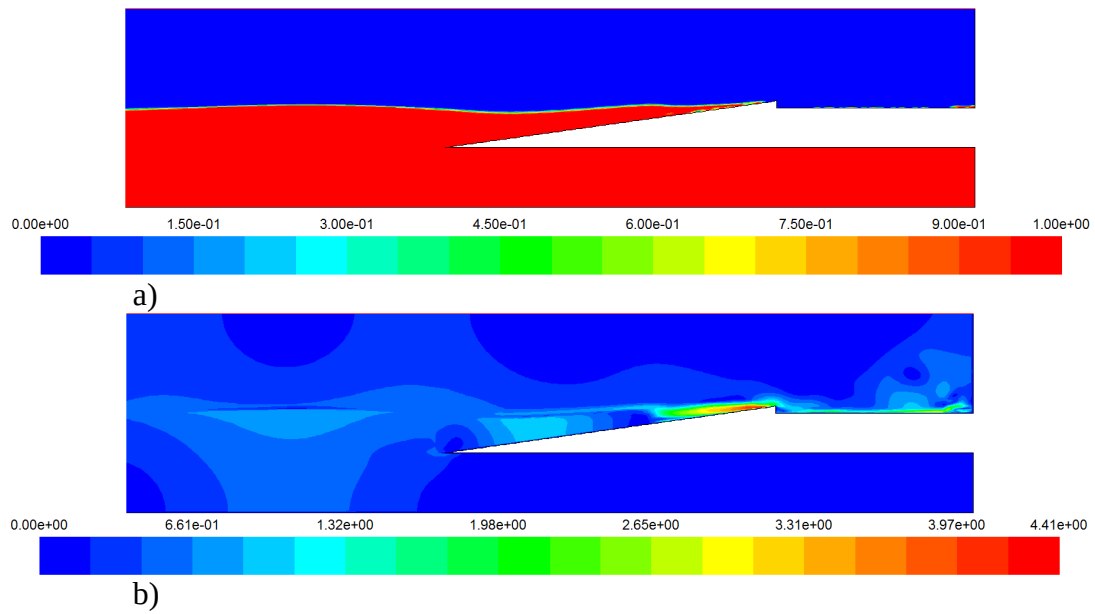


Figura 6.9 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 54.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

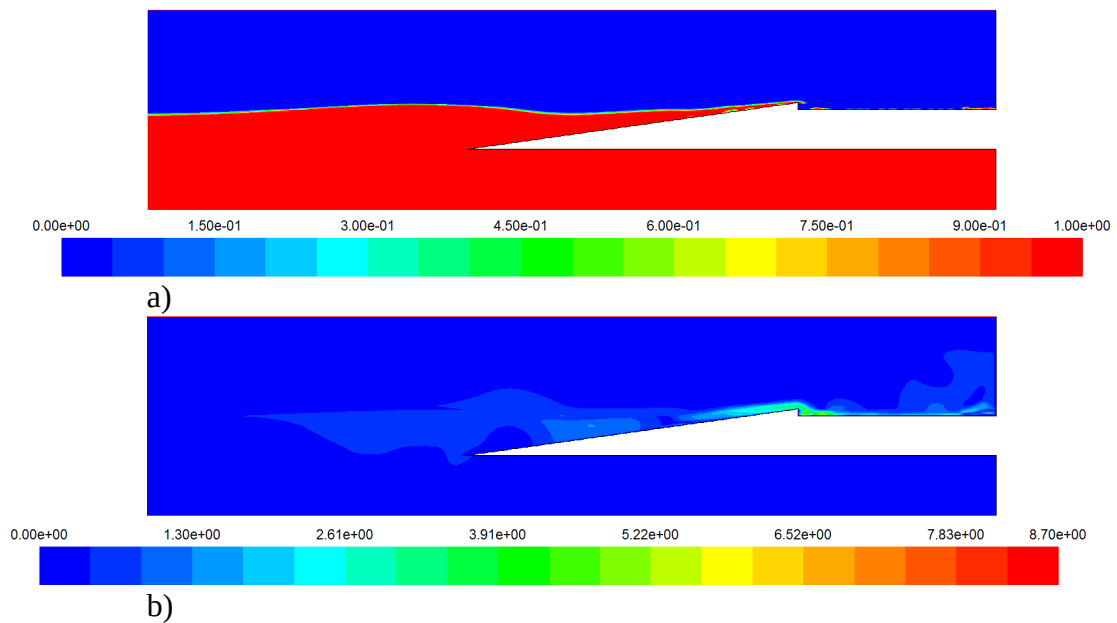


Figura 6.10 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 55.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

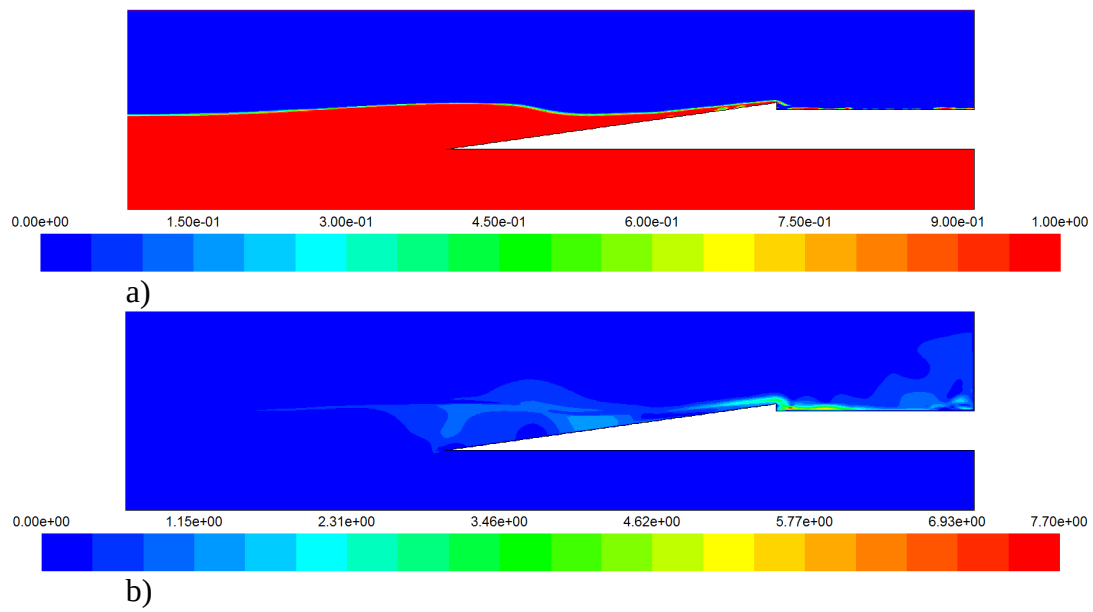


Figura 6.11 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 56.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

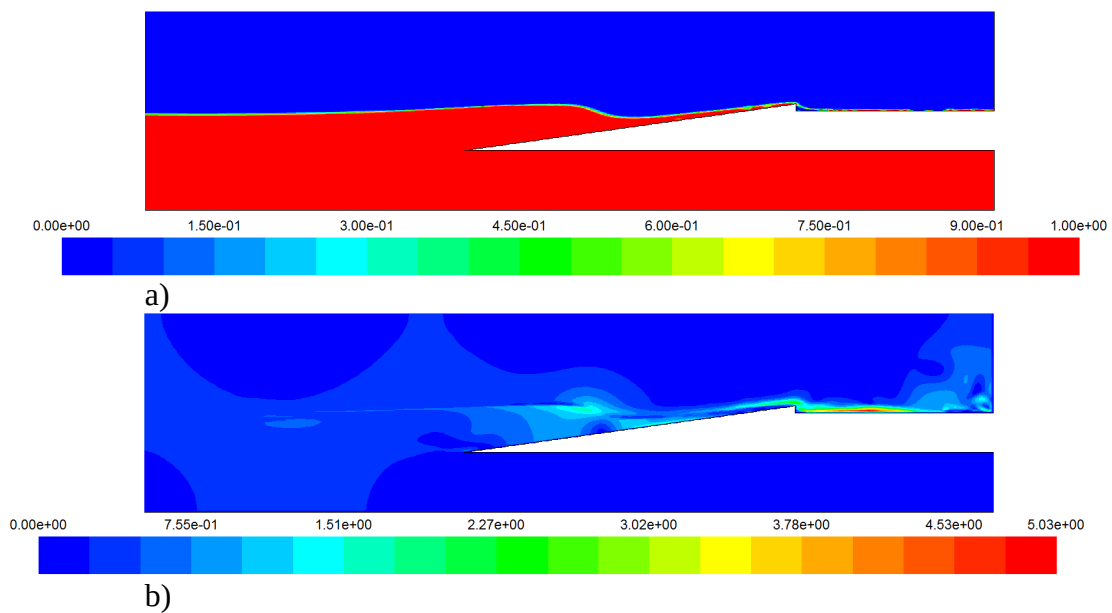


Figura 6.12 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.14$ no instante de tempo $t = 57.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

Os campos de fração volumétrica são apresentados nas Figs. 6.3(a) a 6.12(a) e os campos de velocidade nas Figs. 6.3(b) a 6.12(b). Nas Figuras 6.3 a 6.5 ($t = 48.0$ s a 50.0

s) pode ser percebida a ocorrência do primeiro ciclo de galgamento. Uma vez que ainda não há energia acumulada de outras ondas incidentes, a quantidade de massa que entra no reservatório é muito pequena. No intervalo de tempo $51.0 \text{ s} \leq t \leq 54.0 \text{ s}$ (Figs. 6.6 - 6.9) é observado uma mudança no comportamento da superfície livre da onda. Em um primeiro instante (Fig. 6.6) pode ser visto a formação de uma camada cisalhante devido à colisão entre a massa de água que não galgou e está descendo a rampa e a massa de água da crista da nova onda que incide sobre a rampa. Na Figura 6.7 é possível observar que essa colisão entre as massas de água gera uma elevada inflexão na superfície livre da onda, que conduzirá a um processo de quebra de onda. Posteriormente, nas Figs. 6.8 e 6.9, a onda se reestabiliza e torna a se deslocar em direção à borda superior da rampa. Para os instantes de tempo posteriores, Figs. 6.10 a 6.12, já é observado um segundo ciclo de galgamento que possui uma maior magnitude de massa de água. Mesmo qualitativamente, é possível observar que o segundo ciclo de galgamento, em função do acúmulo de energia oriundo das novas ondas incidentes, é superior ao primeiro ciclo de galgamento. Vale destacar que, esse comportamento também foi observado anteriormente no trabalhos prévios de Machado (2012), Dos Santos et al. (2013) e Dos Santos et al. (2014).

Com relação aos campos de velocidade, pode-se observar, de uma forma geral, que as maiores magnitudes dos mesmos ocorrem no ar devido a sua menor massa específica. Nas Figuras 6.3(b) e 6.4(b) é possível observar uma elevação da magnitude do campo de velocidades apenas na região da borda da rampa que está relacionada à massa de ar deslocada pelo jato de água que entra no reservatório. Na região da água, os campos de velocidades são bastante reduzidos com relação às magnitudes na região do ar. As maiores magnitudes são apenas observadas nas Figs. 6.5(b) - 6.6(b) e Figs. 6.8(b) - 6.9(b) quando ocorre colisão entre as massas de água que desce da rampa e da onda incidente, na quebra de onda e na região próxima a borda da rampa quando há uma restrição da lâmina de água que atinge essa região, vide as Figs. 6.8(b) e 6.9(b).

As Figuras 6.13 a 6.22 mostram o comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$. Foram utilizados os mesmos parâmetros do bloco de figuras mostrados anteriormente. São apresentadas a distribuição da fração volumétrica de água e o campo de velocidades no domínio para vários instantes de tempo. Os campos de fração volumétrica são apresentados nas Figs. 6.13(a) a 6.22(a) e os campos de velocidade nas Figs. 6.13(b) a 6.22(b).

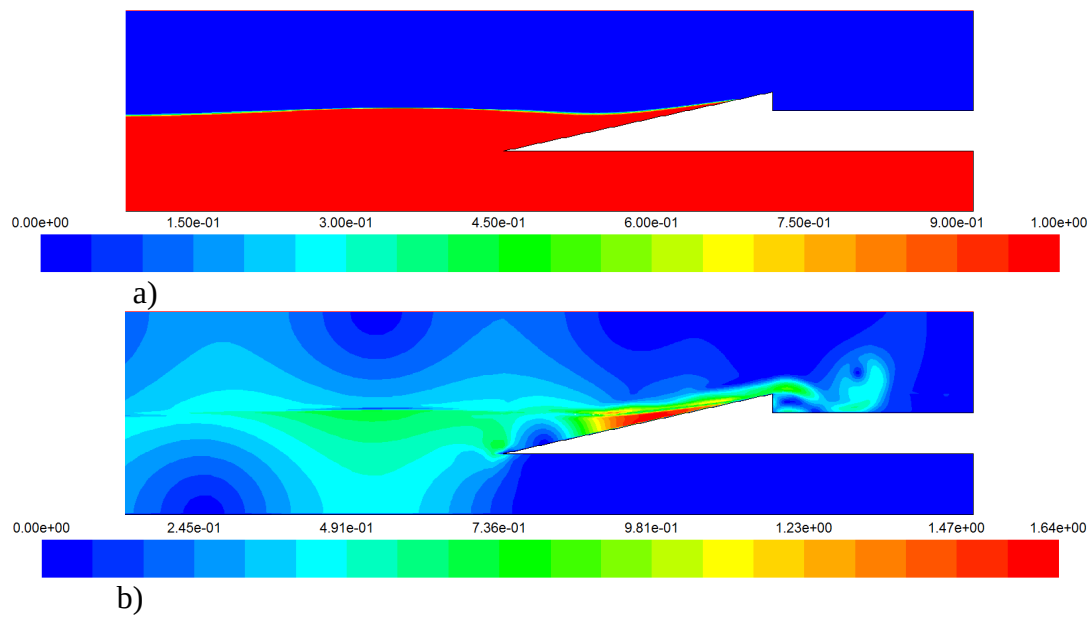


Figura 6.13 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 48.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

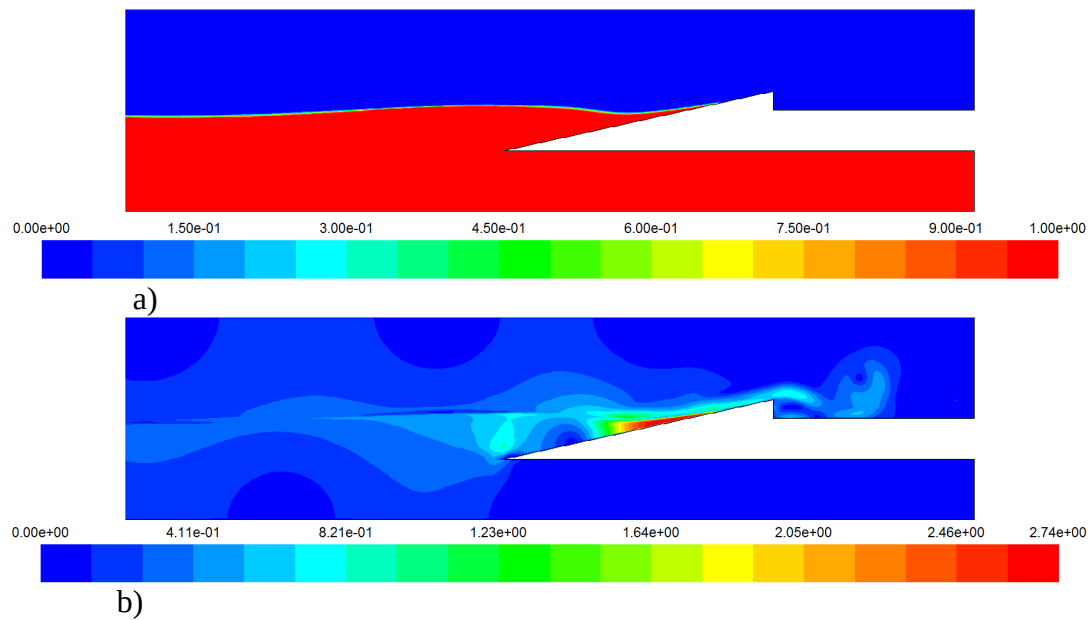


Figura 6.14 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 49.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

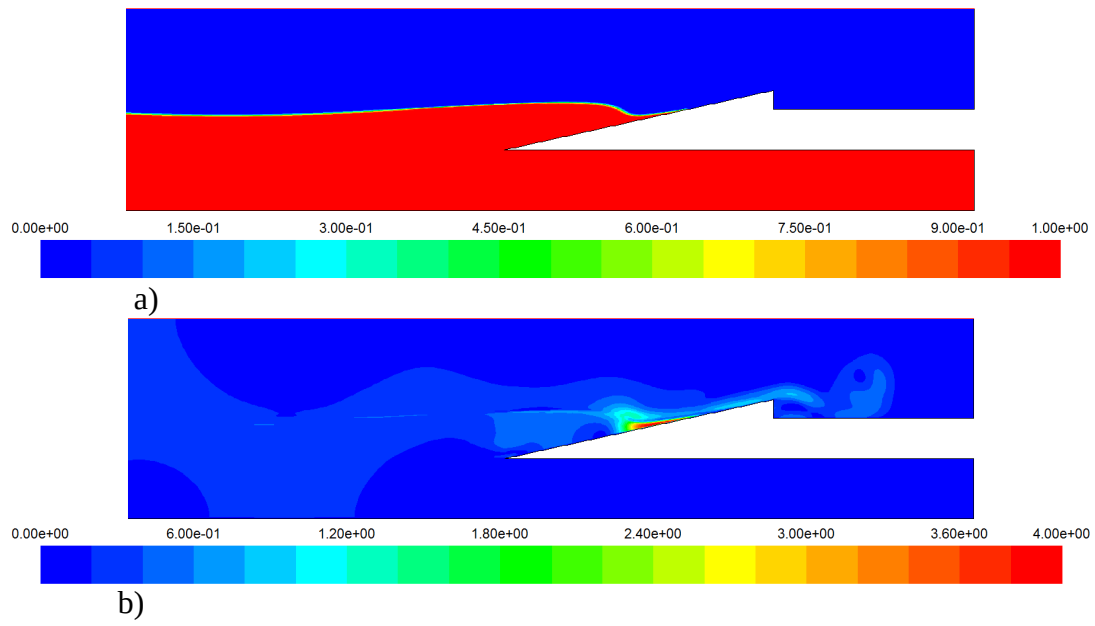


Figura 6.15 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 50.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

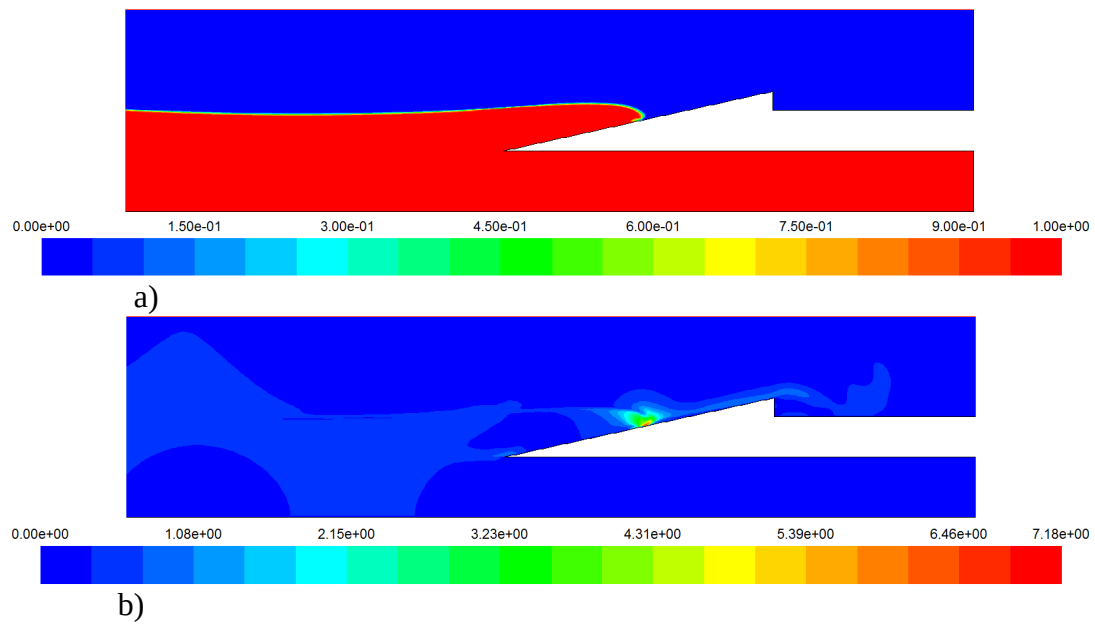


Figura 6.16 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 51.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

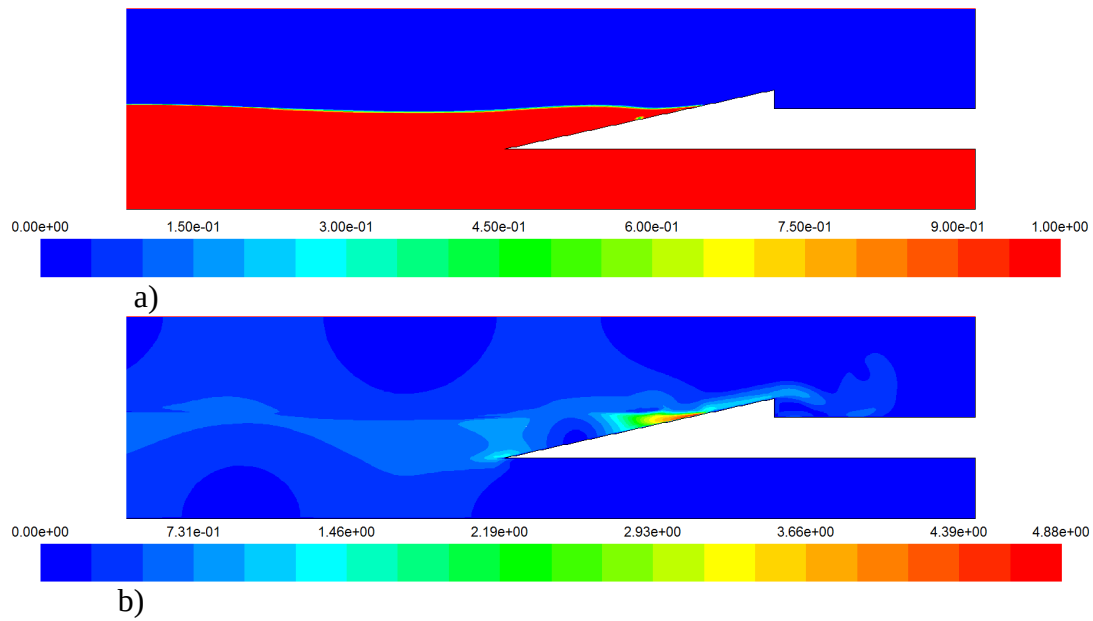


Figura 6.17 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 52.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

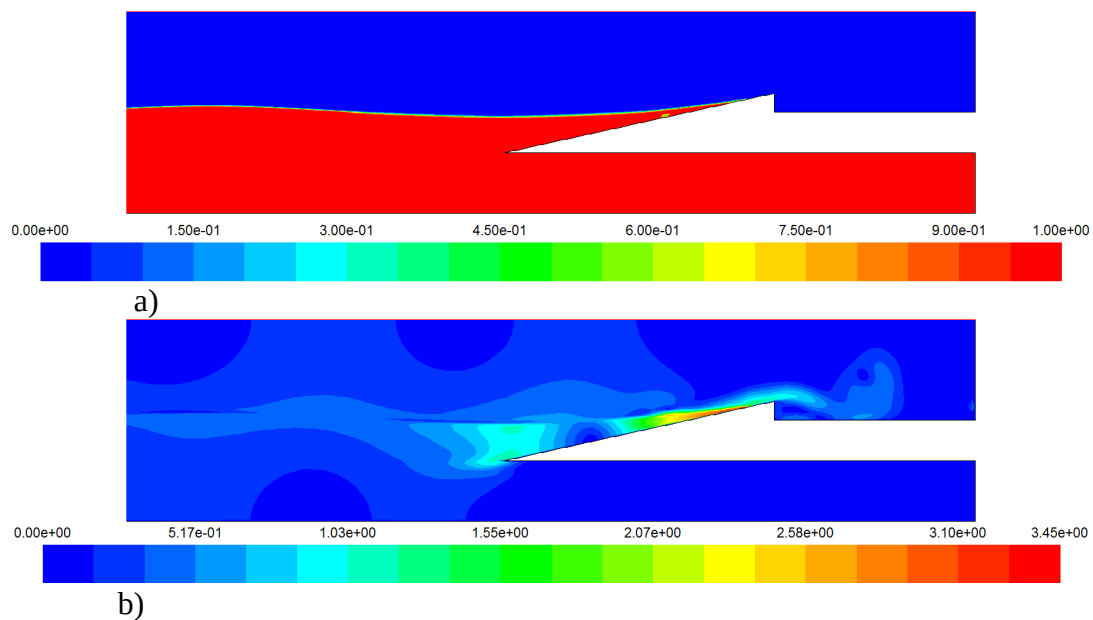


Figura 6.18 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 53.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

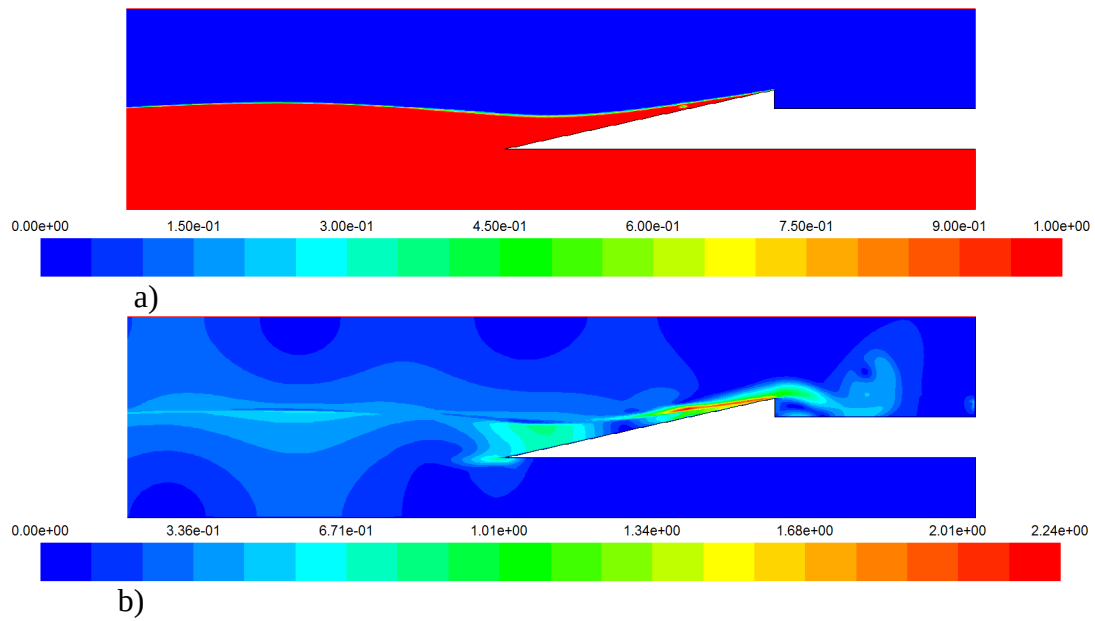


Figura 6.19 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 54.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

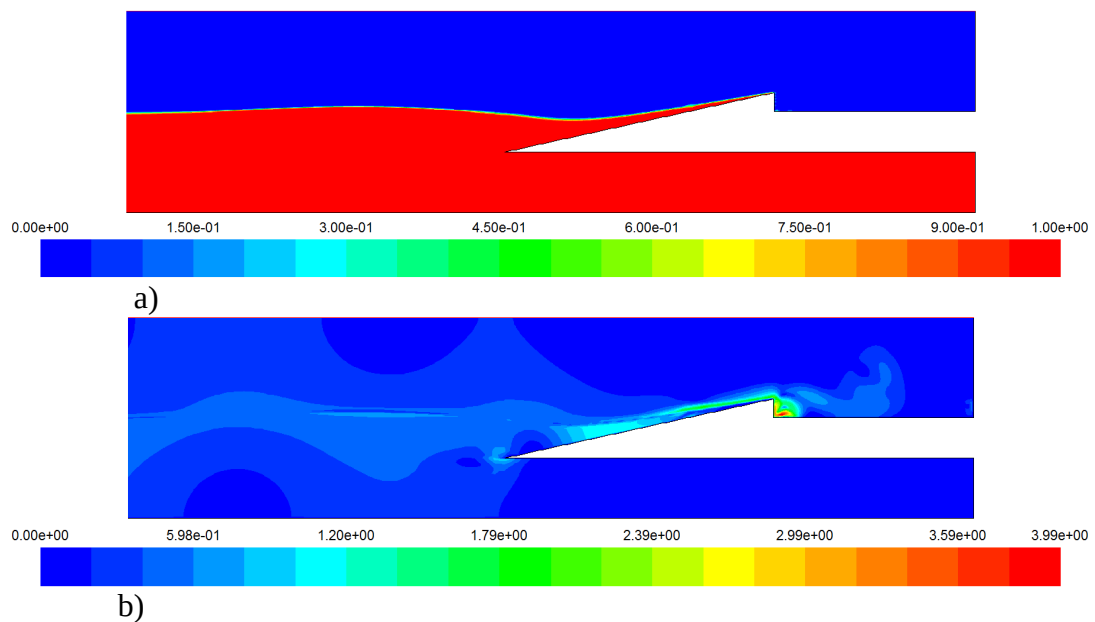


Figura 6.20 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 55.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

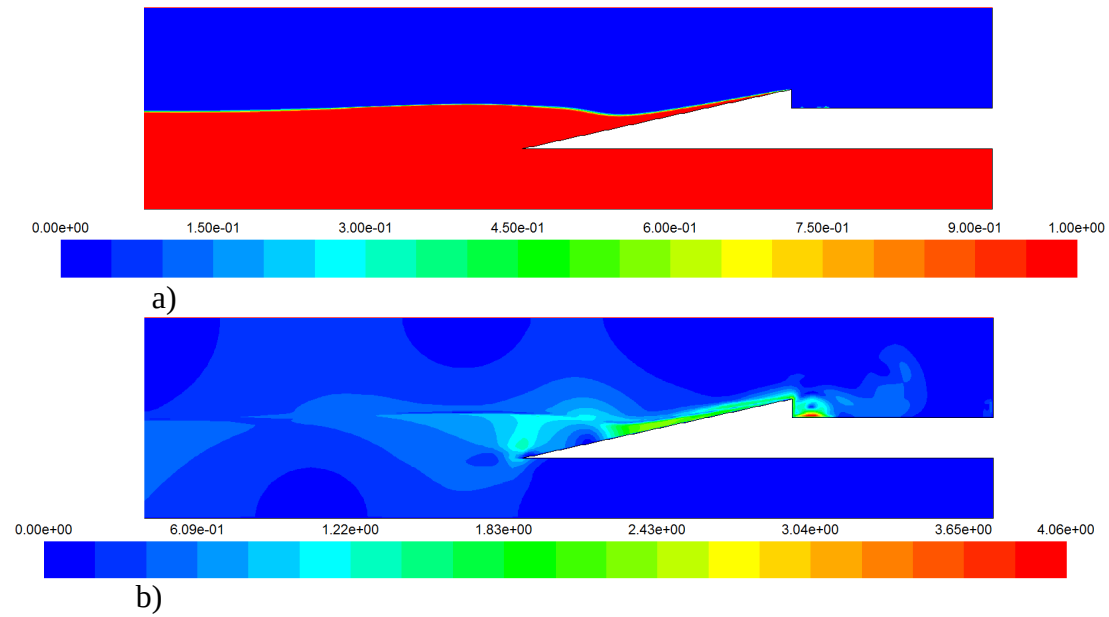


Figura 6.21 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 56.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

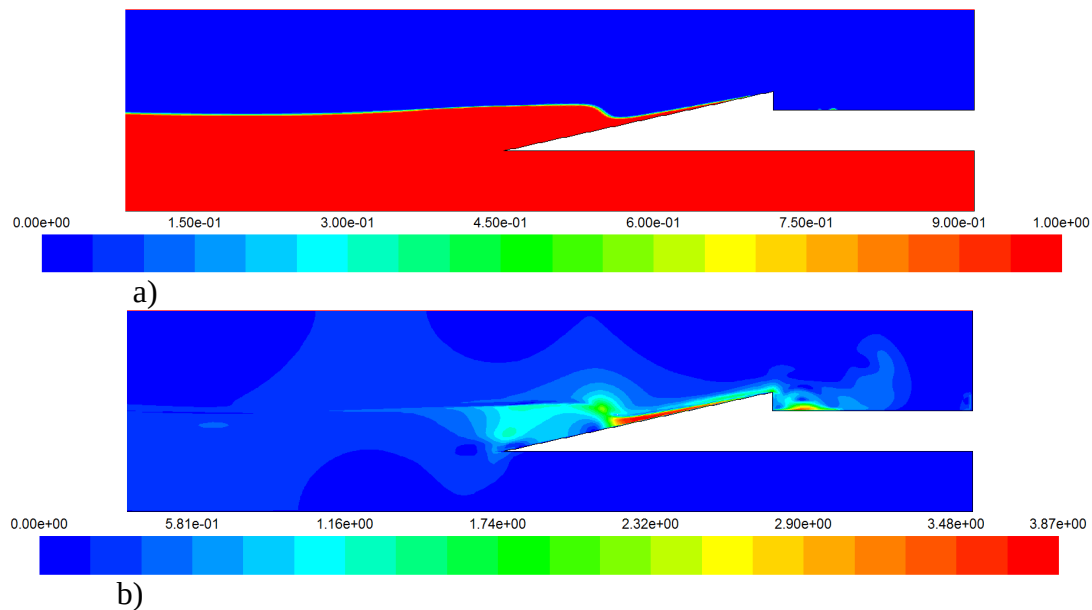


Figura 6.22 – Comportamento transiente do escoamento da onda para $H_1/L_1 = 0.22$ no instante de tempo $t = 57.0$ s: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

Diferentemente do caso anterior, o galgamento não ocorreu para os instantes de tempo analisados, com exceção do instante de tempo $t = 55.0$ s (Fig. 6.20) onde apenas

um filete de água entra no reservatório. Mesmo com a incidência de diversas ondas a energia acumulada não foi suficiente para provocar um galgamento significativo pois a quantidade de massa de água que entra no reservatório é muito pequena. Dessa forma, a mudança na geometria da rampa, ou seja, o aumento da razão H_1/L_1 leva o dispositivo a se comportar como um quebra-mar, fato este também observado anteriormente nos trabalhos da literatura.

O mesmo comportamento do escoamento na região da rampa observado para relação $H_1/L_1 = 0.14$ a respeito da formação de uma camada de cisalhamento e quebra de onda também foi notado para a razão $H_1/L_1 = 0.22$. Porém, esse fenômeno ocorreu de forma mais definida em dois instantes de tempo intercalados por um galgamento. Em um primeiro instante no intervalo de tempo $50.0 \text{ s} \leq t \leq 52.0 \text{ s}$ (Figs. 6.15 - 6.17) e posteriormente em um segundo momento intervalo de tempo $56.0 \text{ s} \leq t \leq 57.0 \text{ s}$ (Figs. 6.21 e 6.22), ficando bastante evidente a formação de uma camada cisalhante (Fig. 6.15 e 6.22). Na Figura 6.16 é possível observar uma elevada inflexão na superfície livre da onda, que conduzirá a um processo de quebra de onda. A diferença deste caso ($H_1/L_1 = 0.22$) para o caso anterior ($H_1/L_1 = 0.14$) é que neste caso não ocorre galgamento a cada incidência da onda, como observado para $H_1/L_1 = 0.14$.

Posteriormente, nas Figs. 6.18 e 6.19, a onda se reestabiliza e torna a se deslocar em direção à borda superior da rampa, encaminhado-se para o galgamento (Fig. 6.20). As imagens também ilustram que o intervalo de tempo em que ocorre o galgamento é mais restrito para o caso $H_1/L_1 = 0.22$, conforme havia sido mostrado nas Figs. 6.1 e 6.2.

Com relação aos campos de velocidade, Figs. 6.13(b) a 6.22(b), efeitos semelhantes aos observados para o caso $H_1/L_1 = 0.14$ são obtidos para as simulações com a geometria $H_1/L_1 = 0.22$. Contudo, de uma forma geral, a magnitude dos campos de velocidade sofreram uma suavização devido a maior restrição que a rampa impõe ao escoamento da onda. Os resultados também mostraram que devido a maior restrição da rampa a formação das camadas de cisalhamento e quebra de onda parecem mais intensas no caso $H_1/L_1 = 0.22$.

O processo de otimização, conforme já foi citado, consiste na simulação de diversas geometrias com diferentes razões de H_1/L_1 . A Figura 6.23 apresenta o efeito da razão H_1/L_1 sobre a quantidade total de massa que entra no reservatório ao longo do intervalo de tempo analisado ($0.0 \text{ s} \leq t \leq 100.0 \text{ s}$).

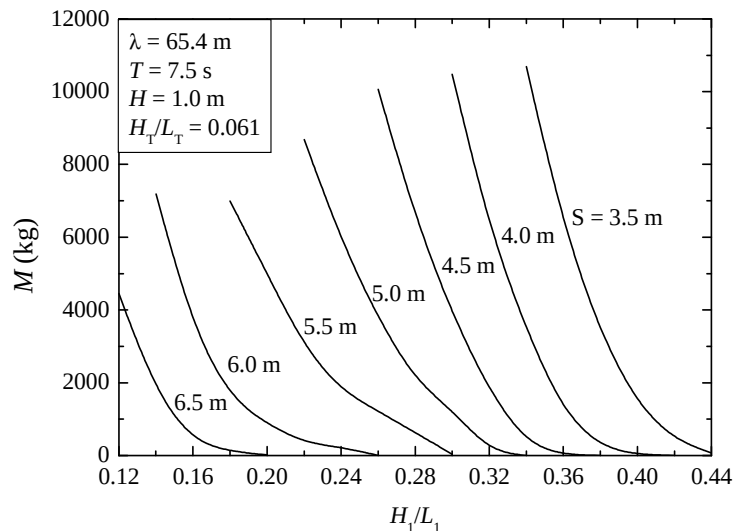


Figura 6.23 – Efeito da razão H_1/L_1 sobre a quantidade de massa de água acumulada no reservatório ($0.0 \text{ s} \leq t \leq 100.0 \text{ s}$).

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. Por exemplo, para $S = 3.5 \text{ m}$ o galgamento ocorre na faixa $0.34 \leq H_1/L_1 \leq 0.44$ enquanto que para $S = 6.5 \text{ m}$ a ocorrência se deu na faixa $0.12 \leq H_1/L_1 \leq 0.18$.

A máxima quantidade de massa de água que entra no reservatório ao longo do tempo foi obtida para $S = 3.5 \text{ m}$ e para razão ótima de $(H_1/L_1)_o = 0.34$. A quantidade de massa de água máxima para este caso foi de $m_m = 10688.66 \text{ kg}$. Notar que para cada curva S apresentada, as maiores magnitudes foram obtidas no extremo inferior das razões H_1/L_1 avaliadas, sendo essas razões denominadas de uma vez otimizada. A Figura 6.23 também ilustra que o aumento da razão H_1/L_1 conduz a uma diminuição na quantidade de massa de água que entra no reservatório, até um limite inferior onde não ocorrerá o galgamento. Nesta mesma ótica notou-se que as melhores geometrias para cada altura S conduziram a desempenhos muito superiores aos obtidos para as piores geometrias. A maior vantagem foi observada para $S = 3.5 \text{ m}$, onde a massa uma vez maximizada, obtida para $(H_1/L_1)_o = 0.34$, foi 146 vezes superior à encontrada para a geometria onde a menor quantidade de massa que entrou no reservatório ocorreu ($H_1/L_1 = 0.44$). A menor vantagem foi notada para a razão superior de $S = 6.5 \text{ m}$ onde a geometria ótima, $(H_1/L_1)_o = 0.12$, foi 38 vezes superior a pior geometria obtida para $H_1/L_1 = 0.18$. Comparando o desempenho entre a melhor e pior geometrias globais, dadas, respectivamente, por $(S = 3.5 \text{ m e } (H_1/L_1)_o = 0.34)$ e $(S = 6.5 \text{ m e } H_1/L_1 = 0.18)$ obtém-se um desempenho aproximadamente 92 vezes superior. Os resultados de uma

forma geral demonstram a importância da avaliação geométrica, bem como, a aplicabilidade do *Constructal Design* para este tipo de problema.

Vale destacar aqui que o efeito de H_1/L_1 sobre a massa de água que entrou no reservatório para o estudo realizado foi diferente do que foi observado em estudos preliminares de Machado (2012), Dos Santos et al. (2013) e Dos Santos et al. (2014) para escoamentos de ondas em escala de laboratório sobre dispositivos *offshore*. Nestes estudos foi observado que os limites inferior e superior conduziam aos piores desempenhos, ou seja, menor quantidade de massa de água acumulada no reservatório, conforme pode ser observado na Fig. 6.24.

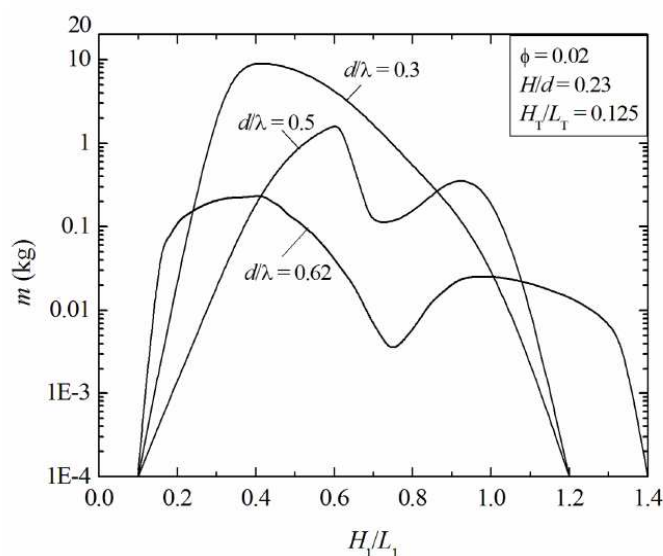


Figura 6.24 – Efeito de H_1/L_1 sobre a quantidade de massa de água que entra no reservatório para várias profundidades relativas: $d/\lambda = 0.3, 0.5$ e 0.62 (Dos Santos et al., 2014).

No presente trabalho o melhor desempenho sempre foi obtida para as menores relações de H_1/L_1 . Além disso, no presente estudo não foi observado a presença de pontos de máximo local para relações intermediárias de H_1/L_1 , como observado em alguns casos de Machado (2012) e Dos Santos et al. (2014). Contudo, os resultados obtidos aqui foram concordantes com os apresentados nos estudos experimentais em escala de laboratório para um dispositivo *onshore* de Kofoed (2002), que também obtiveram melhores resultados para as menores relações entre a altura da rampa do dispositivo pelo seu comprimento. Futuros estudos são recomendados para avaliar se as diferenças estão relacionadas à simulação de escoamentos em diferentes escalas ou mesmo à posição do dispositivo no tanque (*onshore* ou *offshore*).

A Figura 6.25 permite observarmos o efeito da submergência S sobre a quantidade de massa acumulada (m_m) uma vez maximizada, obtidas dos valores máximos apresentados na Fig. 6.23.

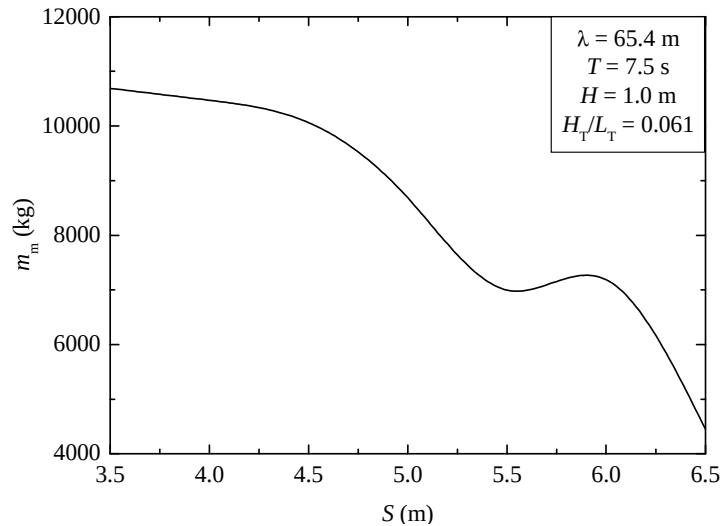


Figura 6.25 – Efeito da profundidade (S) sobre a quantidade de massa acumulada (m_m) uma vez maximizada.

Para as alturas $S = 3.5$ 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 as quantidades de massa de água uma vez maximizada para estes casos foram respectivamente: $m_m = 10688.66$ kg, $m_m = 10471.11$ kg, $m_m = 10063.15$ kg, $m_m = 8686.73$ kg, $m_m = 6995.72$ kg, $m_m = 7186.79$ kg e $m_m = 4452.66$ kg. Assim, se os valores m_m entre os casos estudados forem comparados, é possível determinar a massa de água duas vezes maximizada ($m_{mm} = 10688.66$ kg) para a geometria $S_o = 3.5$ m e $(H_1/L_1)_{oo} = 0.34$. Também pode ser visto a existência de um ponto de máximo local para $S = 6.0$ m, ou seja, esta geometria conduziu a um desempenho superior a melhor geometria obtida para o caso $S = 5.5$ m, que está 0.5 m mais afundado. Pode ser observado que o *Constructal Design* permitiu um aumento significativo do desempenho do dispositivo. Por exemplo, se compararmos a quantidade de massa de água máxima (m_m) entre as alturas $S = 3.5$ m e $S = 6.5$ m, pode-se verificar que a quantidade de massa de água acumulada no reservatório é aproximadamente 40 % maior. Vale destacar ainda que, para razões de $S < 4.5$ m o afundamento não conduziu a uma melhora significativa do desempenho do dispositivo, obtendo-se diferenças de 1.9 % e 5.9 % entre o melhor S ($S = 3.5$ m) e os casos $S = 4.0$ m e 4.5 m, respectivamente. Consequentemente, se houverem dificuldades construtivas e econômicas para aumentar o afundamento do

dispositivo, valores inferiores à $S = 4.5$ m podem não serem os mais recomendados. Também se ressalta que o aumento no afundamento do dispositivo conduz a uma restrição da capacidade do reservatório para uma mesma área da base do mesmo, como considerado no presente estudo.

Finalmente, para ilustrar efeito de S sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada (Fig. 6.26) foram analisados os resultados de $(H_1/L_1)_o$ para as alturas: $S = 3.5$ 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.

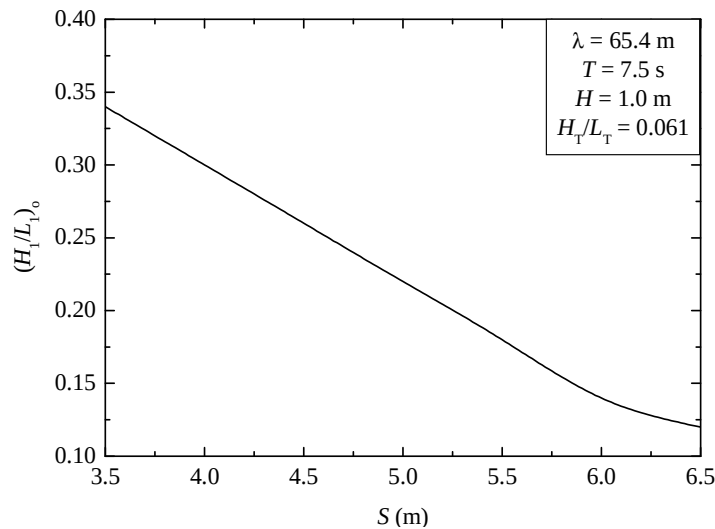


Figura 6.26 – Efeito de S sobre a razão H_1/L_1 uma vez otimizada $((H_1/L_1)_o)$.

As geometrias ótimas encontradas para cada altura estudada foram: $(H_1/L_1)_o = 0.34$, $(H_1/L_1)_o = 0.30$, $(H_1/L_1)_o = 0.26$, $(H_1/L_1)_o = 0.22$, $(H_1/L_1)_o = 0.18$, $(H_1/L_1)_o = 0.14$ e $(H_1/L_1)_o = 0.13$, ou seja, a altura do dispositivo se mostrou inversamente proporcional à razão $(H_1/L_1)_o$. Para valores de S na faixa ($3.5 \text{ m} \leq S \leq 6.0 \text{ m}$) a variação de $(H_1/L_1)_o$ é linear e para $S > 6.0$ m tende a estabilizar. Provavelmente esse efeito esteja relacionado ao aumento da dificuldade da onda em galgar o dispositivo a partir de um determinado valor de S (neste caso $S = 6.0$ 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. A geometria duas vezes otimizada foi obtida para $S_o = 3.5$ m e $(H_1/L_1)_{oo} = 0.34$, o que representa uma rampa com ângulo de $\alpha = 19^\circ$.

Em cinco casos específicos ($S = 3.5$ m e $H_1/L_1 = 0.32$, $S = 4.0$ m e $H_1/L_1 = 0.28$, $S = 4.5$ m e $H_1/L_1 = 0.24$, $S = 5.0$ m e $H_1/L_1 = 0.20$, $S = 5.5$ m e $H_1/L_1 = 0.16$) o galgamento foi bastante intenso e para o intervalo de tempo analisado ($0.0 \text{ s} \leq t \leq 100.0 \text{ s}$) a quantidade de água acumulada extrapolou a capacidade do reservatório. Vale destacar que esses casos representam as menores razões de H_1/L_1 para cada valor de S estudado. Dessa forma, a mesma recomendação alcançada nos resultados anteriores é mantida aqui, ou seja, as menores razões de H_1/L_1 para a rampa foram as que conduziram ao melhor desempenho do dispositivo de galgamento. Uma vez que o comportamento do escoamento a partir de um determinado instante de tempo (onde o reservatório ficou cheio) foi alterado com relação aos demais, preferiu-se tirá-los da comparação com os casos apresentados anteriormente. Além disso, reitera-se aqui que a consideração desses resultados nas Fig. 6.23 a 6.25 ficariam com a mesma tendência. Esses resultados indicam uma necessidade de estudos relacionados ao dimensionamento do reservatório e de inserção de uma saída de água do mesmo.

Para finalizar, foram realizadas algumas simulações onde a altura da borda superior da rampa era inferior a altura da onda ($S = 6.0$ m e $H_1/L_1 < 0.14$; $S = 6.5$ m e $H_1/L_1 < 0.12$). Para todos os casos, o reservatório ficou cheio de água já na primeira incidência de onda sobre o dispositivo de galgamento. Esses casos também não foram contabilizados na comparação de resultados ilustrados nas Figs. 6.23 a 6.25, pois eram restrições geométricas do problema.

7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico de análise e otimização com o objetivo de avaliar as geometrias que conduzem a um melhor desempenho fluidodinâmico de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real. Esta análise foi realizada através do método *Constructal Design* e considerou-se o dispositivo com várias distâncias entre o fundo do tanque e a superfície inferior do reservatório (submersão do dispositivo). Convém destacar que este tipo de análise, relacionada à avaliação da geometria para um dispositivo de galgamento em escala real com uma localização *onshore* empregando o *constructal design*, é inédita.

O problema avaliado possui dois graus de liberdade (razão entre altura e comprimento da rampa e a submersão) e uma restrição geométrica (área ocupada pela rampa no tanque de ondas simulado). A geometria foi variada de forma a maximizar a quantidade de água das ondas incidentes que entram no reservatório do dispositivo de galgamento. Para tal estudo foi resolvido um escoamento transiente de uma mistura ar-água no regime laminar. A solução numérica das equações de conservação da massa e quantidade de movimento foi obtida através do Método de Volumes Finitos. O método *Volume of Fluid* foi empregado para o tratamento da interação entre as fases ar e água, permitindo a geração de ondas regulares em um tanque de ondas e sua interação com o dispositivo. Foram utilizados os softwares GAMBIT, para a construção do domínio computacional, e FLUENT, que através do Método dos Volumes Finitos (MVF) resolve as equações governantes do problema.

Foi apresentada uma forma de geração de malha refinada por regiões de interesse, conhecida como malha *stretched*. Convém destacar que este tipo de malha com elementos retangulares era algo que não havia sido realizado pelo grupo de pesquisa no qual este trabalho está inserido para a simulação deste tipo de dispositivo que apresenta uma geometria complexa.

Recomendações teóricas sobre formas geométricas ótimas, que permitem o melhor aproveitamento da energia contida na onda incidente ao dispositivo, foram obtidas com a utilização de *Constructal Design*. Nas condições estabelecidas e válidas para o presente estudo, 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, neste caso a submersão S , e para uma onda específica ($\lambda = 65.4$ m; $T = 7.5$ s; $h = 10.0$ m e $H = 1.0$

m). 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 máxima quantidade de água que entrou no reservatório ao longo do tempo foi obtida 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;

- este comportamento do efeito de H_1/L_1 sobre a massa de água que entrou no reservatório foi contrário ao que havia sido observado anteriormente nos trabalhos de Machado (2012), Dos Santos et al. (2013) e Dos Santos et al. (2014) para um escoamento em escala de laboratório sobre um dispositivo com localização *offshore*. Contudo, houve concordância com estudos experimentais de Kofoed (2002). Futuros estudos são necessários para investigar as causas dessa discordância;

- os resultados, de uma forma geral, demonstram a importância da avaliação geométrica, bem como, a aplicabilidade e a eficiência do *Constructal Design* para a otimização de dispositivos do tipo galgamento para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica. Por exemplo, para $S = 3.5 \text{ m}$, a massa uma vez maximizada, obtida para $(H_1/L_1)_o = 0.34$, foi 146 vezes superior à encontrada para a geometria onde a menor quantidade de massa que entrou no reservatório ocorreu ($H_1/L_1 = 0.44$);

- o mesmo processo de avaliação do efeito de H_1/L_1 sobre m foi repetido para vários valores da submersão S . Nesse caso, a massa de água máxima obtida é duas vezes maximizada, m_{mm} , e a razão H_1/L_1 é duas vezes otimizada, $(H_1/L_1)_{oo}$. Entre todas as geometrias analisadas, a geometria duas vezes otimizada foi obtida para $S_o = 3.5 \text{ m}$ e $(H_1/L_1)_{oo} = 0.34$, o que representa uma rampa com ângulo de $\alpha = 19^\circ$;

- para valores de S na faixa ($3.5 \text{ m} \leq S \leq 6.0 \text{ m}$) a variação de $(H_1/L_1)_o$ é linear e para $S > 6.0 \text{ m}$ tende a estabilizar. Provavelmente esse efeito esteja relacionado ao aumento da dificuldade da onda em galgar o dispositivo a partir de um determinado valor de S (neste caso $S = 6.0 \text{ m}$);

- os resultados ainda mostraram que para razões de $S < 4.5 \text{ m}$ o afundamento não conduziu a uma melhora significativa do desempenho do dispositivo, obtendo-se diferenças de 1.9 % e 5.9 % entre o melhor S ($S = 3.5 \text{ m}$) e os casos $S = 4.0 \text{ m}$ e 4.5 m , respectivamente. Consequentemente, se forem constatadas dificuldades construtivas e econômicas para aumentar o afundamento do dispositivo, valores inferiores a $S = 4.5 \text{ m}$ podem não serem os mais recomendados. Também se ressalta que o aumento no afundamento do dispositivo conduz a uma restrição da capacidade do reservatório para uma mesma área da base do mesmo, como considerado no presente estudo.

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

- comparar a localização de um dispositivo de galgamento levando em conta um dispositivo *offshore* (localizado no meio do tanque de ondas) com os resultados obtidos em um dispositivo *onshore* (localizado no final do tanque de ondas) realizados aqui;

- realizar a otimização de dois graus de liberdade do dispositivo de galgamento, H_1/L_1 (relação entre altura e comprimento da rampa do dispositivo de galgamento) e S (submergência do dispositivo de galgamento), utilizando *Constructal Design* para um dispositivo de galgamento considerando um clima de ondas em escala real;

- Expandir as análises dos resultados dos casos onde não houve o galgamento para obtenção de uma recomendação teórica para construção de quebra-mar, utilizando *Constructal Design*;

- realizar estudos experimentais em dispositivo de galgamento (*onshore* e *offshore*) para obtenção de parâmetros com a finalidade de validação de modelos numéricos para simulações de dispositivos de galgamento (*onshore* e *offshore*) em escala real;

- desenvolver técnicas que permitam simulação numérica com a utilização da energia potencial armazenada no reservatório, inserindo-se uma turbina no sistema com objetivo de determinar o potencial energético resultante do dispositivo de galgamento em escala real (*onshore* e *offshore*);

- comparar por meio de simulação numérica a eficiência de um dispositivo de galgamento em escala real com um dispositivo do tipo CAO em escala real utilizando *Constructal Design*. Mantendo-se os mesmos parâmetros de onda e profundidade da lâmina de água;

- 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 outras metodologias, como por exemplo a implementada no software OPENFOAM.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azad, A. V., Amidpour, M., 2011, "**Economic optimization of shell and tube heat exchanger based on constructal theory**", Energy, Vol. 36, pp. 1087-1096.

Bahaj, A., 2011. "**Generating electricity from the oceans**", Renew. Sust. Energ. Rev., 15: 3399~3416.

BNDES, 2013 – (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social). "**O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado**". Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2102.pdf>. Acesso em: 5 de janeiro de 2013.

Barreiro, T. G., 2009. "**Estudo Da Interação de uma Onda Monocromática com um Conversor de Energia**", Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 87 P.

Beels C., Troch, P., Visch, K. De, Kofoed, J. P. and Backer, G. De., 2010. "**Application of time-dependent mild slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of Wave Dragon wave energy converters**", Renew. Energ. 35: 1644 ~1661.

Bejan, A. and Zane, P., 2012. "**Design in Nature**", 1st ed., Doubleday, USA.

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

Bejan, A. e Lorente, S., 2006a, "**Constructal Theory of generation of configuration in nature and engineering**", J. Appl. Phys., Vol. 100, pp. 041301.

Bejan, A. e Lorente, S., 2006b, "**The Constructal Law**", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 49, pp. 445-445.

Bejan, A., Almogbel, M., 2000. "**Constructal T-Shaped Fins**", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 43, Pp. 2101-2115.

Bejan, A., 2000, "**Shape and Structure, from Engineering to Nature**", Cambridge University, Cambridge, UK.

Bejan, A., 1997, "**Constructal-Theory Network Of Conducting Paths For Cooling A Heat Generating Volume**", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 4, Pp. 799–816.

Bello-Ochende, T., Lienbenberg, L., Malan, A.G., Bejan, A., Meyer, J.P., 2007a, "**Constructal Conjugate Heat Transfer In Three-Dimensional Cooling Channels**", Journal of Enhanced Heat Transfer, Vol. 14, Pp. 279-293.

Bello-Ochende, T., Lienbenberg, L., Bejan, A., 2007b, "**Constructal Cooling Channels For Micro-Channel Heat Sinks**", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, Pp. 4141 – 4150.

Bello-Ochende, T., e Bejan, A., 2005. "**Constructal Multi-Scale Cylinders In Cross-Flow**", International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (7), 1373-138.

Beyene, A., e Peffley, J., 2009. "**Constructal Theory, Adaptive Motion, and Their Theoretical Application to Low-Speed Turbine Design**", J. Energy Eng. ASCE, 135(4), pp. 112–118.

BEN - Balanço Energético 2011: Resultados Preliminares: ano base 2010. Ministério de Minas e Energia.MME / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2011. Disponível em:

<https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2011.pdf> Acessado em: 22 de dezembro de 2013.

BEN - Balanço Energético 2014: ano base 2013. Ministério de Minas e Energia. MME / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2014. Disponível em:

<https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2014_Web.pdf> Acessado em: 22 de dezembro de 2013.

Biserni, C., Rocha, L.A.O., Bejan, A., 2004. **"Inverted Fins: Geometric Optimization Of The Intrusion Into A Conducting Wall"**, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 47, Pp. 2577-2586.

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

Brum, R., 2013 **"Modelagem Computacional De Trocadores De Calor Solo-Ar"**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande (Furg), Rio Grande, RS, Brasil.

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 - SP.

Chakrabarti, S. K. **"Handbook of offshore engineering"**. Vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 2005.

Christensen, L., Madensen, E. F., Kofoed, J. P., Tedd, J., **"Worlds Largest Wave Energy Project 2006 in Wales"**, in PoqwerGen 2006 Europe, Conference - Wave Dragon -Germany, 2006.

CORDIS. Harnessing the waves, 2007. Disponível em: <http://cordis.europa.eu/news/rcn/27849_en.html> Acessado em: 16 de dezembro de 2013.

Cruz, J. M. B. P. e Sarmiento, A. J. N. A. **"Energia das Ondas Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais"**, Instituto do Ambiente, Alfragide, 2004.

Dean, R. G., Dalrymple, R.A. **"Water wave mechanics for engineers end scientist"**, vol. 2, World Scientific, Singapura, 353 p., 1991.

Dos Santos, E. D. ; Machado, B. N. ; Zanella, M. M. ; Gomes, M. N. ; Souza, J. A. ; Isoldi, L. A. ; Rocha, L. A. O., 2014. **"Numerical Study Of The Effect Of The Relative Depth On The Overtopping Wave Energy Converters According To Constructal Design"**. Defect And Diffusion Forum, V. 348, P. 232-244, 2014.

Dos Santos, E. D., Machado, B. N., Lopes, N. R., Souza, J. A., Teixeira, P. R. F., Gomes, M. N., Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2013. **"Constructal Design of Wave Energy 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.

Dos Santos, E. **"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, 2011.

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, 196 P.

Echarri, L. Livro eletrônico, **"Ciencias de la tierra y del medio ambiente"**. Escuela Superior de Ingenieros de San Sebastian, Universidad de Navarra. Navarra, Espanha. Disponível em: <<http://www.tecnun.es/asignaturas/ecologia/hipertexto/00General/Principal.html>>. Acesso em: 21 de dezembro de 2012.

Fadaeenejad, M., Shamsipour, R., Rokni, S. D., Gomes, C., 2014. **"New Approaches in Harnessing Wave Energy: with Special Attention to Small Islands"**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 29, pp. 345 – 354.

Falcão, A. F. O., 2010. **"Wave Energy Utilization: A Review of The Technologies"**, Renewable and Sustainable Energy Review, 14: 899~918.

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

FLUENT (version 6.3.16), ANSYS, Inc., 2007.

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

Frigaard, P., Tedd, J., Kofoed, J. P., Friis-Madsen, E., 2006. **"3 Years Experience with Energy Production on the Nissum Bredning Wave Dragon Prototype"**. In: CA-OE Workshop. Aalborg University: Lisbon, November 2006.

Ghosh, T., Prelas, M. **"Energy Resources and Systems"**. Vol 2: Renewable Resources, Columbia, Missouri, USA. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2011.

Gomes, M. N., Santos, E. D. Dos, Isoldi, L. A., Rocha, L. A. O., 2013a, **“Two-Dimensional Geometric Optimization of an Oscillating Water Column Converter of Real Scale”**. In Proceedings 22nd International Congress Of Mechanical Engineering, 2013. V. 1. P. 3468-3479. (Cobem 2013), Ribeirão Preto.

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

Gomes, M. N.; Nascimento, C. D. ; Bonafini, B. L. ; Dos Santos, E. D. ; Isoldi, L. A.; Rocha, L. A. O., 2012a. **"Two-Dimensional Geometric Optimization Of An Oscillating Water Column Converter In Laboratory Scale"**. Engenharia Térmica, V. 11, P. 30-36, 2012.

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

Gomes, M. das N., 2010. **"Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna d'Água Oscilante para a Conversão da Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica"**. Dissertação (mestrado em modelagem computacional) – Fundação Universidade do Rio Grande.

Gosselin, L.; Bejan, A.; Lorente, S., 2004, **“Combined ‘Heat Flow and Strength’ Optimization of Geometry: Mechanical Structures Most Resistant to Thermal Attack”**, International Journal Of Heat And Mass Transfer, V. 47, Pp.3477–3489.

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 (mestrado em modelagem computacional) – Fundação Universidade do Rio Grande.

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. **“Fundamentos Da Física – Gravitação, Ondas e Termodinâmica”**, 6. Ed., Vol. 2, Ltc, Rio De Janeiro, 2002.

Holthuijsen, Leo H. **"Waves in Oceanic and Coastal Waters"**. New York: Cambridge University Press, 2007.

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, 145 p.

Iahnke, S. L. P. **"Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento"**, Dissertação (mestrado em modelagem computacional) – Fundação Universidade do Rio Grande, 2010.

INPI - Instituto da Propriedade Intelectual. Energia Oceânica. Portugal. Disponível em: <http://www.marcaspatentes.pt/files/collections/pt_PT/1/300/302/Energia%20Oce%C3%A2nica.pdf>. Acesso em 15 de dezembro de 2013.

Isoldi, L. A. ; Real, M. V. ; Correia, A. L. G. ; Vaz, J. ; Santos, E. D. Dos ; Rocha, L. A. O., 2013. **"Flow of Stresses: Constructal Design of Perforated Plates Subjected to Tension or Buckling"**. In: L. A. O. Rocha; S. Lorente; A. Bejan. (Org.). Understanding Complex Systems. 1ed.: Springer New York, V. 1, P. 195-217.

Jannuzi, G. M.; Swisher, J. N. P., 1997. **"Planejamento Integrado de Recursos Energéticos: Meio Ambiente, conservação de energia e fontes renováveis"**. Campinas, SP: Autores Associados.

Kang, D. H.; Lorente, S.; Bejan, A., 2010. **"Constructal Dendritic Configuration for the Radiation Heating of a Solid Stream"**. J. Appl. Phys. Vol 107.

Kim, Y., Lorente, S., and Bejan, A., , 2010. **"Constructal multi-tube configuration for natural and forced convection in cross-flow"**, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 53, pp. 5121-5128.

Kim, Y., Lorente, S., and Bejan, A., , 2011. **"Steam generator structure: continuous model and constructal design"**, Int. J. Energy Res., Vol. 35, pp., 336-345.

Kofoed, J. P., Frigaard, P., Friis-Madsen, E. and Sørensen, H. C., 2006. **"Prototype testing of the wave energy converter wave dragon"**, Renew. Energ., 31:181~189.

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; 2002.

Li, Y., Yu, Y.-H., 2012. **"A synthesis of numerical methods for modeling wave energy converter-point absorbers"**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, pp. 4352 – 4364.

Lin, Y.-H., Fang, M.-C., 2012. **"The assessment of ocean wave energy along the coasts of Taiwan"**, China Ocean Eng., 26: 413~430.

Ling, L., Yongcan, C. and Yuliang, L., 2001. **"Volume of fluid (VOF) method for curved free surface water flow in shallow open channel"**. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing, China.

Liu, Z., Hyun B., Jin, J. , 2008a. **"Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC"**, Journal Of The Korean Society For Marine Environmental Engineering, Vol. 11, No.1.

Liu, Z., Hyun B., Hong, K., 2008b. **"Aplication of Numerical Wave Tank to OWC Air Chamber for Wave Energy Conversion"**. In: Proceedings Of The Eighteenth (2008) International Offshore And Polar Engineering Conference, Vancouver, Canada.

Lopes, N. da R., , 2012. **"Modelagem Computacional e Otimização Geométrica de um Conversor do tipo Coluna de Água Oscilante"**, Dissertação (mestrado em modelagem computacional) – Fundação Universidade do Rio Grande.

Lopes, N. R. ; Sant'anna, F. S. P. ; Gomes, M. N. ; Souza, J. A. ; Teixeira, P. R. F. ; Dos Santos, E. D. ; Isoldi, L. A. ; Rocha, L. A. O., 2011. **"Constructal Design Optimization Of The Geometry Of An Oscillating Water Column Wave Energy"**. In: Constructal Law Conference, 2011, Porto Alegre - Rs. Constructal Design Optimization Of The Geometry Of An Oscillating Water Column Wave Energy, 2011.

López, I., Andreu, J., Ceballos, S. Alegría, I. M., Kortabarria, I., 2013. **"Review of Wave Energy Technologies and the Necessary Power-Equipment"**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 27, pp. 413 – 434.

Lorente, S.; Lee, J.; Bejan, A., 2010 **"The Flow Of Stresses" Concept: The Analogy Between Mechanical Strength And Heat Convection"**, International Journal Of Heat And Mass Transfer, V.53, Pp. 2963–2968.

Lorenzini, G.; Correia, R. L.; Dos Santos, E. D. ; Rocha, L.A.O., 2011, "**Constructal Design of Complex Assembly of Fins**", Journal of Heat Transfer, v 133, 081902.

Lorenzini, G., Rocha, L.A.O., 2006, "**Constructal Design of Y-Shaped Assembly of Fins**", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 49, Pp. 4552-4557.

Lv, X., Zou, Q. and Reeve, D., 2011. "**Numerical simulation of overflow at vertical weirs using a hybrid level set/VOF method**", Adv. Water Resour. 34: 1320~1334.

Machado, B. N., 2012. "**Modelagem Computacional e Otimização geométrica de um dispositivo de galgamento para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica**", Dissertação (mestrado em modelagem computacional) – Fundação Universidade do Rio Grande.

Machado, B. N., Zanella, M. M., Gomes, M. N., Teixeira, P. R. F., Isoldi, L. A., Dos Santos, E. D., Rocha, L. A. O., 2011. "**Constructal Design Of An Overtopping Wave Energy Converter**", Constructal Law Conference, Porto Alegre.

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

Morais, T. A. N. da S., 2009. "**Estudo da Operação de Parques de Sistemas de Conversão de Energia das Ondas em Energia Eléctrica**". Dissertação (mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Margheritini, L., Vicinanza, D. and Frigaard, P., 2009. "**Ssg wave energy converter: design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device**". Renew. Energ., 34:1371~1380.

Massel, S. R., 1999, "**Fluid Mechanics For Marine Ecologists**". Germany: Springer, 565p.

Mccormick, M. E., 1973. **“Ocean Engineering Wave Mechanics”**, John Wiley & Sons, Nova York, 179 P.

Ngô, C., 2010 Energy. **"Resources, technologies and the environment"**. English translation 2010. The Institution of Engineering and Technology.

NEO - Núcleo de Estudantes de Oceanografia. Associação Acadêmica da Universidade do Algarve. Portugal. Disponível em: <
<http://www.neo.uaalg.pt/divulgacaocientifica.html>>. Acesso em: 12 de novembro de 2013.

Oliveira, L., Teixeira, P.R. F., Santos, E. D. Dos, Isoldi, L. A., 2012. **“Constructal Design Applied to the Geometric Optimization of the Hydropneumatic Chamber Dimensions of an Oscillating Water Column Wave Energy Device”**, In Proceedings of the 11th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, Brasov, Romania.

Patankar, S. V., 1980. **"Numerical Heat Transfer and Fluid Flow"**, McGraw Hill, New York.

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.

Ravindran, A.; Ragsdell, K.M.; Reklaitis, 2006. **"Engineering Optimization: Methods And Applications"**. 2. Ed. Hamilton: John-Wiley & Sons.

Reis, A. H. , 2006. **"Constructal Theory: from engineering to physics, and how flow systems develop shape and structure"**. Applied Mechanics Reviews, Vol. 59.

Santos, K. G., 2008. **“Estudo da Fluidodinâmica do Leito de Jorro por CFD com Malhas Tridimensionais”**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 110 P.

Savicki, D. L., 2007. **“Análise numérica tridimensional e investigação experimental do comportamento térmico e hidrodinâmico de reservatórios térmicos cilíndricos”**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Schlichting, H. 1979, **"Boundary Layer Theory 7th edn"**. McGraw-Hill, Nova York, Estados Unidos, 817 p.

Shannon R.E.,1998. **"Introduction to the art and science of simulation"**. Proceedings Of The Winter. Simulation Conference.

Tannehill, J. C., Anderson, D. A., Pletcher, R. H., 1997. **“Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer”**, 2. Ed., Taylor & Francis, Estados Unidos, 792 P.

Tedd, J. and Kofoed, J. P., 2009. **"Measurements of overtopping flow time series on the wave dragon, wave energy converter"**. Renew. Energ., 34:711~717.

Versteeg, H. K., Malalasekera, W., 1995. **"An Introduction to Computational Fluid Dynamics"**, Longman, Malasia, 257 p.

Wang, K.M.; Lorent, S.; Bejan, A.,2010, **“Vascular structures for volumetric cooling and mechanical strength”**, Journal of Applied Physics, v.107.

Wave Energy (WAVEC), 2004. **"Survey of Energy Resources"**, cap. 15, p. 401 - 417. World Energy Council. Elsevier.

Zabihian, F. and Fung, A. S., 2011. **"Review of marine renewable energies: case study of Iran"**, Renew. Sust. Energ. Rev., 15: 2461~2474.

Zhang, D., Li, W. and Lin, Y., 2009. **"Wave energy in Chine: current status and perspectives"**, Renew. Energ., 34: 2089~2092.