

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

AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE UMA ESTRUTURA ACOPLADA A UM CONVERSOR DE
ENERGIA DAS ONDAS ONSHORE DO TIPO GALGAMENTO APLICANDO O DESIGN
CONSTRUTAL

por

Andréia Sá de Barros

Projeto de Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, outubro de 2020

AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE UMA ESTRUTURA ACOPLADA A UM CONVERSOR DE
ENERGIA DAS ONDAS ONSHORE DO TIPO GALGAMENTO APLICANDO O DESIGN
CONSTRUTAL

Por

Andréia Sá de Barros
Engenheira Civil

Projeto de Dissertação submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Área de Concentração: Engenharia Marítima

Orientador: Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes

Comissão de Avaliação:

Prof.^a Dr.^a Adriane Prisco Petry

PROMECC/UFRGS

Prof. Dr. Liércio André Isoldi

PPGEO/FURG

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos

PPGEO/FURG

Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes

PPGCTS/IFPR

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, outubro de 2020

Ficha Catalográfica

B277a Barros, Andréia Sá de.

Avaliação geométrica de uma estrutura acoplada a um conversor de energia das ondas *onshore* do tipo galgamento aplicando o *design* construtal / Andréia Sá de Barros. – 2020.

73 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Rio Grande/RS, 2020.

Orientador: Dr. Elizaldo Domingues dos Santos.

Coorientador: Dr. Mateus das Neves Gomes.

1. Design Construtal 2. Simulação Numérica 3. Análise Geométrica
4. Dispositivo de Galgamento 5. Energia das Ondas I. Santos,
Elizaldo Domingues dos II. Gomes, Mateus das Neves III. Título.

CDU 620.97:551.466

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

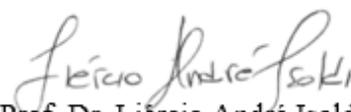
“AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE UMA ESTRUTURA ACOPLADA A UM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS ONSHORE DO TIPO GALGAMENTO APLICANDO O DESIGN CONSTRUTAL”

ANDRÉIA SÁ DE BARROS

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de:

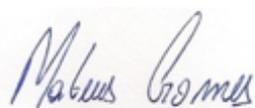
MESTRE EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Tendo sido aprovada em sua forma final pela Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia oceânica.


Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do PPGEO/FURG

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos
Orientador – PPGEO/FURG


Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes
|Coorientador - PPGCTS/IFPR


Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Membro Interno - PPGEO/FURG


Prof. Dra. Adriane Prisco Petry
Membro Externo – UFRGS

AGRADECIMENTOS

Então, mais uma importante etapa da minha caminhada é concluída e eu, não poderia perder esse espaço para manifestar os meus mais sinceros agradecimentos.

Desde já, agradeço a Deus por me oportunizar mais esta conquista.

Foi uma etapa que desde o início, antes mesmo da seleção, eu já imaginava ser desafiadora. Primeiro por achar que as chances de eu conseguir ser selecionada no programa eram pequenas comparada a dos meus colegas que tiveram uma dedicação maior no desenvolvimento de pesquisas durante a graduação, e segundo por não ter ideia da pesquisa que eu desenvolveria, caso fosse selecionada. Diante desses e alguns outros receios me encontrava com muitas dúvidas e então, um ex-professor que hoje considero um grande amigo me incentivou a me inscrever na seleção. Foram diversos e-mails trocados de incentivo que hoje eu guardo carinhosamente. Obrigada Professor Ernesto Alquati por todo incentivo, por me fazer acreditar que era possível.

Iniciado os estudos, os desafios que eu mensurava se multiplicaram e foi com a ajuda dos colegas Édis Antunes e Ricardo Hubner que eu venci a maior parte deles. Agradeço por toda atenção e presteza que vocês tiveram comigo. Tive também o apoio de uma pessoa muito especial que me ajudou a me virar um pouquinho com a tradução dos meus trabalhos. Passou de minha professora de Inglês para uma grande amiga. Ela dizia que eu precisava parar de me boicotar (rsrs), que eu era digna de estar onde estava. Obrigada minha amiga Fernanda Teixeira, deu certo!

Durante o programa, tive que vencer também alguns desafios pessoais em que o apoio da minha família e do meu esposo Anderson foram essenciais para que eu não desistisse. Obrigada por tudo, vocês são o meu alicerce.

Gostaria de fazer um agradecimento em especial para o meu Orientador, Professor Elizaldo dos Santos. Uma pessoa que tive o prazer de conhecer o suficiente para admirá-lo como ser humano e como profissional. Serei eternamente grata por toda ajuda, por todas conversas e por todo o trabalho que desenvolvemos juntos ao longo desse tempo. Obrigada também pela compreensão nos momentos que não foram tão fáceis.

Deixo aqui meu agradecimento também à Universidade Federal do Rio Grande (FURG), aos professores e funcionários do curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo suporte financeiro.

E ao meu filho, o mais doce e carinhoso agradecimento. És tu Bento que me impulsionou a vencer mais essa etapa.

RESUMO

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico de avaliação geométrica de um conversor de energia das ondas do tipo galgamento com uma estrutura acoplada (um obstáculo trapezoidal) montada no fundo de um canal de ondas em escala real, por meio do Design Construtal. É simulado o princípio de funcionamento do dispositivo que consiste no acúmulo de água em um reservatório elevado acima do nível do mar para conversão posterior em turbinas hidráulicas de baixa queda. O principal objetivo aqui é avaliar a geometria do conjunto dispositivo/obstáculo que maximiza a quantidade de água acumulada no reservatório do dispositivo. O problema estudado foi submetido a três restrições de áreas: área total do canal de ondas (A_T), fração de área dada pela razão entre a área de rampa e a área total do canal ($\phi_r = A_r/A_T$) e área do obstáculo colocado no fundo do canal (A_o) e quatro graus de liberdade: razão entre a altura e o comprimento do canal (H_T/L_T), razão entre a altura e o comprimento da rampa (H_3/L_3) (ou declive da rampa), distância entre o fundo do canal e o dispositivo (H_1) e razão entre as bases menor e maior do obstáculo trapezoidal (L_1/L_2). No presente estudo, são investigados os efeitos de H_3/L_3 e L_1/L_2 sobre a massa de água que entra no reservatório. Equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica da água são resolvidas com o Método dos Volumes Finitos (MVF). Para lidar com mistura água-ar, é utilizado o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF). Os resultados mostraram que a associação de uma estrutura acoplada à rampa de um dispositivo de galgamento pode melhorar o desempenho do dispositivo em 30% comparado a um dispositivo convencional. A inserção do obstáculo contribuiu para o desempenho do dispositivo, porém H_3/L_3 possui maior efeito que L_1/L_2 sobre o indicador de performance. Por fim, a menor razão de H_3/L_3 associada a magnitudes intermediárias de L_1/L_2 , ou seja, uma rampa no formato trapezoidal, levam ao melhor desempenho do conjunto dispositivo/obstáculo.

Palavras-chaves: Design Construtal, Simulação Numérica, Análise Geométrica, Dispositivo de Galgamento, Energia das Ondas.

ABSTRACT

In the present work, a numerical study was carried out of a geometrical evaluation of an overtopping wave energy conversion with a coupled structure (a trapezoidal obstacle) mounted on the seabed of a real scale wave tank by means of Constructal Design. The operating principle of overtopping device is simulated, which consists on the water accumulation into a reservoir raised above the sea level for posterior conversion in low head hydraulic turbines. The main purpose here is to evaluate the design of the overtopping which maximizes the available power in the device. The problem studied has been submitted to three constraint areas: overtopping ramp (A_T), seabed placed trapezoidal obstacle ($\phi_r = A_r/A_T$) and total tank area (A_t) and four degrees of freedom: ratio between the height and length of tank (H_T/L_T), ratio between the height and length of ramp (H_3/L_3) (or ramp slope), distance between the bottom of wave tank and the device (H_1) and ratio between minor and major basis of trapezoidal obstacle (L_1/L_2). In the present study, the effects of the H_3/L_3 and L_1/L_2 over the mass that enters into the reservoir are investigated. Conservation equations of mass, momentum and one equation for the transport of water volume fraction are solved with the finite volume method. To tackle with water-air mixture, multiphase model Volume of Fluid is used. Results showed that the association of a structure coupled to the ramp of an overtopping device can improve the performance of overtopping device by 30% compared to a conventional overtopping device. The insertion of the obstacle contributed to the performance of the overtopping device, however H_3/L_3 has greater effect than L_1/L_2 on the performance indicator. Finally, the lower ratio H_3/L_3 associated with intermediate magnitudes of L_1/L_2 , that is, a trapezoidal ramp, conducted to the best performance of the device.

Keywords: Constructal Design, Numerical Simulation, Geometric Analysis, Overtopping Device, Ocean Wave Energy.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Motivação.....	15
1.2. Estado da Arte	17
1.3. Objetivos	27
1.3.1. Objetivo geral.....	27
1.3.2. Objetivos específicos	27
2. FUNDAMENTOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS	28
2.1. Introdução à Energia das Ondas.....	28
2.2. Teoria das Ondas	28
2.2.1. Como as Ondas se Formam	28
2.2.2. Teoria de Stokes de 2ª Ordem	33
2.3. Equipamentos de Conversão de Energia das Ondas	34
2.3.1. Dispositivo de Galgamento.....	36
2.3.1.1. Wave Dragon	37
2.3.1.2. Wave Plane	38
2.3.1.3. Seawave Slot-Cone Generator – SSG	39
3. FUNDAMENTOS DO DESIGN CONSTRUTAL.....	41
3.1. Introdução à Teoria Construtal.....	41
3.2. O método Design Construtal.....	42
4. MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA	45
4.1. Domínio Computacional.....	45
4.2. Aplicação do Design Construtal.....	46
4.3. Modelo <i>Volume of Fluid</i> - VOF	48
4.4. Técnicas Numéricas	50
4.5. Estudo de Convergência de Malha.....	51
4.6. Estudo de Convergência de Passo de Tempo	53
4.7. Verificação do Modelo Numérico	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
6. CONCLUSÕES	67
7. REFERÊNCIAS.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Matriz Elétrica Mundial 2018 (Extraída de https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica . Acesso em 16/06/2020).....	15
Figura 1.2 – Matriz Elétrica Brasileira 2018 (Extraída de https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica . Acesso em 16/06/2020).....	16
Figura 1.3 – Wave Dragon: a) Principais Componentes, b) Princípio Básico (Adaptado de Kofoed et al., 2006).	18
Figura 1.4 – Esquema do dispositivo (Adaptado de Liu et al., 2008a).....	18
Figura 1.5 – Dispositivo de galgamento circular (Nam et al., 2008).....	19
Figura 1.6 – Sea Slot-cone Generator: a) Planta piloto, b) Seção lateral do dispositivo (Margheritini et al., 2009).....	20
Figura 1.7 – Arranjo dos dispositivos Dragon Wave (Adaptado de Beels et al., 2010).	20
Figura 1.8 – Dispositivo de galgamento em escala real com dois graus de liberdades (Goulart et al., 2015).	22
Figura 1.9 – Ilustração das variações sofridas pela geometria do dispositivo de galgamento ao longo do processo de otimização geométrica: a) $b/B < 1$, b) $b/B = 1$, c) $b/B > 1$ (Machado, 2016).....	22
Figura 1.10 – Modelo físico do CROWN (Liu et al., 2017).....	23
Figura 1.11 – Esquema conceitual do MOBREC (Han et al., 2018).	24
Figura 1.12 – Esboço do princípio de funcionamento do OBREC, mostrando: 1) a rampa de cobertura, 2) o reservatório e 3) a turbina dentro da sala de máquinas (Contestabile et at., 2020)....	25
Figura 1.13 – Projeto conceitual do quebra-mar vertical inovador (Lauro et at., 2020).....	26
Figura 2.1 – Elementos de uma Onda (Dean e Dalrymple, 1991).....	30
Figura 2.2 – Teoria das ondas (Dean e Dalrymple, 1991).	32
Figura 2.3 – Aplicabilidade das teorias de ondas (Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991).	33
Figura 2.4 – Instalação dos dispositivos conversores de energia das ondas (López et al., 2013).....	35
Figura 2.5 – Tecnologias de conversores de energia das ondas (Adaptado de Martins, 2016).	36
Figura 2.6 – Princípio de funcionamento do galgamento (Adaptado de Li e Yu, 2012).	36
Figura 2.7 – Dispositivo Tapchan: a) Ilustração do esquema de funcionamento, b) imagem real do equipamento (Pereira, 2010).....	37
Figura 2.8 – Protótipo Wave Dragon em testes no mar (Extraída de https://www.copybook.com/img/pgib4354s7214/wave-dragon-wave-energy-converter.jpg?v=1509463589 . Acesso em 21/05/2020).....	38
Figura 2.9 – Dispositivo Wave Plane (López et al., 2013).	39

Figura 2.10 – Princípio de funcionamento do SSG (Extraída de http://newinscience.blogspot.com/2008/04/sea-wave-slot-cone-generator.html . Acesso em 21/05/2020).	39
Figura 2.11 – Dispositivo Seawave Slot-Cone Generator (Vicinanza et al., 2012).	40
Figura 3.1 – Exemplos de aplicação da Lei Construtal: a) rios, b) árvores, c) floco de neve, d) animais, e) pulmão (Bejan, 2000).	43
Figura 3.2 – Etapas de aplicação do método Design Construtal e Busca Exaustiva.	44
Figura 4.1 – Domínio computacional do canal de onda com o dispositivo de galgamento e obstáculo trapezoidal.	46
Figura 4.2 – Ilustração do processo de otimização aplicado ao dispositivo de galgamento variando dois graus de liberdade.	47
Figura 4.3 – Teste de Convergência de Malha: comparação da onda gerada analiticamente com as ondas geradas com quatro malhas diferentes.	51
Figura 4.4 – Discretização espacial aplicada ao dispositivo de galgamento onshore em escala real.	53
Figura 4.5 – Teste de convergência de passo de tempo para as simulações realizadas.	54
Figura 4.6 – Verificação da solução numérica com a solução analítica obtida pela teoria de Stokes de 2ª Ordem.	55
Figura 5.1 – Configurações geométricas do obstáculo: a) triangular, b) trapezoidal e c) retangular.	57
Figura 5.2 – Efeito da razão L_1/L_2 sobre a massa de água para diferentes razões de H_3/L_3 .	59
Figura 5.3 – Efeito da razão H_3/L_3 sobre a massa de água uma vez maximizada.	60
Figura 5.4 – Comportamento instantâneo do galgamento sobre o dispositivo para o caso $H_3/L_3 = 0.33$ para diferentes magnitudes da razão L_1/L_2 .	61
Figura 5.5 – Quantidade acumulada de água no reservatório ao longo do tempo para o caso $H_3/L_3 = 0.33$ para diferentes magnitudes da razão L_1/L_2 .	62
Figura 5.6 – Comportamento do escoamento da onda sobre o dispositivo para o caso $H_3/L_3 = 0.33$ e razão $L_1/L_2 = 0.11$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.	63
Figura 5.7 – Comportamento do escoamento da onda sobre o dispositivo para o caso $H_3/L_3 = 0.33$ e razão $L_1/L_2 = 0.67$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.	63
Figura 5.8 – Comportamento do escoamento da onda sobre o dispositivo para o caso $H_3/L_3 = 0.33$ e razão $L_1/L_2 = 1.00$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.	64
Figura 5.9 – Comparação entre o desempenho do dispositivo sem obstáculo estudado em Martins et al., (2018) com o dispositivo integrado com diferentes formas geométricas.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Valores da diferença relativa e do tempo de simulação para cada malha.....	52
Tabela 4.2 – Valores de altura da superfície livre da onda (η) no tempo de 15.0 s para os passos de tempo estudado e suas variações.....	54
Tabela 4.3 – Comparação do desempenho entre um dispositivo de galgamento convencional e o conjunto dispositivo/obstáculo.....	56

LISTA DE SÍMBOLOS

A_r	Área da rampa	[m ²]
A_t	Área do obstáculo trapezoidal	[m ²]
A_T	Área do canal de ondas	[m ²]
a	Amplitude da onda	[m]
C	Celeridade da onda	[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_1	Altura do obstáculo trapezoidal	[m]
H_3	Altura da rampa	[m]
H_T	Altura do canal	[m]
L_3	Comprimento da rampa	[m]
L_1	Base menor do obstáculo trapezoidal	[m]
L_2	Base maior do obstáculo trapezoidal	[m]
L_T	Comprimento do canal	[m]
m	Massa de água	[kg]
P	Pressão	[Pa]
t	Tempo	[s]
T	Período de onda	[s]
U_r	Número de Ursell ($\lambda^2 H/h^3$)	
\vec{v}	Vetor velocidade	[m/s]
W	Coordenada espacial perpendicular ao dispositivo	[m]
x	Coordenada espacial	[m]
z	Coordenada espacial	[m]
u_x	Componente da velocidade na direção x	[m/s]
u_z	Componente da velocidade na direção z	[m/s]

Símbolos gregos

μ	Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
α_q	Fração volumétrica das duas fases (ar e água)	

$\alpha_{\text{água}}$	Fração volumétrica da fase água	
A_{ar}	Fração volumétrica da fase ar	
η	Elevação da superfície livre	[m]
λ	Comprimento de onda	[m]
ρ	Massa específica	[kg.m ⁻³]
φ_r	Razão entre área da rampa e a área do canal de ondas	
φ_{obs}	Razão entre área do obstáculo e a área do canal de ondas	
σ	Frequência da onda	[s ⁻¹]
$\bar{\tau}$	Tensor taxa de deformação	[Pa]
Δ	Varição da componente em relação ao tempo ou ao espaço	

LISTA DE ABREVIATURAS

CAO	Coluna de Água Oscilante
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
CTB	<i>Comb-Type Breakwater</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
MVF	Método dos Volumes Finitos
MOBREC	<i>Multi-level Overtopping Break-water for Energy Conversion</i>
NAE	Nível de água estático
OBREC	<i>Overtopping Breakwater for Energy Conversion</i>
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
PRESTO	<i>Pressure Staggering Option</i>
SSG	<i>Sea Slot-cone Generator</i>
VOF	<i>Volume of Fluid</i>
WD	<i>Wave Dragon</i>
WEC	<i>Wave Energy Conversion</i>
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

O consumo de energia devido ao desenvolvimento tecnológico, econômico e social, têm impulsionado as principais nações fornecedoras de energia a investir em tecnologias que atendam aos critérios de capacidade de atendimento à demanda atual, bem como aos critérios de sustentabilidade e responsabilidade ambiental.

Os combustíveis fósseis têm tido menor viabilidade econômica com o passar dos tempos, mas é ainda hoje a alternativa mais viável que se tem. Caso contrário, praticamente todos os sistemas de transporte (aéreo, naval e terrestre) não usariam mais essa fonte. Embora a busca por alternativas de menor impacto ambiental seja muito importante, os combustíveis fósseis ainda permanecerão na matriz energética por bastante tempo. Tais fontes são reabastecidas por processos naturais a um ritmo igual ou superior à sua utilização (Greenpeace, 2013).

Segundo a EPE - Empresa de Pesquisa Energética (2018), as plataformas de energia renováveis apresentam dificuldades de uso contínuo em larga escala, seja pela adoção de tecnologias e diferentes métodos ou pela barreira de mercado mundial que ainda tem como base as fontes de energia fósseis (carvão, petróleo e gás natural), as quais compõem a maior parte da matriz elétrica mundial, como mostra a Fig. 1.1.

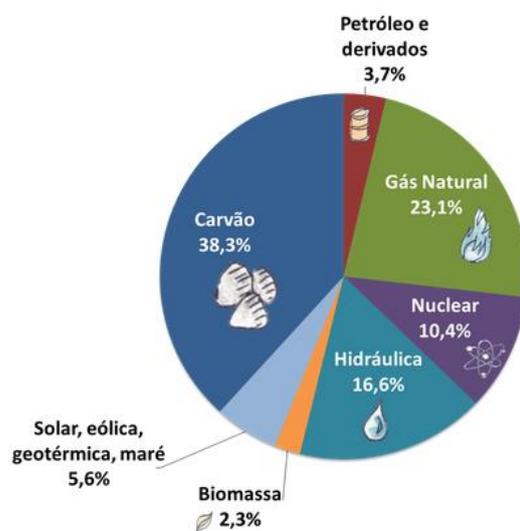


Figura 1.1 – Matriz Elétrica Mundial 2018 (Extraída de <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em 16/06/2020).

Através da Fig. 1.2 é possível observar que as usinas hidroelétricas são as responsáveis pela geração da maior parte da energia elétrica renovável gerada no Brasil, contribuindo para que a matriz elétrica seja, em sua maior parte, composta por fontes renováveis de energia.

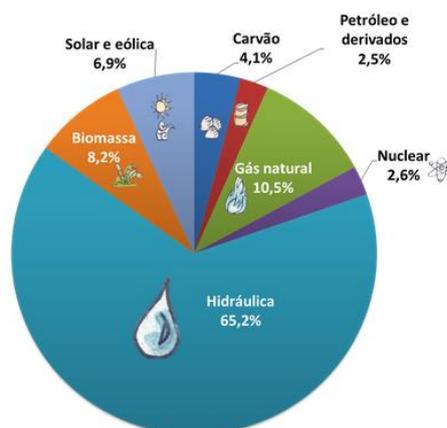


Figura 1.2 – Matriz Elétrica Brasileira 2018 (Extraída de <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em 16/06/2020).

Com relação a utilização das fontes renováveis e não renováveis, o Brasil possui uma maior utilização de fontes limpas, comparado ao restante do mundo. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética, o Brasil utiliza 82% de energia proveniente de fontes renováveis, enquanto que o resto do mundo utiliza apenas 24%.

O potencial de energia das ondas do mar tem sido reconhecido ao longo da história. No entanto, é somente nos últimos tempos, após as crises do petróleo da década de 1970 quando a atenção estava voltada para a possibilidade de extrair maiores quantidades de energia a partir de fontes de energia naturais, que a exploração das ondas do mar na produção de energia elétrica foi estudada em mais detalhes. Experimentos em conversão de energia das ondas têm indicado que vários métodos com diferentes princípios de funcionamento são viáveis para obtenção de energia das ondas (Falcão, 2010).

Neste trabalho, o dispositivo objeto de estudo é o do tipo galgamento. Seu princípio de funcionamento consiste em guiar as ondas do mar através de uma rampa, até um reservatório localizado acima do nível médio do mar. A água acumulada no reservatório retorna ao mar escoando através de uma turbina de baixa queda, gerando energia elétrica (Fleming, 2012).

1.2. Estado da Arte

Estudos experimentais e numéricos para avaliação de parâmetros construtivos de dispositivos conversores de energia das ondas do tipo galgamento vêm sendo desenvolvidos. Segundo Tedd e Kofoed (2009), grande parte da literatura existente sobre dispositivos de galgamento (*overtopping*) investigou os escoamentos sobre quebra-mares e barragens. Porém, este princípio requer sempre que a estrutura vertical do dispositivo seja sensivelmente maior que a altura da crista da onda, já que o interesse consiste em criar estruturas de defesa costeira, tornando o escoamento de água do mar que cruza a rampa o menor possível. Em contrapartida, quando o objetivo é converter a energia das ondas em energia elétrica, o interesse se torna em captar a maior quantidade de massa de água possível, sendo necessário então, a instalação do dispositivo em alturas mais baixas.

Dentre os diversos estudos que vêm sido desenvolvidos sobre o dispositivo de galgamento, a maior concentração está nos estudos experimentais que avalia parâmetros construtivos. As maiores contribuições identificadas na literatura são apresentadas a seguir:

Kofoed (2002) realizou um estudo, através de experimentos em laboratório, sobre orientações para o cálculo de descargas da água no galgamento para diferentes geometrias de rampa. Cada rampa com um reservatório individual em diferentes níveis. A influência de vários parâmetros geométricos tais como: a inclinação da rampa, a 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 foi quantificado. 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 (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 canal de ondas em um protótipo em escala reduzida de 1:50 na Universidade de Aalborg na Dinamarca. Em um segundo momento um novo protótipo em escala reduzida de 1:4.5 do *Wave Dragon*, foi colocado em Nissum Bredning, na Dinamarca, sendo ligado à rede em maio 2003. Este é considerado como o primeiro conversor de energia das ondas *offshore* do mundo. No período de maio de 2003 a janeiro de 2005, um amplo programa de medição foi realizado para monitorar a potência, o clima de ondas, as forças nos sistemas de fixação, tensões na estrutura e movimentos do protótipo, resultando em

plano de estudos com a finalidade de determinar a ideal concepção para a estrutura e o planejamento para implantação de uma unidade de produção de energia de 4 MW. Uma ilustração da configuração do *Wave Dragon* pode ser vista na Fig. 1.3.

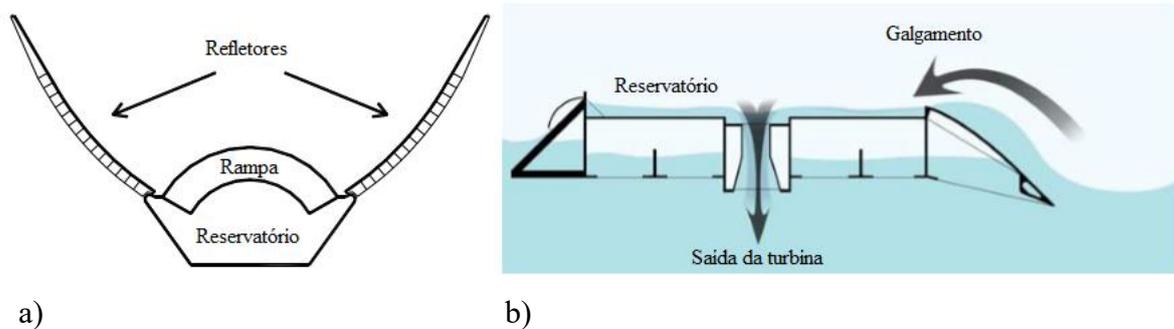


Figura 1.3 – Wave Dragon: a) Principais Componentes, b) Princípio Básico (Adaptado de Kofoed et al., 2006).

Em Liu et al. (2008a) é apresentada a modelagem computacional de um dispositivo de galgamento utilizando a metodologia VOF (*Volume of Fluid*) para a interação entre ar e água no dispositivo. Para isso, geometrias diferentes para o conversor foram analisadas empregando modelos computacionais 2D (bidimensional). As equações de conservação foram resolvidas com o método de volumes finitos, mais precisamente com o software FLUENT. Várias condições das ondas incidentes e geometrias do dispositivo foram analisadas, resultando em recomendações sobre a inclinação da rampa do dispositivo. Contudo, não foi empregado o método Design Construtal para a definição da avaliação geométrica da rampa. Relações fixas de altura por comprimento da rampa de 1:1, 1:2 e 2:3 foram investigadas. Na Fig. 1.4 é apresentado o esquema do dispositivo.

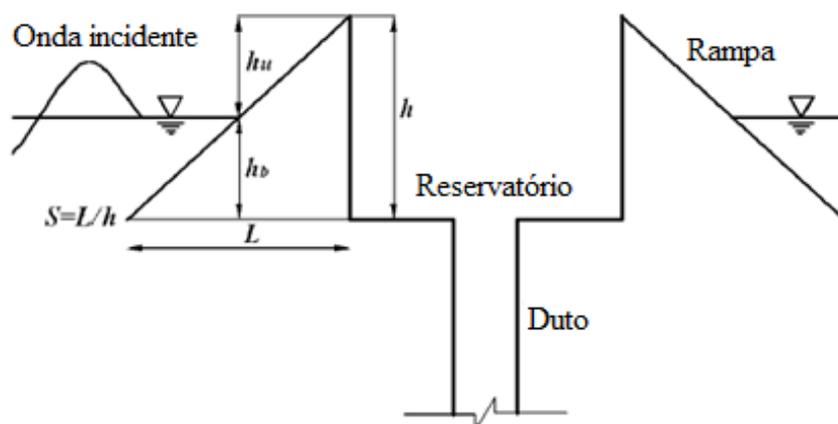


Figura 1.4 – Esquema do dispositivo (Adaptado de Liu et al., 2008a).

Nam et al. (2008) realizaram um estudo numérico de um dispositivo de galgamento circular, onde foram inseridas aletas igualmente espaçadas na área da rampa para guiar a água incidente, com o objetivo de determinar os parâmetros geométricos ótimos que maximizam a quantidade de água galgada. Para a realização deste estudo foi utilizado o software FLOW3D, sendo 21 casos simulados 2D e 3D. Nos casos bidimensionais foram testados diferentes ângulos e formas da rampa. Já as simulações 3D tiveram o objetivo de compreender o comportamento do escoamento da água sobre o dispositivo de galgamento, além do efeito causado com o acréscimo de aletas sobre a rampa. A Figura 1.5 mostra um desenho do funcionamento do dispositivo. Como resultado, os parâmetros ótimos obtidos para os casos 2D e 3D, não foram os mesmos.



Figura 1.5 – Dispositivo de galgamento circular (Nam et al., 2008).

Margheritini et al. (2009) analisaram um dispositivo denominado *Sea Slot-cone Generator* (SSG), que é ilustrado na Fig. 1.6. Conforme os autores, as vantagens do SSG são seu baixo custo da construção da estrutura e a sua robustez. Trata-se de 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. Mais tarde, em Margheritini et al. (2012), é realizada uma análise de viabilidade de implementação do SSG no porto de *Hanstholm* na Dinamarca. Desta forma, um estudo numérico de otimização geométrica do SSG foi realizado por meio do *software WOPSim*, o qual foi desenvolvido pela Universidade de Aalborg especificamente para a determinação de parâmetros do SSG.

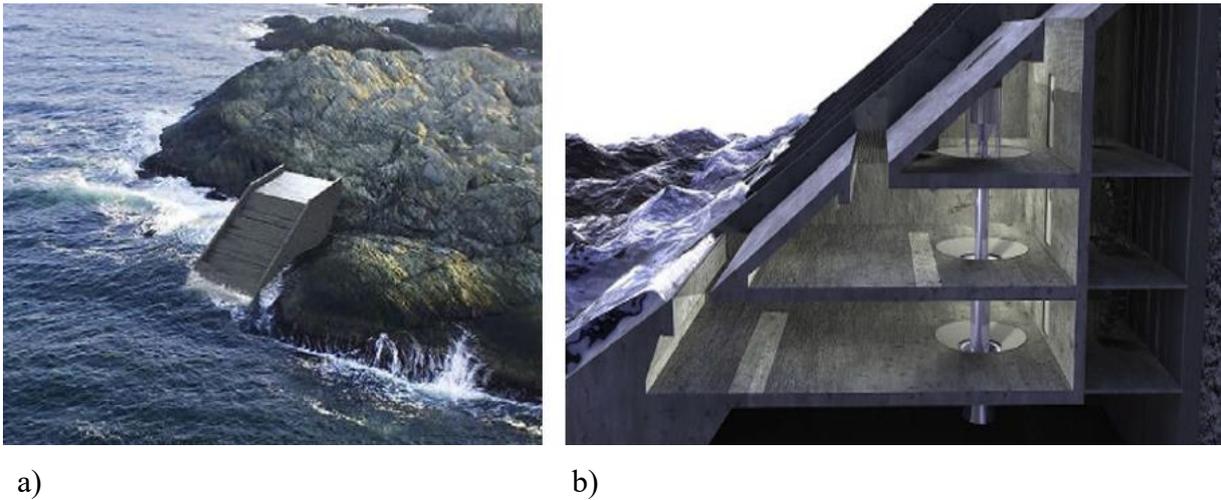


Figura 1.6 – *Sea Slot-cone Generator*: a) Planta piloto, b) Seção lateral do dispositivo (Margheritini et al., 2009).

Beels et al. (2010) utilizaram o modelo *MILDwave*, que emprega as equações de declividade suave (*mild-slope equations*) e descreve a transformação de ondas irregulares com uma estreita faixa de frequência conforme a variação batimétrica. Além disso, é capaz de simular processos de transformação da onda tais como: refração, empolamento, reflexão e difração. Entretanto, a quebra da onda (rebentação) e a energia de dissipação por atrito no fundo não foram considerados. O *MILDwave* pode simular ainda o efeito do vento sobre o crescimento da onda. Desta forma, o modelo numérico desenvolvido foi implementado em um único *Wave Dragon* e em diferentes formações do conjunto de dispositivos, variando a distância entre os equipamentos em D , $2D$ e $3D$ sendo D a medida da distância entre as duas pontas do refletor do *Wave Dragon* (260 m). Como resultado, os autores concluíram que uma fazenda de cinco conversores *Wave Dragon* instalados com um arranjo desalinhado, como pode ser visto na Fig. 1.7, torna-se mais eficiente para o aproveitamento do espaço, sem provocar interferências significativas no rendimento do conversor.

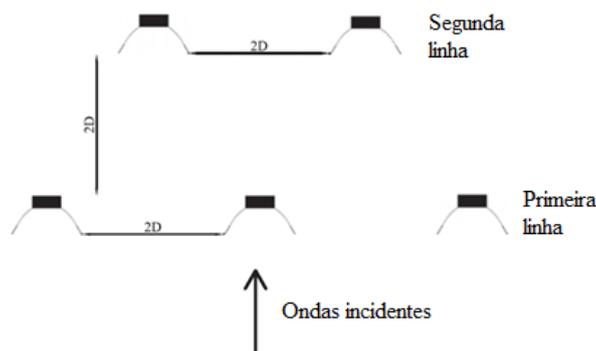


Figura 1.7 – Arranjo dos dispositivos *Dragon Wave* (Adaptado de Beels et al., 2010).

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, localizada 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. Como não houve a definição de uma restrição de área para a rampa, não foi empregado o Design Construtal para avaliação das geometrias estudadas.

O emprego do Design Construtal para projetos de conversores de energia das ondas em energia elétrica ainda é pouco explorado. Machado (2012), realizou um estudo numérico cujo principal objetivo foi a obtenção de uma recomendação teórica por meio do Design Construtal para a geometria da rampa, visando aumentar a quantidade de água incidente no reservatório. Para tal estudo foram utilizadas a mesma metodologia numérica empregada em Machado et al., 2011c. Realizou-se um estudo numérico bidimensional visando a otimização geométrica de um dispositivo de galgamento inserido em um clima de ondas com profundidade relativa $h/\lambda = 0.50$ (apresentado em Machado et al., 2011) e $h/\lambda = 0.62$, empregando o método Design Construtal. O primeiro caso, $h/\lambda = 0.50$, descreve uma zona de transição entre um clima de águas intermediárias e um clima de águas profundas. Enquanto o segundo caso, $h/\lambda = 0.62$, apresenta um clima de águas profundas. Os resultados mostraram que a geometria ótima do dispositivo (H_1/L_1 - razão entre altura e comprimento da rampa do dispositivo) sofreu influência do clima de ondas, ou seja, do parâmetro h/λ . Porém, os resultados encontrados para os dois casos foram muito semelhantes; ambos os extremos inferior e superior da relação H_1/L_1 conduziram aos piores desempenhos e, também, observou-se, em ambos, a existência de um ponto de máximo local para a mesma razão $H_1/L_1 = 1.00$.

Goulart et al. (2015) utilizaram o método no estudo numérico relacionado ao efeito da geometria da rampa sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real, conforme a configuração apresentada na Fig. 1.8. O objetivo principal foi avaliar a razão entre altura e comprimento da rampa (H_1/L_1) que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório do dispositivo para distâncias entre o fundo do dispositivo e o fundo do canal de $S = 5,0$ m e $S = 6,0$ m. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação para o transporte da fração volumétrica (modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) foram resolvidas com o método dos volumes finitos (MVF). Os resultados mostraram que as melhores geometrias foram obtidas para as menores razões de H_1/L_1 . Também foi observado que a diminuição de S levou a um aumento da massa de água máxima que entra no reservatório (m_m) e da razão H_1/L_1 ótima, $(H_1/L_1)_o$.

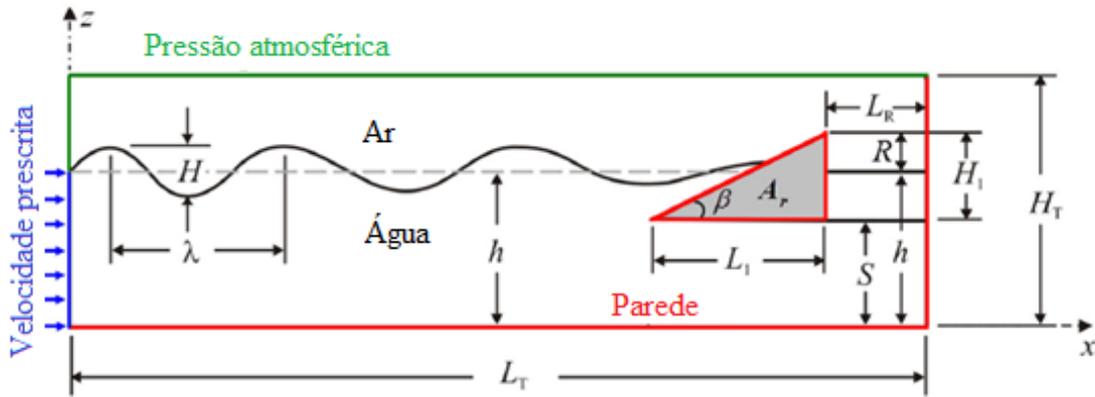


Figura 1.8 – Dispositivo de galgamento em escala real com dois graus de liberdades (Goulart et al., 2015).

Machado (2016), propôs dois estudos numéricos sobre princípio operacional de um dispositivo de galgamento em um domínio tridimensional. O objetivo dos estudos foi a aplicação do método Design Construtal na definição da melhor forma para a rampa do dispositivo, de modo a maximizar a massa de água captada pelo reservatório, conduzindo a uma maior geração de energia elétrica. O grau de liberdade b/B (Fig. 1.9), isto é, a razão entre a base inferior e a base superior da rampa trapezoidal, foi otimizado, mantendo-se fixos a área total do canal de ondas, a área da rampa e as características da onda. Os resultados mostraram que houve uma razão ótima $(b/B)_o = 0,43$, que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório para o primeiro caso estudado. Já para o segundo estudo, as características da onda regular empregada estavam em escala real e os resultados mostraram que houve uma razão ótima $(b/B)_o = 0,38$, que maximiza a quantidade de água que entra no reservatório. Em ambos os casos, a razão ótima foi encontrada para o extremo inferior do grau de liberdade, além dos resultados apontarem um aumento significativo na massa admitida no reservatório e, por consequente, um maior aproveitamento das ondas incidentes.

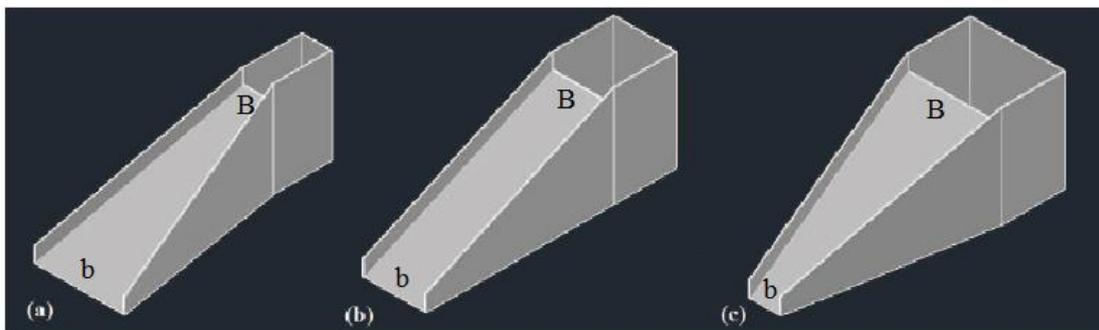


Figura 1.9 – Ilustração das variações sofridas pela geometria do dispositivo de galgamento ao longo do processo de otimização geométrica: a) $b/B < 1$, b) $b/B = 1$, c) $b/B > 1$ (Machado, 2016).

Liu et al. (2017) realizaram experimentos de um protótipo conversor de energia do tipo galgamento composto por rampa circular (CROWN) acoplada a um reservatório com escala reduzida, em um canal de ondas na *Ocean University of China*. Foram analisados parâmetros geométricos do dispositivo como declive da rampa, efeitos da crista livre e palhetas-guia, sobre a taxa volumétrica de água captada pelo reservatório. Os resultados demonstraram que um bordo livre de crista grande é mais significativo nas distribuições de descargas do que um bordo de crista pequena. As palhetas-guias melhoraram os efeitos das inclinações da rampa sobre a descarga de água no reservatório para menores comprimentos de onda e alturas relativas. Através da Fig. 1.10 é possível observar o modelo físico do dispositivo.

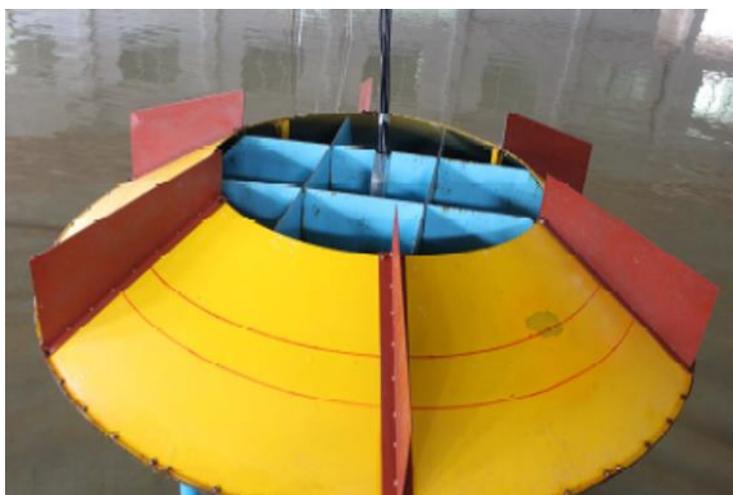


Figura 1.10 – Modelo físico do CROWN (Liu et al., 2017).

Em Martins et al. (2018) os autores empregaram o Design Construtal para avaliar numericamente a influência da configuração geométrica sobre o desempenho de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real. Mais precisamente, avaliou-se o efeito da inclinação da rampa e da submersão do dispositivo sobre sua potência disponível. Também foram consideradas três áreas diferentes para a rampa (restrição do problema) permitindo investigar a influência da área de construção da rampa sobre o design da mesma, bem como a incidência de duas condições de ondas monocromáticas diferentes. Os resultados mostraram que, para magnitudes fixas de submersão, o melhor desempenho foi alcançado para as menores magnitudes de declive da rampa. Além disso, para algumas áreas fracionárias, as submersões intermediárias levaram ao melhor desempenho.

Estudos recentes integrando conversores do tipo galgamento em estrutura de quebra-mar vêm sendo desenvolvidos. Em Han et al. (2018) os autores avaliaram através de um estudo numérico,

o desempenho de um dispositivo conversor de energia das ondas do tipo galgamento integrado a um quebra-mar de vários níveis, MOBREC (*Multi-level Overtopping Break-water for Energy Conversion*), composto por dois reservatórios com paredes inclinadas em diferentes níveis, conforme ilustrado na Fig. 1.11. Comportamentos de onda sobre vários estágios de inclinação das paredes são comparados com os resultados de laboratório. A variação do nível da água no reservatório e o tempo médio das descargas são validadas pelos dados experimentais. Efeitos de vários parâmetros de forma, incluindo os ângulos das rampas, largura da abertura do reservatório inferior e a altura do espaço entre os reservatórios, foram investigados. Os resultados apontaram que larguras maiores de abertura do reservatório inferior, exercem efeitos mais significativos, principalmente para as condições menores de altura da onda. Os ângulos inclinados de $\alpha = 30^\circ$ e $\beta = 30^\circ$ obtiveram o maior desempenho na descarga de água no topo da rampa. A diferença mais alta do dispositivo exerce efeitos significativos somente quando a largura de abertura do reservatório inferior é adequadamente pequena. As descargas no galgamento do reservatório inferior aumentam com o aumento da proporção da altura.

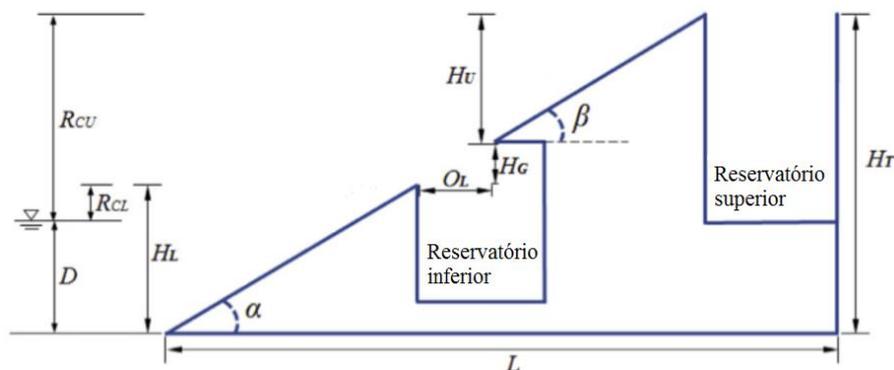


Figura 1.11 – Esquema conceitual do MOBREC (Han et al., 2018).

Contestabile et al. (2020) fizeram uma revisão abrangente dos estudos de pesquisa do OBREC (*Overtopping Breakwater for Energy Conversion*) dos últimos dez anos. O protótipo OBREC é uma estrutura de cobertura que é integrada a um quebra-mar tradicional, conforme ilustrado na Fig.1.12, para converter energia das ondas em eletricidade. Uma investigação do modelo físico foi realizada no laboratório de engenharia hidráulica e costeira de *Aalborg University* (Dinamarca) em 2012 com o objetivo de comparar os desempenhos hidráulicos exibidos pelo OBREC com os quebra-mares tradicionais. Os experimentos mostraram que essa integração melhorou o desempenho hidráulico em geral. Dando continuidade aos testes, em 2014 foi analisado o desempenho variando a

geometria de alguns componentes e em 2015 buscou-se avaliar uma primeira estimativa dos efeitos 3D nas descargas de sobreposição, monitorando o desempenho energético quando uma única sala de máquinas estava operando com diferentes comprimentos de reservatório. Logo, foi desenvolvido um modelo numérico e comparado com os resultados de laboratório medidos em 2014, definindo então uma configuração ótima do OBREC, considerando os parâmetros de segurança e construção. Em 2015, o protótipo OBREC foi construído no meio do quebra-mar San Vincenzo, no porto de Nápoles, Itália. Seu monitoramento iniciou em 2016, visando garantir a entrada em operação do sistema como um todo. As medições de ondas *in situ* foram essenciais para o projeto, planejamento operacional e de construção, bem como para o monitoramento de teste de campo de dispositivos WEC. O estudo concluiu que o desafio mais relevante para o OBREC é um design economicamente competitivo, adotando estruturas convencionais e com benefício na produção de energia. Monitoramento do campo de ondas do protótipo em grande escala, juntamente com simulações numéricas em ambos modelos e escala de protótipo, forneceram uma estimativa mais precisa do desempenho hidráulico e da confiabilidade estrutural, bem como em termos de produção de energia. O OBREC trabalha com um amplo espectro de diferentes condições de ondas incidentes e níveis de água. O dispositivo tende a brilhar especialmente em clima de ondas amenas e ruins. Os valores significativamente baixos da eletricidade produzida não trazem honra à potencialidade do OBREC, devido à forte limitação do sistema de tomada de força, a desenvolvimento do qual permanece o foco central para o sucesso da tecnologia. A eficiência do galgamento, de fato, pode exceder 20%, mas o estudo destaca a potência convertida na turbina e a baixa queda da tecnologia de hidro-turbinas como a principal desvantagem no desenvolvimento do OBREC.

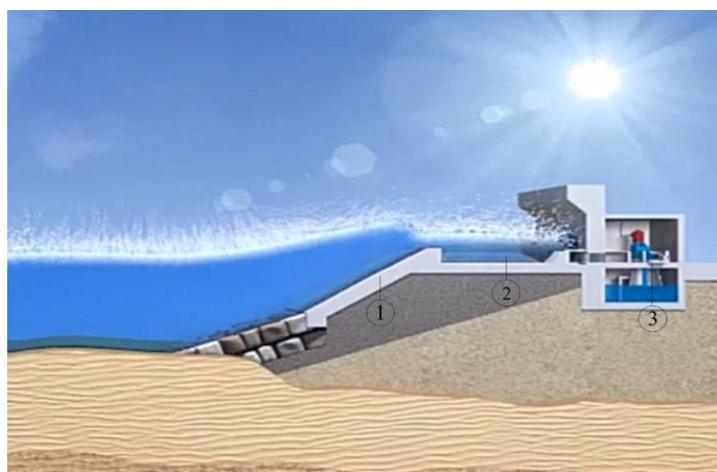


Figura 1.12 – Esboço do princípio de funcionamento do OBREC, mostrando: 1) a rampa de cobertura, 2) o reservatório e 3) a turbina dentro da sala de máquinas (Contestabile et al., 2020).

Lauro et al. (2020) analisaram o desempenho hidráulico e a estabilidade de um quebra-mar vertical com um dispositivo de gálgamento acoplado em seu topo. A tecnologia consiste em uma estrutura de concreto com rampa frontal capaz de capturar e coletar parte da energia de ondas incidentes que ultrapassem a rampa inclinada, conforme ilustrado na Fig. 1.13. A análise da estrutura é realizada através de simulações numéricas baseadas nas equações de Navier-Stokes médias no tempo (médias de Reynolds). As simulações numéricas são realizadas para comparar o desempenho da estrutura sob a ação de ondas irregulares, em termos de reflexão de ondas, o gálgamento e as forças de atuação das ondas. Os resultados mostram que os coeficientes de reflexão são inferiores aos calculados em frente ao quebra-mar tradicional, com redução de até 40%. Em relação ao gálgamento, os resultados da descarga média e cumulativa na região da turbina do quebra-mar inovador indicam que depende significativamente da distância entre a parede de recuo e a face vertical frontal da estrutura. Em detalhes, o aumento dessa distância, reduz o gálgamento para todas as condições de ondas incidentes analisadas. Por fim, a análise das forças indica que a geometria não convencional do quebra-mar inovador aumenta a estabilidade geral da estrutura.

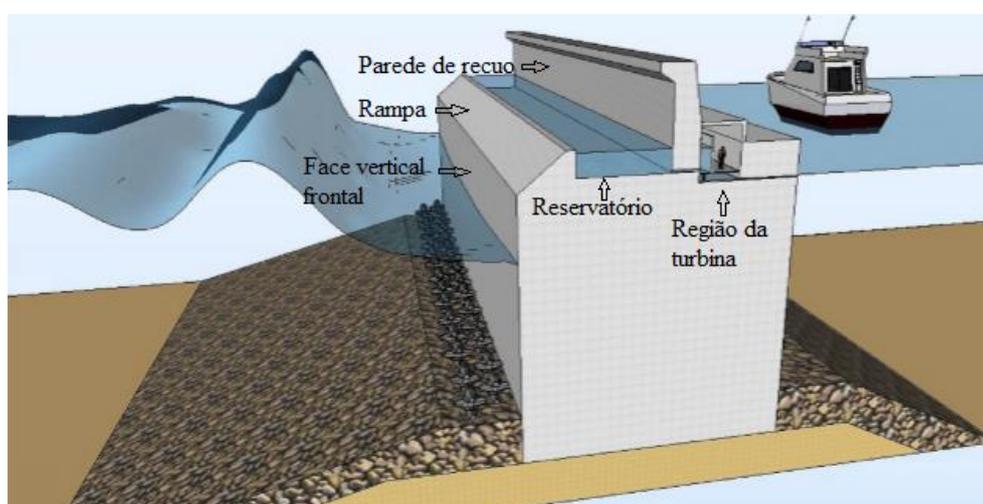


Figura 1.13 – Projeto conceitual do quebra-mar vertical inovador (Lauro et al., 2020).

Apesar dos diversos trabalhos encontrados na literatura, nenhum dos estudos realizados realizou uma investigação criteriosa do efeito da geometria de obstáculos posicionados no leito do mar sobre a quantidade de água gálgada na rampa de um dispositivo de gálgamento. Além disso, poucos trabalhos têm usado o Design Construtal para a investigação do design nesse tipo de dispositivo. Dessa forma, a aplicação do Design Construtal para a avaliação do design em um obstáculo trapezoidal anexo ao dispositivo de gálgamento é uma contribuição inédita na literatura.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

O presente trabalho numérico tem por objetivo avaliar a geometria de um obstáculo trapezoidal colocado no fundo de um canal de ondas em escala real, acoplado a um dispositivo conversor de energia do tipo galgamento, por meio do método Design Construtal associado ao mecanismo de busca.

1.3.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Considerando-se um canal bidimensional com um dispositivo *onshore* submetido à incidência de onda monocromática, avaliar a influência da razão entre a base inferior e superior do obstáculo trapezoidal (L_1/L_2) e a influência da razão entre a altura e o comprimento da rampa (H_3/L_3) sobre a massa de água que entra no reservatório do dispositivo,

- Acoplar um obstáculo trapezoidal posicionado no fundo do canal de ondas a um modelo numérico bidimensional para simular o princípio operacional do conjunto dispositivo/obstáculo,

- Analisar o efeito da razão L_1/L_2 (comprimento da base inferior pelo comprimento da base superior) de um obstáculo trapezoidal acoplado a um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real sobre a massa de água galgada no reservatório do dispositivo,

- Analisar o efeito da razão H_3/L_3 (altura sobre comprimento da rampa) sobre a massa de água uma vez maximizada que entra no reservatório do dispositivo,

- Analisar o efeito da razão H_3/L_3 sobre a razão L_1/L_2 uma vez otimizada, $(L_1/L_2)_o$, sobre a massa de água uma vez maximizada (m_m),

- Comparar o desempenho do dispositivo com e sem o obstáculo acoplado à rampa do dispositivo de galgamento.

2. FUNDAMENTOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

2.1. Introdução à Energia das Ondas

No oceano ocorrem diversos tipos de movimentos em diferentes escalas de tempo e espaço, associados a fenômenos atmosféricos e astronômicos, os quais originam ondas com períodos que variam na escala de segundos a meses (Holthuijsen, 2007).

Segundo Dean e Dalrymple (1991), a energia total em uma onda é a combinação da energia potencial, devido ao deslocamento vertical da superfície da água, com a energia cinética, devido ao movimento oscilatório da onda. Uma vez criadas, as ondas podem viajar milhares de quilômetros no alto mar praticamente sem perdas de energia. Em regiões costeiras a densidade de energia presente nas ondas diminui devido à interação com o fundo do mar. A potência de uma onda é proporcional ao quadrado da sua amplitude e ao seu período. Ondas de elevada amplitude (cerca de 2 m) e de período elevado (7 a 10 s) excedem normalmente os 50 kW/m de frente de onda.

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

2.2. Teoria das Ondas

2.2.1. Como as Ondas se Formam

A geração das ondas se dá através da ação do vento que surge como resultado do aquecimento da Terra pelo sol. O aquecimento da Terra pelo sol não ocorre de forma uniforme devido ao seu formato irregular. Normalmente, alguns pontos ficam mais aquecidos que outros. À medida que parte do ar se aquece, ele se torna menos denso e, com isso, torna-se mais leve, deslocando-se para cima. Isso gera espaço disponível para ar mais denso e frio, que pode escoar 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 (Cruz e Sarmiento, 2004).

A propagação das ondas está diretamente relacionada com a profundidade do corpo d'água. Nos oceanos, as ondas se propagam livremente em águas profundas sem interagir com a geometria da topografia submarina. No entanto, conforme a profundidade reduz, a influência do fundo se torna um fator considerável, causando uma redução significativa da velocidade de propagação do trem de ondas. Entrando em zonas rasas, a onda sofre o efeito de empolamento (aumento de sua altura) e então ocorre rebentação, com rápida dissipação de grandes quantidades de energia, e com emulsão de ar. Além da influência da profundidade, a presença de obstáculos, tais como: ilhas ou quebra-mares, podem ser responsáveis pela alteração de alguns dos principais parâmetros das ondas, como sua direção e a velocidade (Dean e Dalrymple, 1991).

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

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

Os modelos para descrição do comportamento de ondas podem ser classificados de acordo com teorias de ondas regulares e irregulares. 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, neste trabalho, utilizam-se as ondas regulares para o estudo numérico com a finalidade de determinar a melhor forma geométrica de uma estrutura acoplada à rampa principal de um dispositivo de galgamento. Na Figura 2.1, é possível observar as principais características das ondas regulares, bem como os elementos básicos de uma onda oceânica.

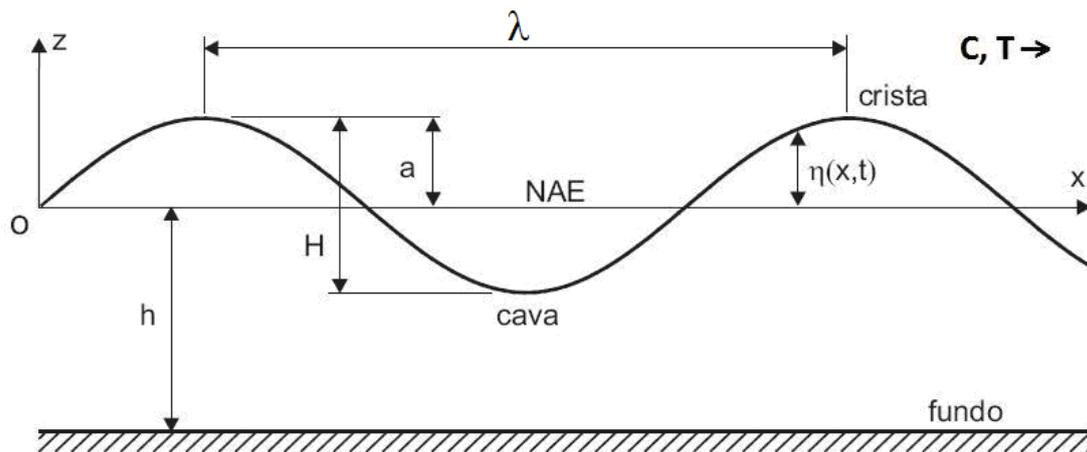


Figura 2.1 – Elementos de uma Onda (Dean e Dalrymple, 1991).

De acordo com a Fig. 2.1 (Dean e Dalrymple, 1991), os principais elementos de uma onda regular são:

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

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

São encontradas na literatura, diversas teorias de ondas já desenvolvidas, as quais podem ser aplicadas para diferentes casos, levando-se em consideração as condições ambientais. Para se determinar a teoria a ser utilizada, deve-se levar em consideração os fatores de altura da onda (H), o comprimento da onda (λ) e a profundidade da água (h). Esses fatores são geralmente compostos pelos seguintes parâmetros adimensionais:

- Declividade $\left(\frac{H}{\lambda}\right)$
- Profundidade relativa $\left(\frac{h}{\lambda}\right)$
- Altura de onda relativa $\left(\frac{H}{h}\right)$
- 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 (Dean e Dalrymple, 1991).

Ainda segundo Dean e Dalrymple (1991), 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.

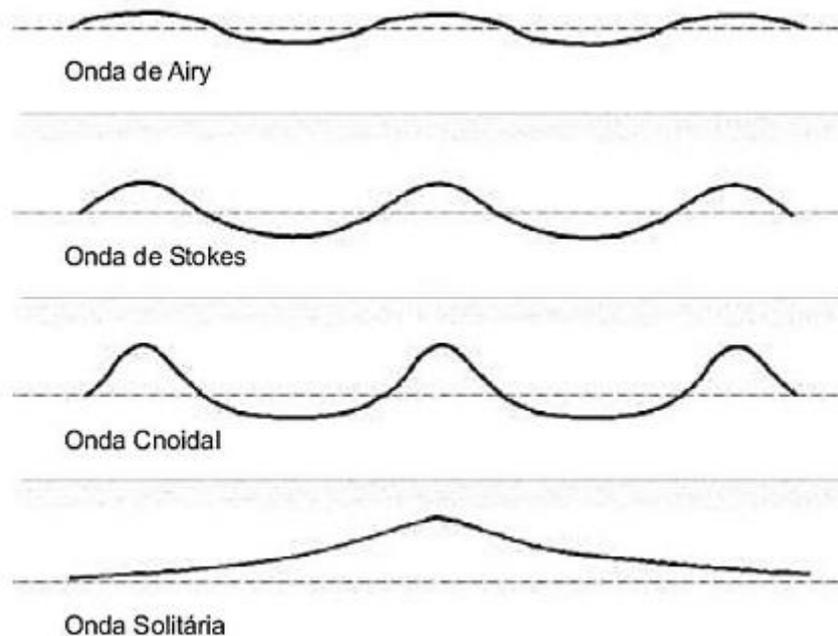


Figura 2.2 – Teoria das ondas (Dean e Dalrymple, 1991).

Ainda segundo Dean e Dalrymple (1991), a solução de Stokes é válida quando $k \cdot h < 1$ 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, conforme número de Ursell. 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 canais numéricos para simular o efeito de um gerador de ondas, simulando o efeito do escoamento no mar.

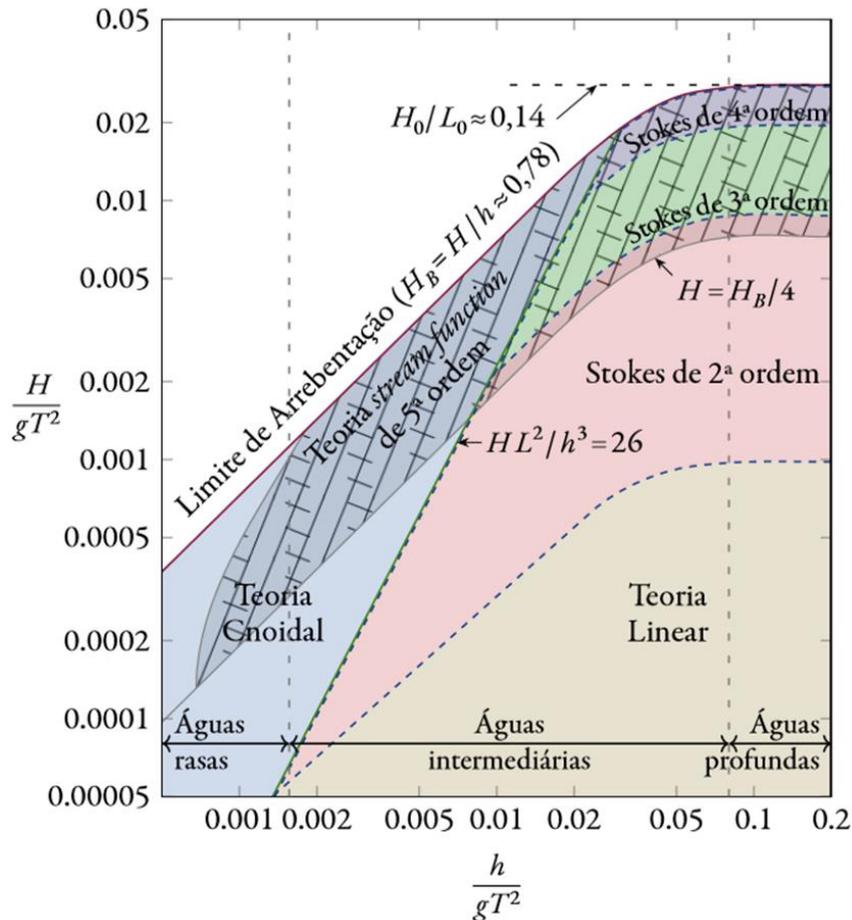


Figura 2.3 – Aplicabilidade das teorias de ondas (Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991).

Considerando as características da onda empregada nesse trabalho ($T = 7.5$ s, $\lambda = 64.5$ m, $H = 1.0$ m e $h = 10.0$ m) as mesmas possuem uma melhor descrição através da Teoria de Stokes de 2ª ordem.

2.2.2. Teoria de Stokes de 2ª Ordem

Conforme McCormick (2010), em 1847, a teoria de Stokes proposta foi desenvolvida para modelar ondas não-lineares. Para obtenção das equações resultantes dessa teoria, o escoamento é considerado irrotacional e incompressível. Considerando que as propriedades da onda podem ser representadas por uma série de perturbações, admite-se que uma onda não-linear seja composta pela superposição de ondas lineares. Portanto, quanto maior for o número de termos incluídos na série, melhor será a aproximação das propriedades da onda.

A teoria de Stokes de 2ª ordem foi empregada no presente estudo, pois assim é possível obter uma representação mais próxima das ondas reais, permitindo a análise de ondas mais altas em

profundidades mais rasas. Para essa teoria, as expressões do potencial de velocidades e do deslocamento da superfície livre são dadas, respectivamente, por Chakrabarti (2005):

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

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

Derivando a Eq. (2.2) em relação a x e z , são definidos os respectivos componentes da velocidade (Chakrabarti, 2005):

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

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

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

2.3. Equipamentos de Conversão de Energia das Ondas

Segundo Cruz e Sarmiento (2004), após pesquisas e desenvolvimentos, existem três classificações de tecnologias que se assemelham, através da potência dos dispositivos, a outras tecnologias de extração de fontes renováveis de energia. Estas são classificadas quanto à profundidade de instalação em relação à costa, podendo ser:

- i. dispositivos costeiros (*shoreline* ou *onshore*),
- ii. dispositivos próximos da costa (*near-shore*),
- iii. dispositivos afastados da costa (*offshore*).

A classificação de acordo com a localização do dispositivo com relação à costa é ilustrada na Fig. 2.4.

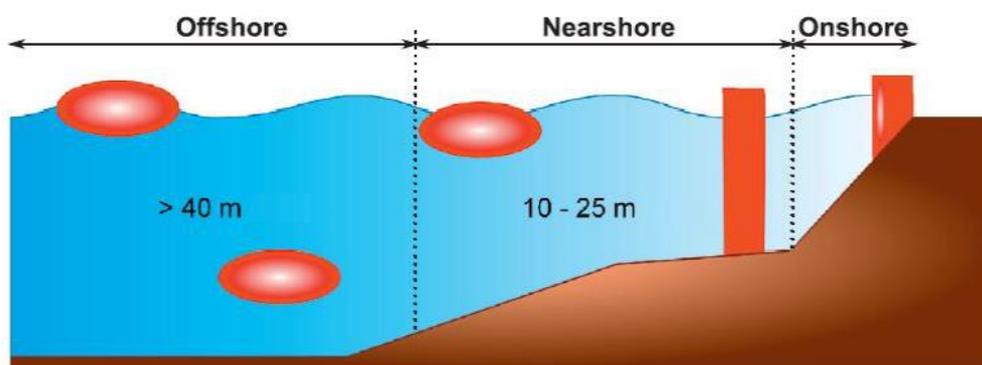


Figura 2.4 – Instalação dos dispositivos conversores de energia das ondas (López et al., 2013).

Os dispositivos costeiros (*shoreline* ou *onshore*), também chamados de dispositivos de primeira geração, são acessados por terra, possuindo então mais praticidade para sua construção, instalação e manutenção. Além disso, os dispositivos costeiros podem localizar-se junto aos centros consumidores, o que gera menos perda na transmissão da energia gerada. Contudo, seu potencial energético é menor, uma vez que as ondas que chegam à costa interagem com o leito oceânico tendo sua energia diminuída. Também possuem dificuldades referentes à conservação da fauna e flora da costa, causando algum impacto ambiental (Paredes, 2008).

Os dispositivos próximos da costa (*near-shore*) ou de segunda geração, ainda segundo Paredes (2008), aproveitam algumas vantagens das instalações sobre a costa, como a distância razoável para transporte e distribuição da energia produzida, estando localizadas em uma região de maior potencial de ondas. Em função de sua distância em relação à costa, ainda apresentam alguns problemas com relação a impactos ambientais.

Já os dispositivos afastados da costa (*offshore*), também chamados de terceira geração, aproveitam os altos potenciais de energia presente nas ondas de mar aberto. Porém, possuem dificuldades não apenas de acesso à instalação e manutenção, mas também na grande distância para distribuição da energia gerada, fazendo com que os custos envolvidos sejam de grande porte. Também podem apresentar problemas relativos à ancoragem e interferência com rotas de navegação (Paredes, 2008).

Cruz e Sarmiento (2004) também classificaram os dispositivos ao modo de conversão de energia das ondas em energia elétrica, destacando três classes principais de conversores, sendo estes:

- i. Coluna d'Água Oscilante (*Oscillating Water Column - OWC*),
- ii. Corpos Flutuantes/Oscilantes (*Oscillating Devices*),
- iii. Galgamento (*Overtopping Devices*).

A Figura 2.5 apresenta a classificação de conversores de energia das ondas conforme princípio de funcionamento.

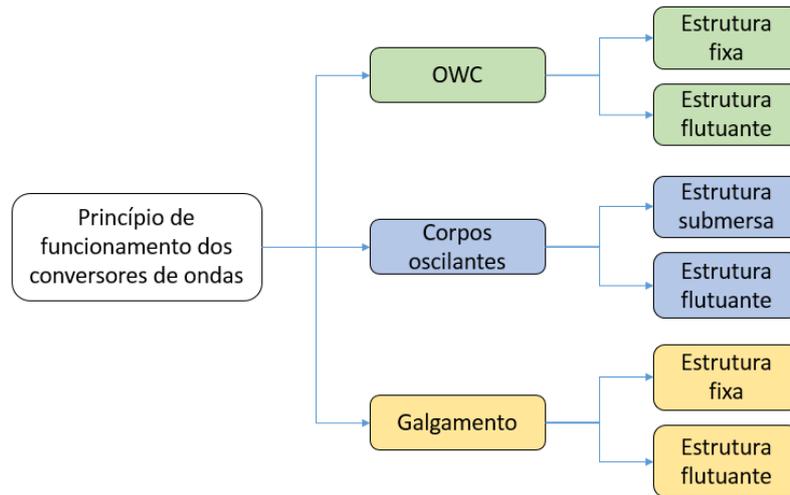


Figura 2.5 – Tecnologias de conversores de energia das ondas (Adaptado de Martins, 2016).

2.3.1. Dispositivo de Galgamento

O princípio operacional do dispositivo de galgamento, escopo do presente trabalho, consiste no acúmulo de água em um reservatório instalado acima do nível do mar (Fig. 2.6). A água da onda galga uma rampa inclinada acoplada a um reservatório, enchendo-o. A água acumulada no reservatório retorna ao mar passando por uma área menor onde uma turbina hidráulica de baixa queda é instalada, assim, possibilitando a geração de eletricidade (Tedd e Kofoed, 2009).

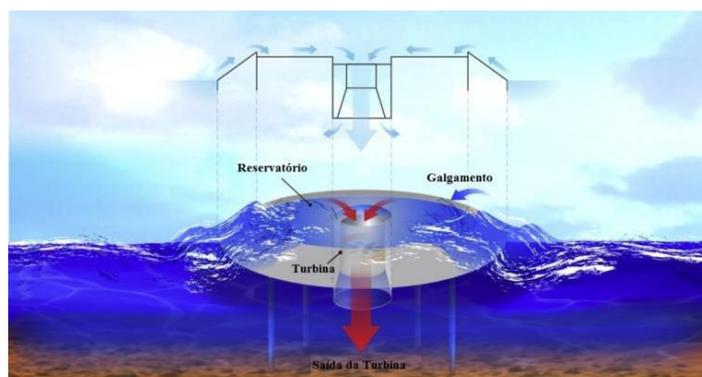


Figura 2.6 – Princípio de funcionamento do galgamento (Adaptado de Li e Yu, 2012).

Um dispositivo já construído é apresentado na literatura, o *Tapchan* (Pereira, 2010), desenvolvido na Noruega nos anos 80. Um protótipo com potência nominal de 350 kW foi construído em 1985 em Toftestallen e operado por vários anos. Tal aparato compreende um coletor, um conversor, um reservatório de água e uma turbina de baixa pressão. O coletor em forma de cone serve para concentrar as ondas antes de entrarem no conversor. As ondas entram na extremidade larga do canal e, à medida que se propagam pelo canal de estreitamento, a altura da onda é ampliada até que as cristas de onda se espalhem sobre as paredes e preencham o reservatório. Como resultado, a energia cinética é gradualmente transformada em energia potencial no reservatório e, desta forma, a turbina de fluxo axial, geralmente tipo Kaplan convencional, é alimentada (D'Egmont, 2017). A Figura 2.7 ilustra o esquema de funcionamento e a imagem real do dispositivo.

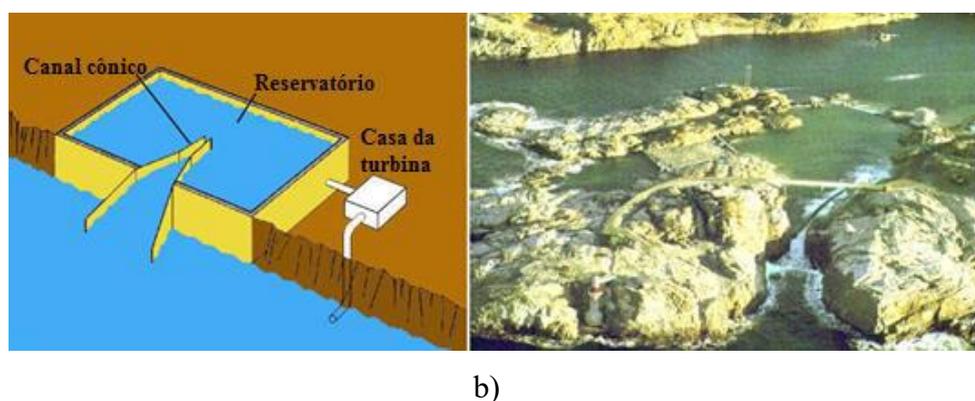


Figura 2.7 – Dispositivo *Tapchan*: a) Ilustração do esquema de funcionamento, b) imagem real do equipamento (Pereira, 2010).

Alguns dispositivos se encontram em testes em alto mar, tais como: *Wave Dragon*, *Wave Plane* e o *Seawave Slot-Cone Generator*.

2.3.1.1. *Wave Dragon*

O *Wave Dragon* é uma tecnologia de larga escala para a geração de eletricidade a partir da energia das ondas do oceano. Inventado por Erik Friis-Madsen, foi desenvolvido com o apoio financeiro da União Europeia, da Agência de Desenvolvimento do País de Gales, da Autoridade de Energia dinamarquesa e do Programa PSO de serviços públicos da Dinamarca.

A quantidade de energia captada pelo dispositivo se dá através de pás refletoras montadas em ambos os lados do reservatório, que canalizam as ondas em direção à rampa central. O dispositivo está frouxamente ancorado para permitir que ele se posicione na direção principal da onda. A água

então captada pelo reservatório, escoada pela ação da gravidade, passando por turbinas hidráulicas de baixa queda situadas na sua região central, produzindo assim energia elétrica (Rosa, 2008).

Um protótipo em escala real foi instalado no mar em 2003 (Fig. 2.8) e considerado o primeiro dispositivo de energia de ondas *offshore* conectado à rede do mundo. Esta unidade de teste forneceu eletricidade à rede por mais de 20.000 horas (um recorde mundial). No momento, está sendo solicitado um projeto de demonstração de 7 MW no País de Gales e os preparativos estão em andamento para uma matriz de 50 MW em Portugal.



Figura 2.8 – Protótipo *Wave Dragon* em testes no mar (Extraída de <https://www.copybook.com/img/pgib4354s7214/wave-dragon-wave-energy-converter.jpg?v=1509463589>. Acesso em 21/05/2020).

2.3.1.2. *Wave Plane*

O *Wave Plane*, criado na Dinamarca, também possui o galgamento como princípio de funcionamento. Sua instalação pode ser feita em regiões próximas ou distantes da costa. Trata-se de um dispositivo simples de conversão de energia das ondas em energia elétrica.

O dispositivo tem sido desenvolvido desde 1990 (Fig. 2.9), através de um conceito criado por Erick Skaarup. O primeiro teste ocorreu na Irlanda em 1996 na *University College Cork*. Já o seu primeiro protótipo, localizado no *Grenaa Píer*, ficou pronto em 2008.



Figura 2.9 – Dispositivo *Wave Plane* (López et al., 2013).

2.3.1.3. *Seawave Slot-Cone Generator – SSG*

O *Seawave Slot-Cone Generator* (SSG), Fig. 2.10, é um conversor do tipo galgamento desenvolvido pela *Wave Energy*, na Noruega. Este dispositivo tem a vantagem de instalação em qualquer localização (*onshore*, *nearshore* ou *offshore*). No caso de aplicação em terra, ele atua também como um dispositivo quebra-mar.



Figura 2.10 – Princípio de funcionamento do SSG (Extraída de <http://newinscience.blogspot.com/2008/04/sea-wave-slot-cone-generator.html>. Acesso em 21/05/2020).

O SSG é constituído por três reservatórios de água em diferentes níveis e uma turbina de múltiplos estágios (Fig. 2.11). Quando há incidência da onda, a água sobe a estrutura e é armazenada temporariamente nestes reservatórios, o que significa que a energia potencial da onda é armazenada. A partir disto, a turbina é acionada. Segundo Margueritini e Frigaard (2007), a presença de uma turbina de múltiplos estágios é justificada pelo fato da mesma ter uma maior eficiência quando comparada a uma turbina de único estágio. Uma grande vantagem deste conversor, além do fato do mesmo ser extremamente robusto e também possuir apenas uma turbina como parte móvel, é o fato de que a maior parte da estrutura fica submersa. Isto significa que o equipamento possui um grande

nível de sobrevivência em mau tempo, já que em caso de grandes ondas, as mesmas devem passar por cima do conversor, não causando estragos.



Figura 2.11 – Dispositivo *Seawave Slot-Cone Generator* (Vicinanza et al., 2012).

3. FUNDAMENTOS DO DESIGN CONSTRUTAL

3.1. Introdução à Teoria Construtal

Em meados da década de 90, Adrian Bejan teve uma percepção de que o mundo não era formado por acidentes aleatórios, acaso e destino, mas que por trás da diversidade da natureza existia designs em sistemas de fluxo/escoamento com padrões previsíveis. Surge assim a Teoria Construtal, a qual descreve que os sistemas de escoamento da natureza seguem um princípio físico para a geração de suas configurações e padrões geométricos (Bejan, 2000).

O princípio físico que conduz à formação determinística da forma e estrutura em sistemas de escoamento é denominado de Lei Construtal, que afirma que para um determinado sistema de dimensões finitas persistir ao longo do tempo (sobreviver) sua configuração geométrica (forma e estrutura) deve evoluir livremente de forma a facilitar o acesso das correntes que fluem através deste sistema (Bejan e Lorente, 2008). Esse não é apenas um princípio físico no qual a forma geométrica e a estrutura são deduzidas e que serve 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/escoamento, desde problemas de mecânica dos fluidos e transferência de calor a problemas de mecânica dos sólidos (Bejan e Lorente, 2006a).

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

Alguns exemplos de sistemas que se moldam para melhor conduzir seu sistema de escoamento são encontrados na natureza, como a ramificação dos vasos sanguíneos nos pulmões de um corpo humano, que é necessária para que o sangue oxigenado chegue aos demais órgãos. Assim como 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 (Bejan, 2016).

3.2. O método Design Construtal

A Teoria Construtal surgiu em meados da década de 90 através de estudos de Adrian Bejan sobre uma lei da física que descreve que os sistemas de escoamento da natureza seguem um princípio físico na geração de seus padrões geométricos e de suas configurações.

Uma lei da Física é uma declaração concisa que resume um fenômeno que ocorre na natureza. O campo da Lei Construtal iniciou a partir da constatação de que o "Design" é um fenômeno físico universal. Ela une o animado com o inanimado, através de uma ampla gama de escalas: do design em árvore e flocos de neve ao design animal e ao design em árvore da bacia do rio Amazonas (Bejan e Lorente, 2013).

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

A Teoria Construtal, segundo Bejan e Lorente (2008), explica como a geração de estruturas submetidas a alguma espécie de escoamento 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 de acesso aos escoamentos no decorrer do tempo. Este princípio é a Lei Construtal, que afirma que para um determinado sistema finito persistir ao longo do tempo (sobreviver) sua configuração geométrica deve evoluir de forma a facilitar o acesso das correntes que fluem/escoam através deste sistema.

Em uma análise global dos fluxos/escoamentos que ocorrem na natureza, é possível constatar que todos seguem uma tendência universal de sistemas abertos. Isso ocorre para melhorar ou maximizar os acessos ou diminuir as resistências ao fluxo/escoamento (alguns exemplos podem ser observados na Fig. 3.1. O responsável por apresentar esta tendência da natureza é a Lei Construtal e, com isso, permite obter uma melhor condição de fluxo/escoamento. Usando essa lei é possível projetar processos de forma organizada e dinâmica para obter melhores ou mais eficientes resultados (Bejan e Zane, 2012).

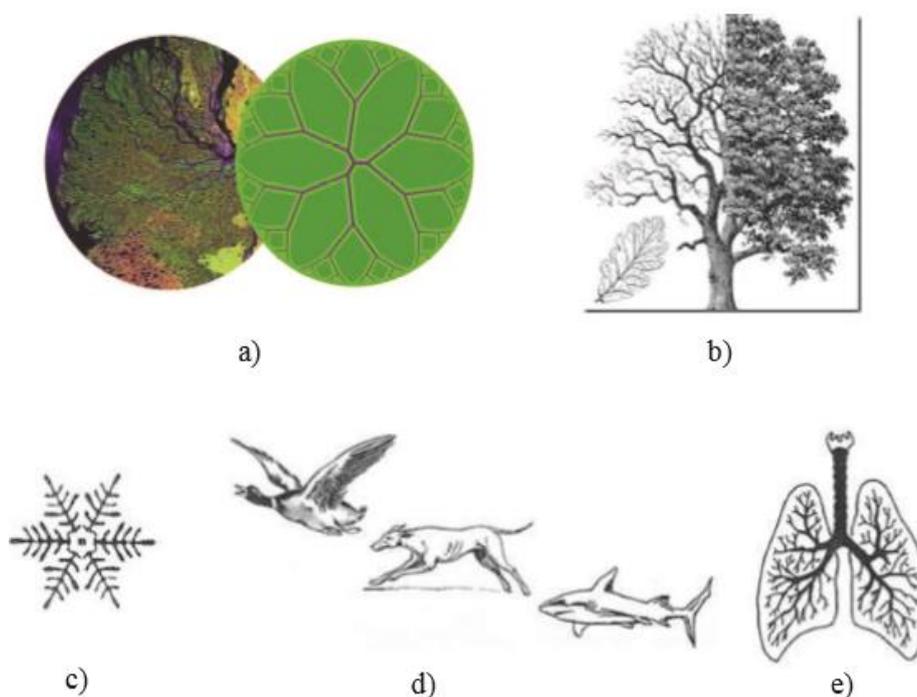


Figura 3.1 – Exemplos de aplicação da Lei Construtal: a) rios, b) árvores, c) floco de neve, d) animais, e) pulmão (Bejan, 2000).

Segundo Bejan (2000), o Design Construtal é um método empregado na avaliação de formas geométricas de sistemas submetidos a alguma espécie de fluxo/escoamento, segundo o qual o fluxo/escoamento 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. Para aplicar o Design Construtal no estudo geométrico de um sistema físico é necessário, basicamente, determinar um indicador de performance (uma grandeza a ser maximizada ou minimizada: vazão mássica, potência, energia e etc.), graus de liberdade (parâmetros geométricos que serão variados, respeitando as restrições) e restrições geométricas (parâmetros que são mantidos constantes). No trabalho de Rocha et al. (2017) é apresentada a versão original do fluxograma do método Design Construtal. Contudo, ao longo do tempo, este sofreu algumas modificações incorporando a associação com métodos de otimização, chegando à configuração apresentada no presente trabalho. A Figura 3.2 apresenta as etapas de aplicação do método.

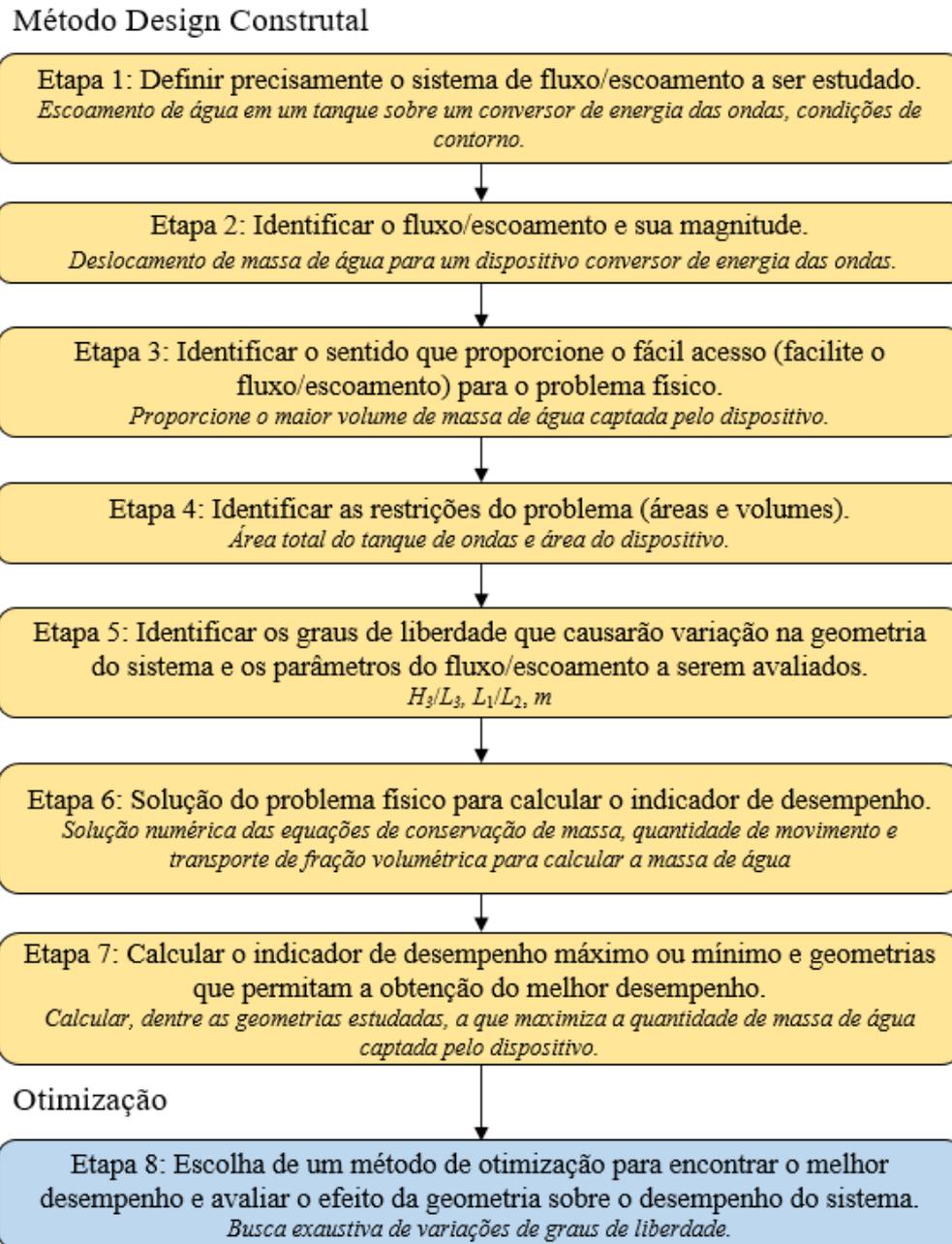


Figura 3.2 – Etapas de aplicação do método Design Construtal e Busca Exaustiva.

A aplicação do método é uma ferramenta de análise que vem ganhando um papel importante nos estudos de avaliação geométrica de dispositivos conversores de energia das ondas. No trabalho em estudo, o método Design Construtal foi aplicado na análise geométrica de um obstáculo acoplado à rampa de um dispositivo do tipo galgamento, a fim de avaliar sua influência em relação ao desempenho do dispositivo.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA

4.1. Domínio Computacional

O problema físico consiste em um canal de onda bidimensional com um obstáculo trapezoidal colocado no fundo acoplado a um modelo numérico bidimensional de um dispositivo de galgamento, como pode ser visto na Fig. 4.1. A geração de ondas é causada pela imposição de perfis de velocidade (definido com teoria de Stokes de 2ª ordem) na superfície inferior esquerda do domínio computacional (linha vermelha). No lado superior esquerdo e superfícies superiores (linhas azuis) é imposta a condição de pressão atmosférica ($p_g = 0$ atm) e nas demais superfícies do canal (superfície inferior e direita) e do dispositivo, as velocidades são prescritas como nulas, ou seja, foi adotada condição de contorno de não deslizamento ou impermeabilidade (linhas verdes e rosas). Quanto às condições iniciais, considera-se que o escoamento está em repouso.

Em relação às dimensões do problema, considera-se uma camada de água de $h = 10$ m, altura e comprimento do canal de onda de $H_T = 20$ m e $L_T = 320$ m. A onda monocromática que se aproxima tem um comprimento de onda de $\lambda = 65.4$ m, um período de $T = 7.5$ s e altura de $H = 1,0$ m (parâmetros esses utilizados nos trabalhos de Goulart, 2014 e Martins, 2016). O problema possui três restrições de áreas: área total do canal de onda (A_T), fração de área dada pela razão entre a área de rampa (A_r) e a área total do canal ($\phi_r = A_r/A_T = 0.012$) e área do obstáculo colocado no fundo do canal (A_i). Além disso, são definidos os seguintes graus de liberdade: H_T/L_T , H_3/L_3 , H_1 (submersão) e L_1/L_2 . No presente trabalho a relação H_3/L_3 e L_1/L_2 são variadas, enquanto as demais proporções são mantidas constantes ($H_T/L_T = 0.625$ e $H_1 = 3.5$ m). A razão H_3/L_3 é testada para cinco valores, tendo como limite inferior $H_3/L_3 = 0.33$ que foi a razão ótima identificada no trabalho de Martins et al. (2018) e limite superior de $H_3/L_3 = 0.37$ (valores decimais acima impediram a entrada de água no reservatório, não ocorrendo o fenômeno de galgamento). Já a razão L_1/L_2 é variada na escala $0.0 \leq L_1/L_2 \leq 1.0$ (dez valores com incremento de $1/9$), onde a mais baixa relação representa um obstáculo triangular e a mais elevada retrata um obstáculo retangular. O principal objetivo do sistema de escoamento é maximizar a quantidade de massa de água que entra no reservatório ao longo de um período de $t = 100.0$ s.

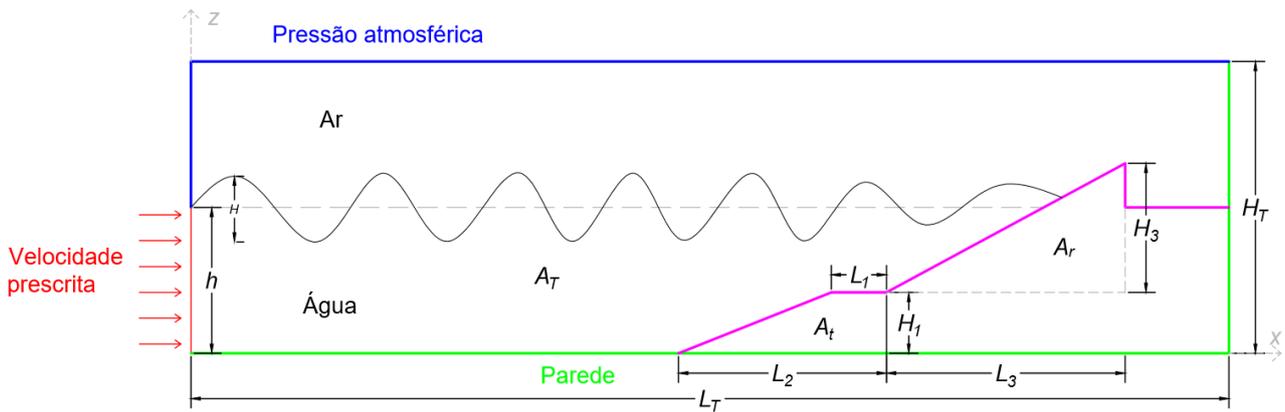


Figura 4.1 – Domínio computacional do canal de onda com o dispositivo de galgamento e obstáculo trapezoidal.

4.2. Aplicação do Design Construtal

A avaliação geométrica do problema estudado está sujeita a três restrições de área, sendo essas, a área total do canal de onda

$$A_T = H_T L_T \quad (3.1)$$

a área de restrição da rampa principal

$$A_r = \frac{H_3 L_3}{2} \quad (3.2)$$

e a área do obstáculo acoplado à rampa principal

$$A_t = \frac{(L_1 L_2) H_1}{2} \quad (3.3)$$

As Equações (3.2) e (3.3) podem ser reescritas como a fração de área do dispositivo

$$\varphi_r = \left(\frac{A_r}{A_T} \right) \quad (3.4)$$

$$\varphi_{obs} = \left(\frac{A_t}{A_T} \right) \quad (3.5)$$

Outra restrição considerada no problema é $(H_1 + H_3) > (h + H/2)$, garantindo assim que a crista da onda não seja superior à máxima altura do dispositivo.

A Figura 4.2 ilustra como é feito o processo de otimização por Busca Exaustiva.

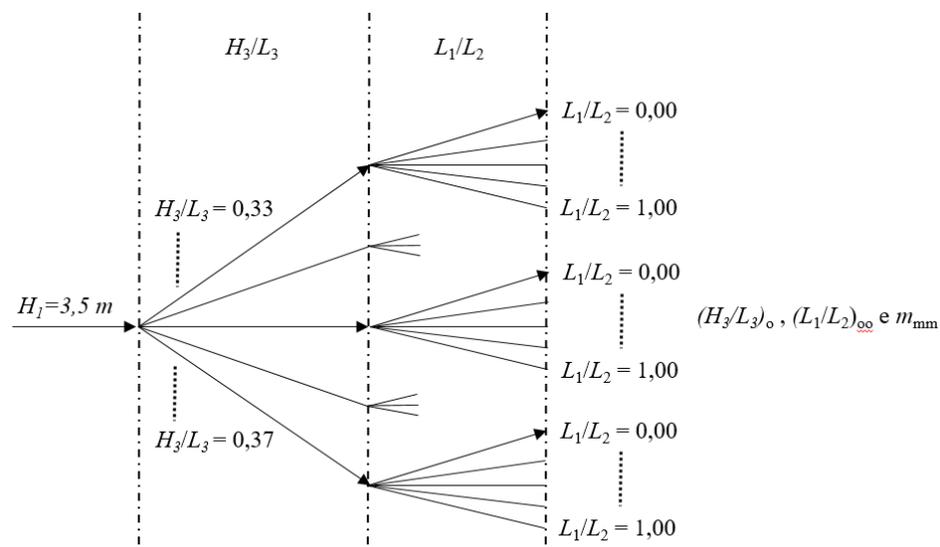


Figura 4.2 – Ilustração do processo de otimização aplicado ao dispositivo de galgamento variando dois graus de liberdade.

Foram simuladas dez razões de L_1/L_2 para cada razão de H_3/L_3 , totalizando cinquenta simulações, a fim de determinar a massa de água galgada no reservatório do dispositivo que será denominada massa de água duas vezes maximizada m_{mm} , a corresponde razão L_1/L_2 que será denominada a razão duas vezes otimizada ($(L_1/L_2)_{oo}$) e por fim, a correspondente razão H_3/L_3 que será denominada a razão uma vez otimizada ($(H_3/L_3)_o$).

A massa de água é determinada através da equação a seguir:

$$m = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \dot{m} dt \quad (3.6)$$

onde m (kg) é a massa de água acumulado no reservatório, t_f é referente ao intervalo de tempo (s) e \dot{m} (kgs⁻¹) é a vazão mássica.

4.3. Modelo *Volume of Fluid* - VOF

A simulação do canal de ondas foi realizada através do modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), Hirt e Nichols (1981), que possibilita representar dois ou mais fluidos imiscíveis resolvendo um único conjunto de equações de movimento, localizando a fração de volume de cada um dos fluidos ao longo do domínio. Para cada fase adicional acrescentada ao modelo, a fração volumétrica é calculada no volume. Em cada volume de controle, a soma da fração volumétrica de todas as fases é unitária. Os campos para todas as variáveis e propriedades são compartilhados pelas fases e representam valores médios calculados no volume, contanto que a fração volumétrica de cada uma das fases seja conhecida localmente. Assim, as variáveis e propriedades em um determinado volume representam uma das fases ou uma mistura de fases, dependendo dos valores da fração do volume.

A localização entre as fases é definida pela solução da equação da continuidade para a fração de uma ou mais fases.

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.7)$$

onde ρ é a massa específica da mistura (kg/m³) e \vec{v} é o vetor velocidade do escoamento (m/s).

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.8)$$

onde p é a pressão (N/m²), $\rho \vec{v}$ e \vec{F} são as forças de campo (empuxo) e forças externas ao corpo (N/m³), respectivamente. Neste trabalho, a única força de campo que atua sobre o escoamento é a força de empuxo, conseqüentemente o vetor de forças externas será desconsiderado. O termo $\bar{\tau}$ é o tensor taxa de deformação (N/m²), que para um fluido Newtoniano, é representado por:

$$\bar{\tau} = \mu[(\nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot \vec{v}^T)] \quad (3.9)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica (kg/(m.s)). O segundo termo do lado direito da Eq. (3.7) descreve as tensões desviadoras (N/m²) e está relacionado 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.

Como nas simulações deste estudo ocorrem duas diferentes fases, ar e água, 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 deve ser unitária ($0 \leq \alpha_q \leq 1$). Conseqüentemente, se $\alpha_{\text{água}} = 0$, o volume de controle está vazio de água e cheio de ar sendo $\alpha_{\text{ar}} = 1$. 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):

$$\frac{\partial(\rho\alpha_{\text{água}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\alpha_{\text{água}}\vec{v}) = 0 \quad (3.10)$$

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:

$$\rho = \alpha_{\text{água}}\rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}}\rho_{\text{ar}} \quad (3.11)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}}\mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}}\mu_{\text{ar}} \quad (3.12)$$

Com relação à geração de onda, um perfil de velocidades é imposto na superfície lateral esquerda do canal (Fig. 3.1), simulando o comportamento de um gerador de onda (Horko, 2007). Os componentes de velocidade na direção de propagação da onda (x) e na direção vertical (z), para o canal de entrada são baseados na teoria de Stokes de 2^a ordem e são dadas respectivamente por (Chakrabarti, 2005):

$$u(x, z) = \frac{Hgk \cosh k(h+z)}{2\sigma \cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3H^2 \sigma k \cosh 2k(h+z)}{16 \sinh^4 kh} \cos 2(kx - \sigma t) \quad (3.13)$$

$$w(x, z) = \frac{Hgk \sinh k(h+z)}{2\sigma \cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t) + \frac{3H^2 \sigma k \sinh 2k(h+z)}{16 \sinh^4 kh} \sin 2(kx - \sigma t) \quad (3.14)$$

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

4.4. Técnicas Numéricas

A discretização do domínio computacional foi realizada através do software Ansys Workbench® 14.0 e a solução do problema foi obtida com o emprego do pacote de dinâmica dos fluidos computacional Ansys, 2011, version 14.0 - Fluent User's Guide, Ansys Inc. 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* (Patankar, 1980). 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. Esta metodologia numérica foi adaptada a partir da metodologia validada em estudos anteriores, por exemplo, Gomes (2010), Lopes (2012), Machado (2012), Grimler (2013).

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

Um aspecto muito importante a ser considerado em simulações numéricas é o tipo de discretização espacial empregada 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 se trata 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).

4.5. Estudo de Convergência de Malha

Neste trabalho, foi realizado um teste de convergência de malha simulando quatro casos com diferente número de elementos, 19.000, 38.000, 76.000 e 152.000, e comparado com o cálculo da onda gerada analiticamente. A malha das ondas geradas numericamente, é formada por retângulos e quadriláteros regulares. Foi utilizado um passo de tempo de $t = 0.02$ s. Na Figura 4.3 é possível analisar o resultado do teste.

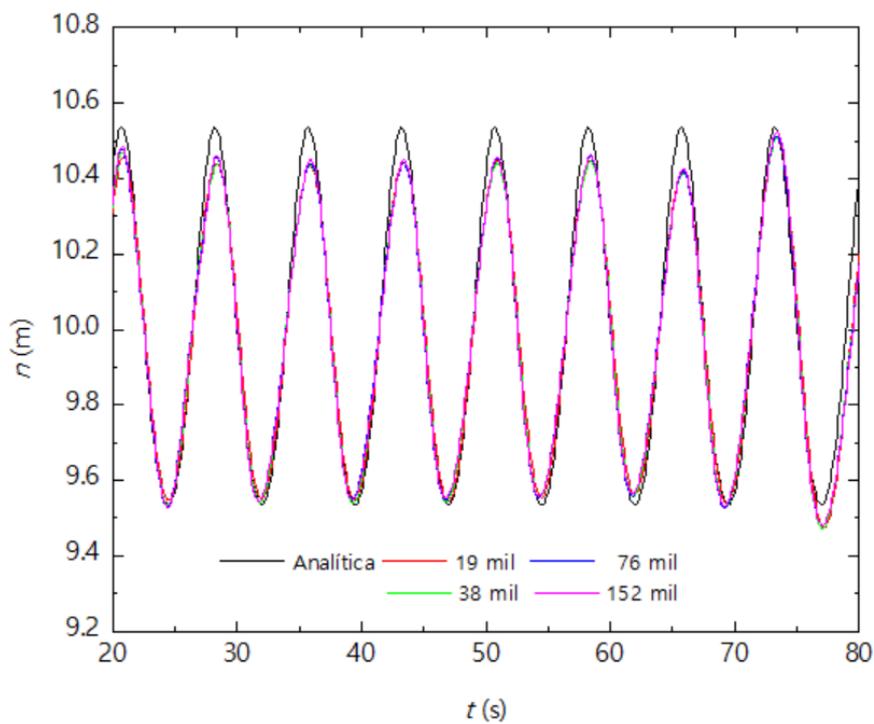


Figura 4.3 – Teste de Convergência de Malha: comparação da onda gerada analiticamente com as ondas geradas com quatro malhas diferentes.

O teste demonstrou uma pequena variação na elevação da superfície livre das ondas geradas numericamente em relação à onda analítica. Na Tabela 4.1 é informado a diferença (média entre o desvio padrão de cada instante de tempo) e a duração de cada simulação (tempo de processamento). Para a escolha da malha, levou-se em consideração o refinamento, o tempo de duração da simulação e como determinante, o erro. Constatado que entre uma malha de 76000 elementos e uma de 152000 elementos a diferença é de apenas 0.01% (menor que entre as demais malhas), foi então adotada uma malha com 76000 elementos regulares retangulares.

Tabela 4.1 – Valores da diferença relativa e do tempo de simulação para cada malha.

Nº de Elementos	Diferença Relativa (%)	Tempo de Processamento (h)
19000	0.81%	5.5
38000	0.85%	8.0
76000	0.87%	12.0
152000	0.88%	19.5

A Figura 4.4 ilustra a malha empregada no presente trabalho. As recomendações de discretização nas regiões da parede e da superfície livre são as mesmas adotadas por Goulart (2014) e Martins (2016), e as condições de contorno empregadas no domínio. Em Gomes et al. (2012) é apresentada uma recomendação para geração da malha, que consiste em se adotar na região da superfície livre elementos com dimensões equivalentes a $H/20$ na direção z (perpendicular ao sentido de propagação do escoamento) e 50 volumes por comprimento de onda (λ) na direção x (na direção principal de propagação do escoamento). Porém, neste trabalho o número de volumes na direção z na região da superfície livre foi de $H/30$ e de 70 volumes por comprimento de onda na direção x . Esse maior refinamento foi empregado devido à interação existente entre o escoamento da onda e a rampa do dispositivo de galgamento. Além disso, foi empregado um refinamento maior perto das paredes devido aos maiores gradientes do campo de velocidades nessas regiões. Esse tipo de malha com elementos retangulares foi empregado pela primeira vez em Goulart (2014). Nos trabalhos de Iahnke (2010) e Machado (2012) as malhas empregadas eram irregulares com elementos triangulares e se adaptavam mais facilmente ao domínio computacional empregado. A vantagem do emprego de malhas regulares com volumes retangulares é evitar efeitos numéricos como falsa difusão sobre a solução das variáveis primárias do problema.

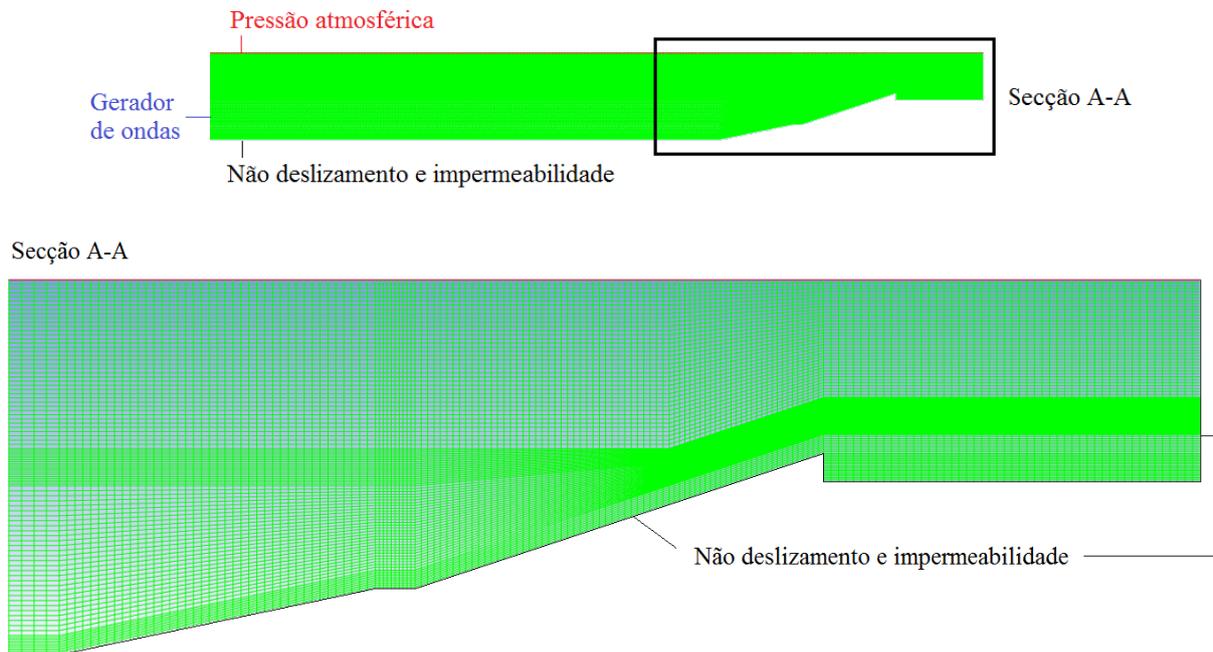


Figura 4.4 – Discretização espacial aplicada ao dispositivo de galgamento *onshore* em escala real.

4.6. Estudo de Convergência de Passo de Tempo

Assim como nos trabalhos de Goulart (2014) e Martins (2016), a discretização espacial empregada se deu através da realização de um estudo de independência de passo de tempo, por se tratar de um problema transiente. Para este estudo foram realizadas quatro simulações variando apenas o passo de tempo e 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 4.5 mostra o comportamento transiente da superfície livre da onda para os vários passos de tempo. Foi possível observar que para valores de $\Delta t \leq 2.0 \times 10^{-2}$ s todos os passos de tempo empregados conduziram a resultados altamente concordantes. Para $\Delta t = 4.0 \times 10^{-2}$ s é possível observar que houve uma defasagem com relação ao tempo e também um amortecimento na magnitude da onda. Consequentemente, foi adotado nas simulações posteriores de avaliação geométrica o passo de tempo de $\Delta t = 2.0 \times 10^{-2}$ s, visto que o mesmo conduz a um menor esforço computacional comparado com passos de tempo menores e conduz a soluções concordantes.

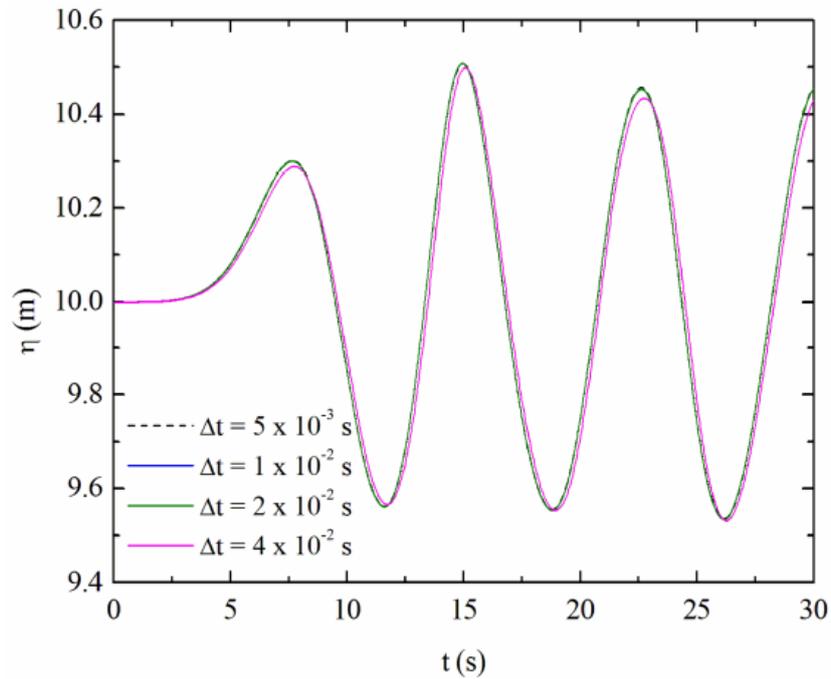


Figura 4.5 – Teste de convergência de passo de tempo para as simulações realizadas.

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 4.2:

Tabela 4.2 – Valores de altura da superfície livre da onda (η) no tempo de 15.0 s para os passos de tempo estudado e suas variações.

Δt (s)	η (m)	Variação (%)
5.0×10^{-3}	10.507790	1.9×10^{-4}
1.0×10^{-2}	10.507770	6.6×10^{-4}
2.0×10^{-2}	10.507700	1.1×10^{-4}
4.0×10^{-2}	10.496400	-

4.7. Verificação do Modelo Numérico

Para a verificação da metodologia empregada, foi utilizado o método de comparação entre a solução analítica (Chakrabarti, 2005), analisando a movimentação da superfície livre da água, e a solução numérica, que consiste em gerar a onda em um canal de ondas (sem o dispositivo) e observar

a variação da posição da superfície livre da água, ou seja, a sua amplitude, em um dado ponto do canal de ondas. Neste caso foi medido no ponto $x = 50.0$ m.

Essa comparação é apresentada na Fig. 4.6 que demonstra 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 $15.0 \text{ s} \leq t \leq 80.0 \text{ s}$ foi considerado para a verificação da onda gerada e também para a propagação dessa onda ao longo do canal.

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 do conjunto rampa/obstáculo sobre a quantidade de água que entra no reservatório do dispositivo de galgamento.

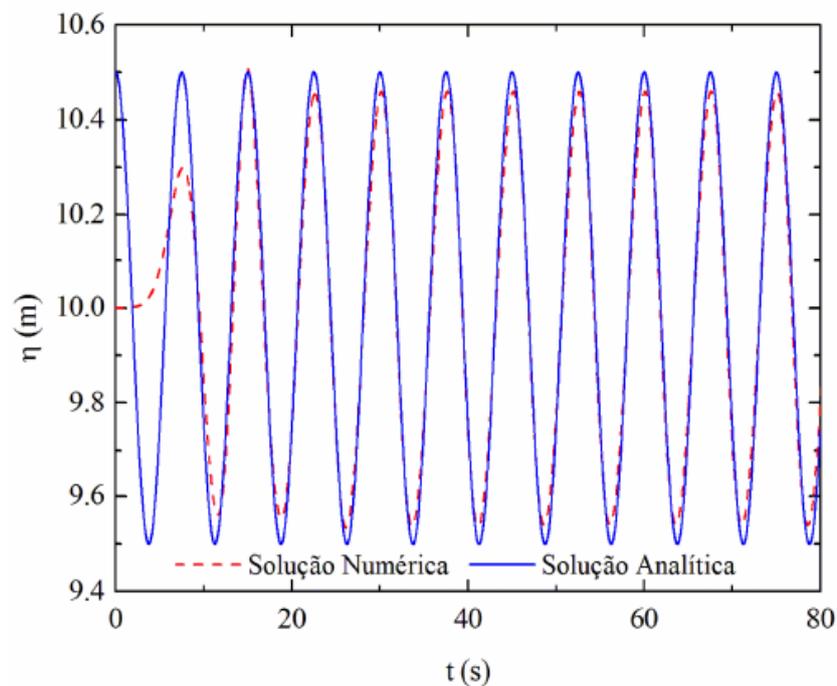


Figura 4.6 – Verificação da solução numérica com a solução analítica obtida pela teoria de Stokes de 2ª Ordem.

Para a verificação do princípio físico do modelo, foi comparado os desempenhos entre um dispositivo de galgamento convencional estudado em Martins et al., 2018 (sem obstáculo) e um dispositivo de galgamento com três geometrias de obstáculo acoplado e encontrou-se os resultados expostos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Comparação do desempenho entre um dispositivo de galgamento convencional e o conjunto dispositivo/obstáculo.

H_3/L_3	m (kg) (sem obstáculo)	m (kg) $L_1/L_2= 0.00$ (obstáculo triangular)	m (kg) $(L_1/L_2)_o$ (obstáculo trapezoidal)	m (kg) $L_1/L_2= 1.00$ (obstáculo retangular)
0.33	34775	44002	45116	44339
0.34	21958	34695	38273	37158
0.35	16797	24061	26295	25203
0.36	11842	17540	19623	18589
0.37	6811	11278	13718	13562

Por fim, cabe destacar que as simulações foram realizadas usando um computador com dois processadores de Intel Core i7-4960X 3.60 GHz e 32 GB de memória RAM. O tempo de processamento de cada simulação foi de aproximadamente 4.32×10^4 s (12 h).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através deste trabalho foi realizado um estudo numérico para avaliação geométrica de uma estrutura trapezoidal no fundo de um canal de ondas acoplada ao dispositivo de galgamento, empregando o método Design Construtal, associado ao mecanismo de busca exaustiva para otimização do problema. O objetivo é avaliar a influência da estrutura trapezoidal sobre o dispositivo, a fim de captar a maior quantidade de massa de água em um reservatório. Para essa avaliação, foi considerada a geometria do dispositivo de galgamento com cinco diferentes razões de H_3/L_3 , previamente estudadas no trabalho de Martins et al. (2018), para a fração de área da rampa de $\varphi_r = 0.012$ e uma submergência de $H_1 = 3.5$ m. O obstáculo acoplado ao dispositivo ($\varphi_{obs} = 0.006$), foi variado entre uma configuração geométrica triangular ($L_1/L_2 = 0,00$) e uma configuração retangular ($L_1/L_2 = 1.00$), totalizando dez geometrias. Valores entre $0.00 < L_1/L_2 < 1.00$ configuram uma geometria trapezoidal. A Figura 5.1 ilustra as três configurações geométricas (triangular, trapezoidal e retangular). Vale destacar que o escoamento da onda possui as mesmas características em todas as simulações, ou seja, foram mantidos constantes os parâmetros da onda regular e profundidade da lâmina de água ($\lambda = 65.4$ m, $T = 7.5$ s, $h = 10.0$ m e $H = 1.0$ m – Martins, 2016).

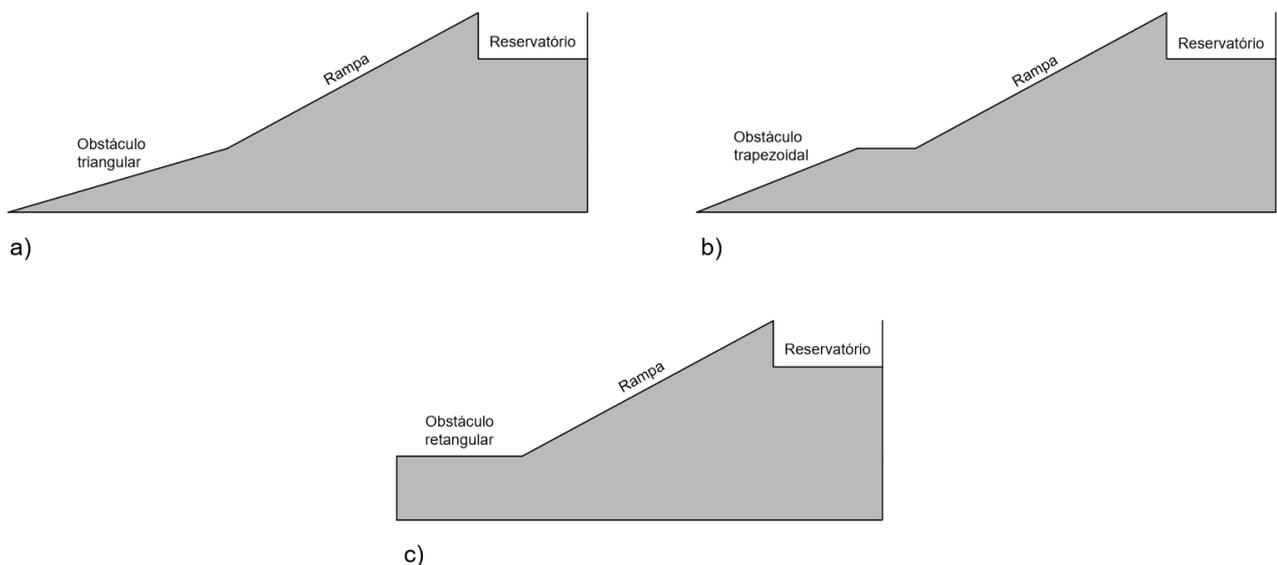


Figura 5.1 – Configurações geométricas do obstáculo: a) triangular, b) trapezoidal e c) retangular.

A fim de comparar o desempenho das geometrias simuladas, realizou-se o somatório total da massa de água que entra no reservatório ao longo dos 100,0 s de simulação (dez geometrias de L_1/L_2 – base superior do obstáculo sobre base inferior (0.11, 0.22, 0.33, 0.44, 0.56, 0.67, 0.78, 0.89 e 1.00)

– para cada uma das cinco geometrias de H_3/L_3 – altura da rampa sobre o comprimento (0.33, 0.34, 0.35, 0.36 e 0.37)). A Figura 5.2 apresenta o efeito da razão L_1/L_2 sobre a quantidade total de massa de água acumulada no reservatório ao longo do intervalo de tempo analisado ($0,0 \text{ s} \leq t \leq 100,0 \text{ s}$). Em análise a esta figura, fica evidente que existe uma razão de comprimento/altura da rampa que proporciona o melhor desempenho do dispositivo, $H_3/L_3 = 0,33$, proporcionando um acúmulo de água máximo no reservatório de aproximadamente $m = 45116 \text{ kgm}^{-1}$. O desempenho com relação à variação do grau de liberdade L_1/L_2 é levemente sentido quando comparado com o mesmo H_3/L_3 . Para a menor razão da rampa, $(H_3/L_3)_o = 0,33$, a configuração de $(L_1/L_2)_{oo}$ obteve uma diferença de apenas 4% em relação à pior situação. Em uma análise geral, os resultados indicam claramente que a razão H_3/L_3 possui uma maior influência sobre o indicador de performance do que a razão L_1/L_2 , porém para maiores razões de H_3/L_3 , a razão L_1/L_2 possui maior influência. Por exemplo, para $H_3/L_3 = 0,37$, a configuração ótima $(L_1/L_2)_o = 0,67$ obteve a quantidade de água de $m_m = 13718 \text{ kg}$, enquanto a pior situação foi obtida para $L_1/L_2 = 0,00$ com $m = 11278 \text{ kg}$, ou seja, uma diferença de aproximadamente 20%. Assim, fica evidente que a razão L_1/L_2 é importante para melhorar o desempenho nesse problema. Contudo, a sua contribuição é periférica quando comparada a razão H_3/L_3 .

Foi possível observar ainda que em todos os casos simulados ocorreu galgamento e a melhor configuração - $(H_3/L_3)_o = 0,33$ e $(L_1/L_2)_{oo} = 0,67$ - proporciona um desempenho superior a 4 vezes comparada com a pior situação - $H_3/L_3 = 0,37$ e $L_1/L_2 = 0,00$. É possível observar também que a massa de água é inversamente proporcional ao grau de liberdade H_3/L_3 , ou seja, quanto maior a razão comprimento/altura da rampa, menos água é captada pelo reservatório. Vale destacar que para configurações de rampa com razões acima de $H_3/L_3 = 0,37$, não ocorre galgamento, passando o dispositivo a ter o mesmo efeito de uma estrutura de quebra-mar.

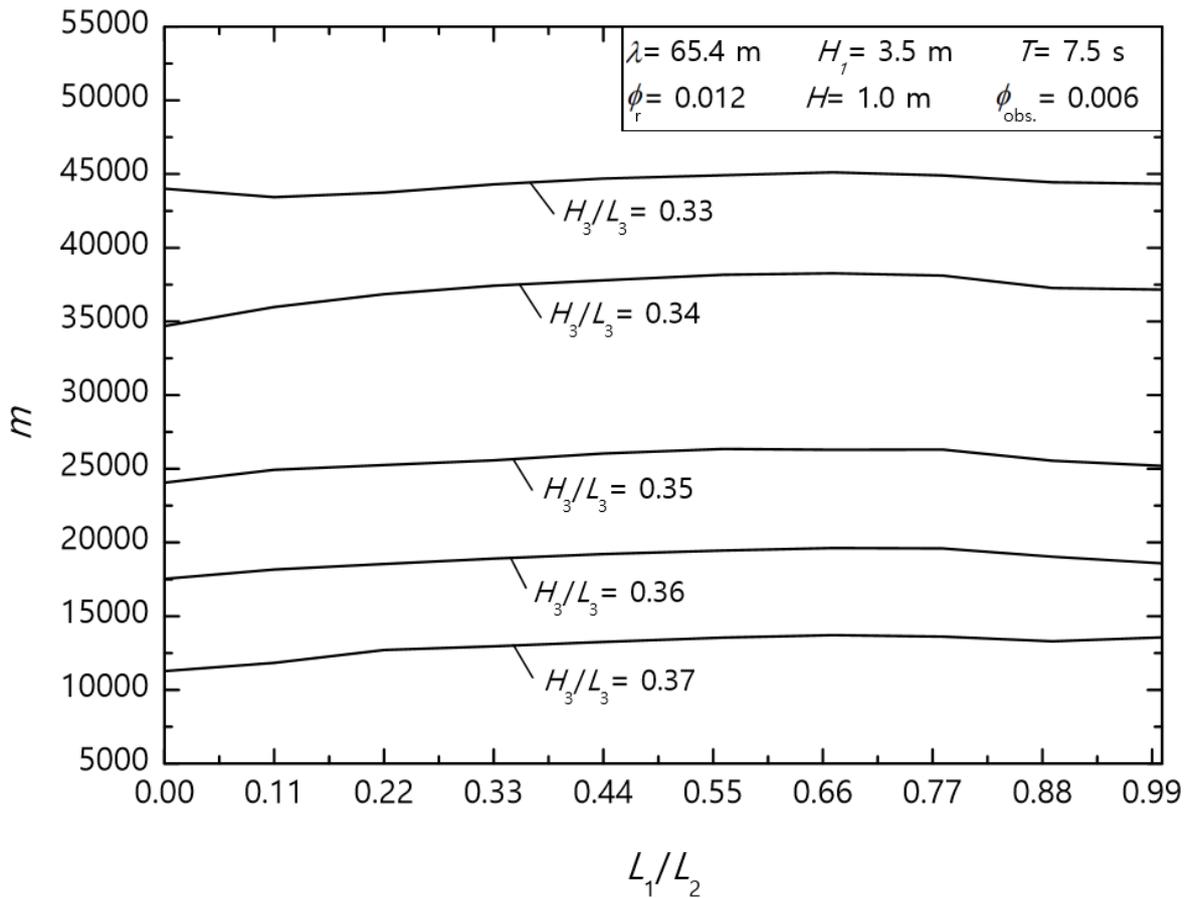


Figura 5.2 – Efeito da razão L_1/L_2 sobre a massa de água para diferentes razões de H_3/L_3 .

A Figura 5.3 ilustra o efeito da razão H_3/L_3 sobre a massa de água uma vez maximizada para os casos ótimos de L_1/L_2 . Assim como observado anteriormente na Fig. 5.6, aqui também fica evidente que quanto maior a relação comprimento/altura da rampa, menor é o desempenho do dispositivo. Considerando as dez razões simuladas de L_1/L_2 para cada um dos cinco casos de H_3/L_3 , a razão do obstáculo otimizada para quase todos os casos é $(L_1/L_2)_o = 0.67$, exceto para a configuração de rampa $H_3/L_3 = 0.35$ que obteve como configuração ótima $(L_1/L_2)_o = 0.56$. A razão base superior do obstáculo sobre base inferior (L_1/L_2) que proporciona o melhor desempenho tem o formato de um trapézio. Para as mais baixas magnitudes de L_1/L_2 (forma triangular do obstáculo) o escoamento de onda sofre uma dispersão e o galgamento não é o mais favorável, ou seja, a configuração de rampa e obstáculo atua como uma praia, suavizando a intensidade da onda que atinge o estágio final da rampa. Por outro lado, para as maiores magnitudes da razão L_1/L_2 (forma retangular) ocorre uma maior reflexão da onda, desfavorecendo também a intensidade do escoamento que atinge a rampa.

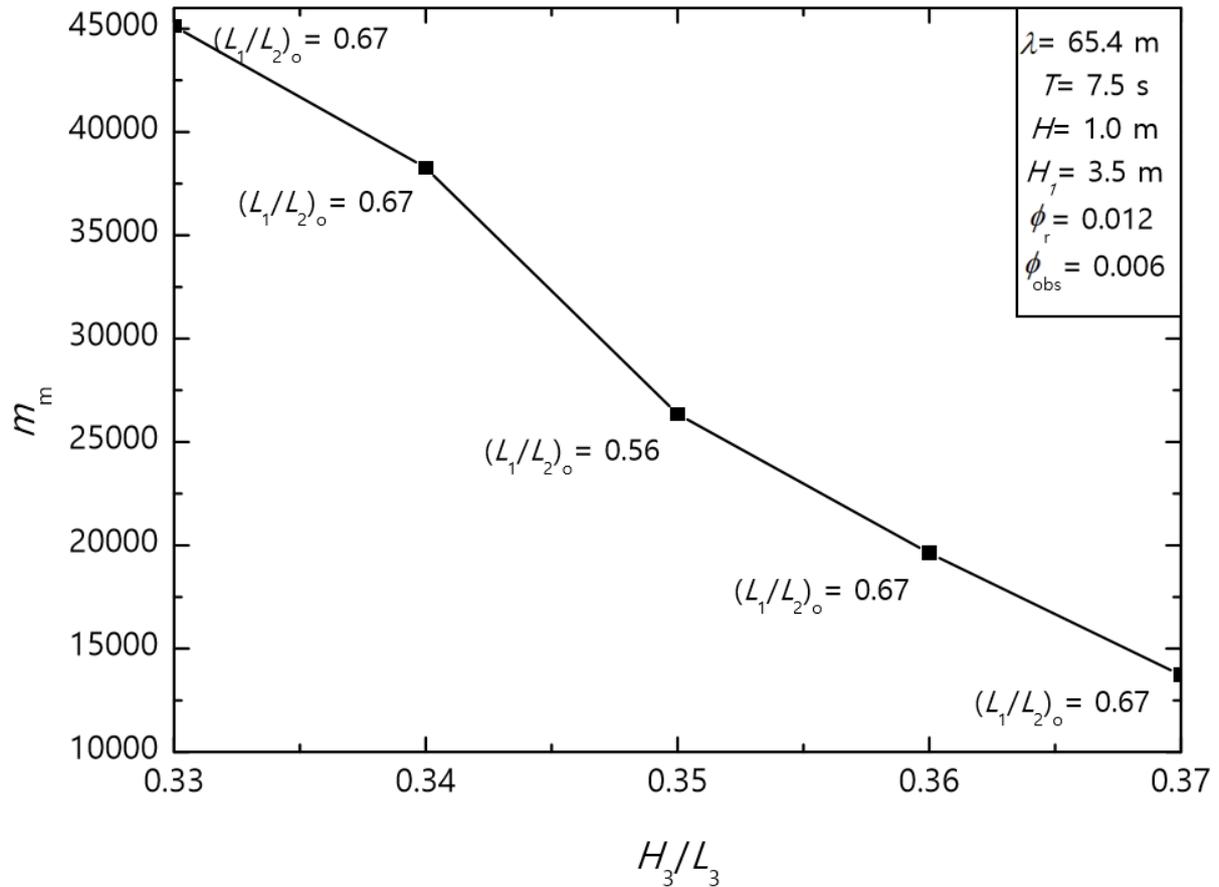


Figura 5.3 – Efeito da razão H_3/L_3 sobre a massa de água uma vez maximizada.

Com base nos casos estudados e considerando as restrições impostas, o conjunto rampa/estrutura possui o melhor desempenho quando a rampa possui uma configuração $(H_3/L_3)_o = 0.33$, o obstáculo trapezoidal duas vezes otimizado, com razão $(L_1/L_2)_{oo} = 0.67$, resultando em uma magnitude de massa de água acumulada duas vezes maximizada de aproximadamente $m_{mm} = 45116$ kg, que é 4 vezes superior ao caso com pior geometria e 1,30 vezes superior ao melhor caso sem obstáculo (para as mesmas configurações de profundidade do dispositivo e onda incidente).

Após o estudo da geometria é avaliada a vazão mássica instantânea para três diferentes razões de L_1/L_2 , considerando-se uma razão H_3/L_3 constante ($H_3/L_3 = 0.33$), que representa a razão ótima encontrada em Martins et al. (2018). Na Figura 5.4 é possível observar que para os três casos, o galgamento começou a ocorrer em um instante de tempo de aproximadamente $t \sim 51.0$ s. Os picos de vazão mássica dos três casos ocorreram também em um mesmo instante de tempo, em aproximadamente $t \sim 75.0$ s, porém com diferentes magnitudes. A geometria $L_1/L_2 = 0.11$ obteve a maior magnitude, $\dot{m} = 245,00$ kg/m, enquanto que $L_1/L_2 = 0.67$ e $L_1/L_2 = 1.00$ atingiram magnitudes ligeiramente mais baixas, $\dot{m} = 238,82$ kg/m e $\dot{m} = 235,57$ kg/m, respectivamente. Foi observado que

os maiores picos instantâneos nem sempre são obtidos para a mesma geometria em todos os instantes de tempo. Dessa forma, para comparação é necessário calcular a quantidade de água que entrou no reservatório ao longo de todo o intervalo de tempo.

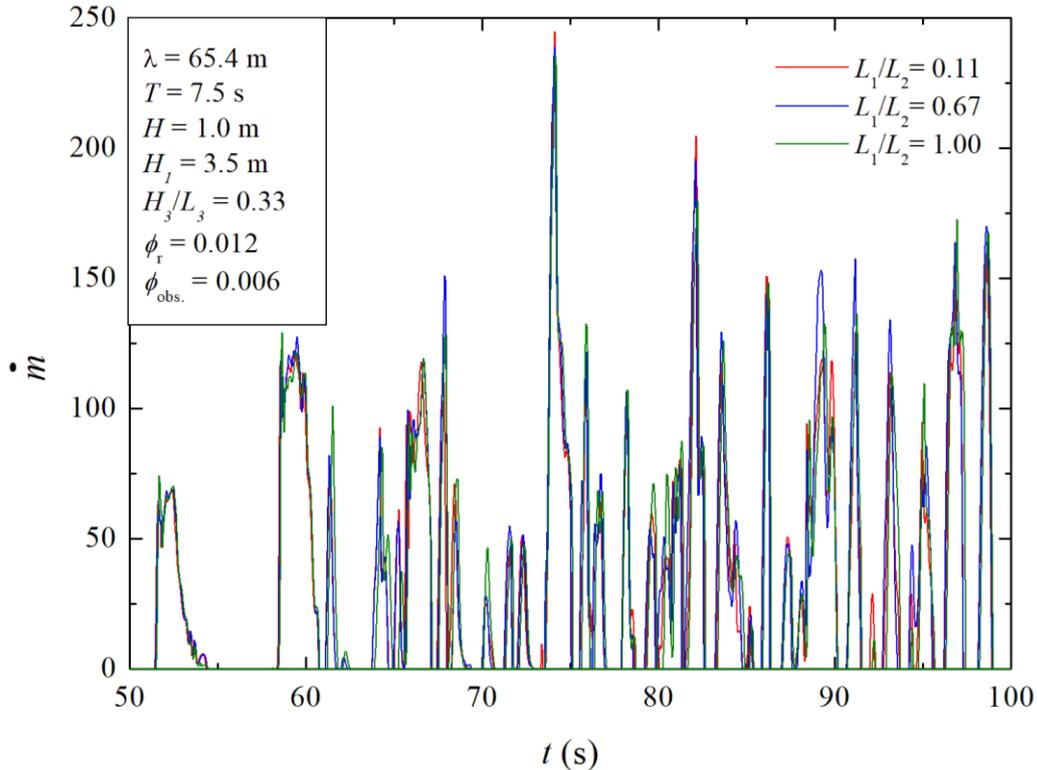


Figura 5.4 – Comportamento instantâneo do galgamento sobre o dispositivo para o caso $H_3/L_3 = 0.33$ para diferentes magnitudes da razão L_1/L_2 .

A Figura 5.5 mostra que a altura de água acumulada dentro do reservatório tem a maior magnitude para a razão $L_1/L_2 = 0.67$ em praticamente todos os instantes de tempo. Observa-se também, em uma comparação com os resultados de Martins et al. (2018), que a frequência de ocorrência do galgamento é maior, o que mostra que a inserção do obstáculo afeta o comportamento transiente do galgamento. Além disso, nota-se que o efeito de L_1/L_2 não parece significativo em comparação com a razão H_3/L_3 . A formação da onda se dá através de uma imposição do campo de velocidades na superfície esquerda do canal de ondas. Para que ocorra o galgamento é necessário ser gerado um número suficiente de ondas capaz de incidir sobre a superfície do dispositivo e vencer a altura da rampa, adentrando no reservatório.

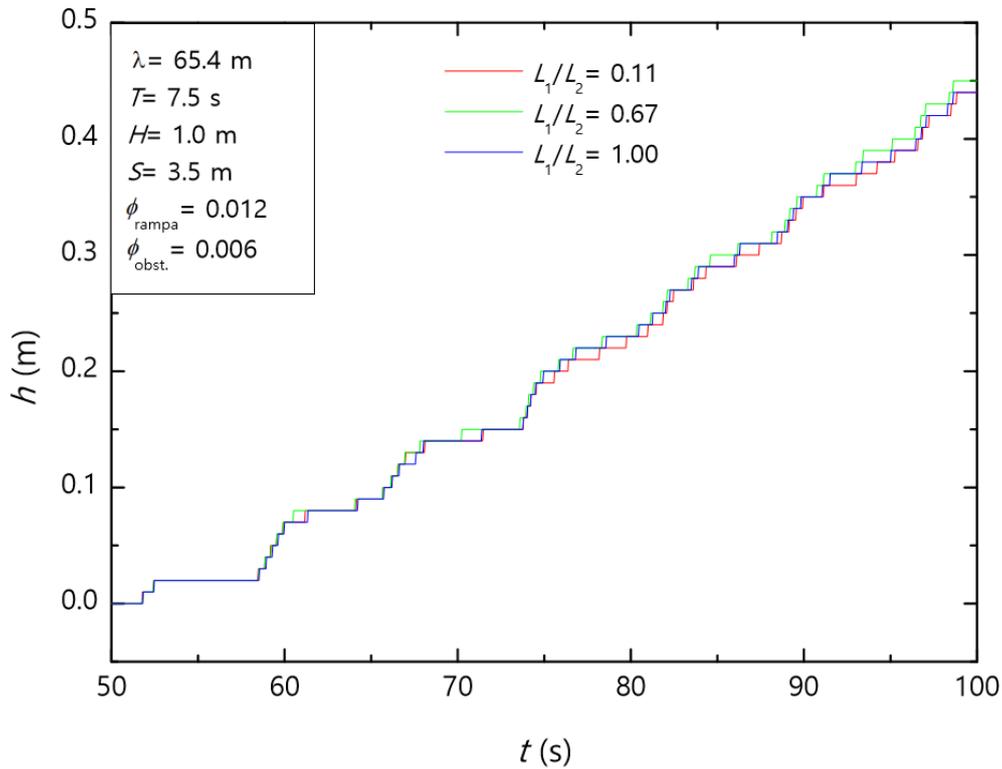


Figura 5.5 – Quantidade acumulada de água no reservatório ao longo do tempo para o caso $H_3/L_3 = 0.33$ para diferentes magnitudes da razão L_1/L_2 .

Os campos de fração volumétrica de água e de velocidades para alguns instantes de tempo são mostrados nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8. Através destas é possível observar como ocorre o escoamento da onda sobre o dispositivo (razão ótima da rampa, $(H_3/L_3)_o = 0.33$) com três diferentes razões de obstáculos ($L_1/L_2 = 0.11$, $(L_1/L_2)_o = 0.67$ e $L_1/L_2 = 1.00$). Para essa análise foi adotado o intervalo de tempo de $73.0 \text{ s} \leq t \leq 77.0 \text{ s}$, com um incremento de 1.0 s . Nos campos de fração volumétrica, a água é representada pela cor vermelha, enquanto que o ar pela cor azul. Já nos campos de velocidades, entre a escala de cores, o azul turquesa representa velocidades inferiores e o vermelho velocidades superiores.

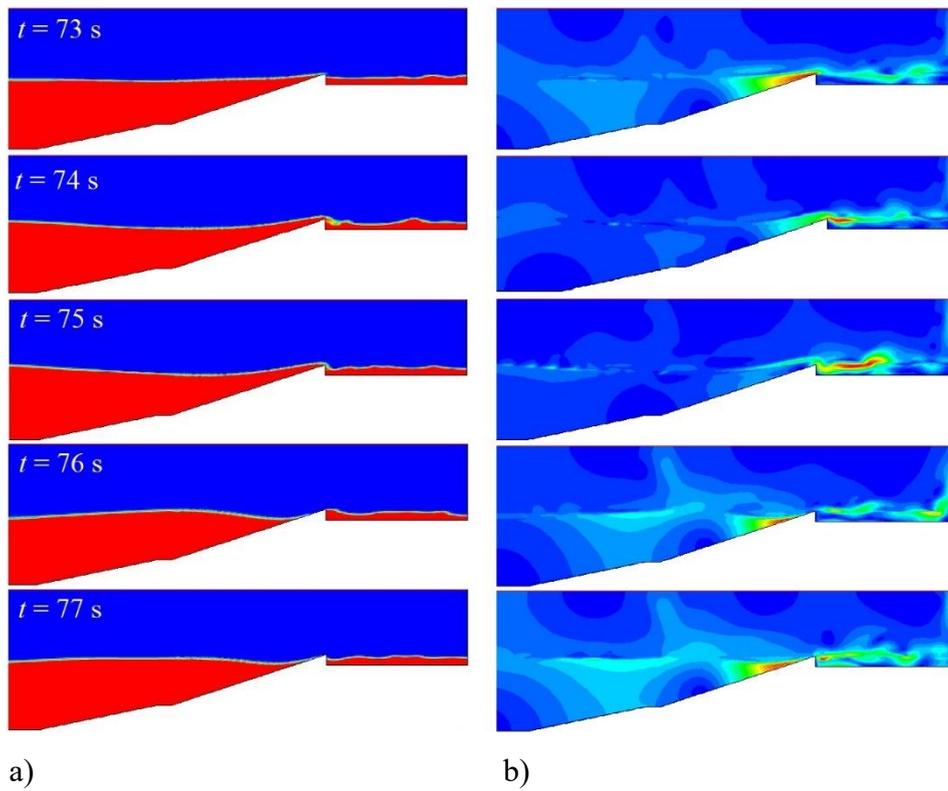


Figura 5.6 – Comportamento do escoamento da onda sobre o dispositivo para o caso $H_3/L_3 = 0.33$ e razão $L_1/L_2 = 0.11$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

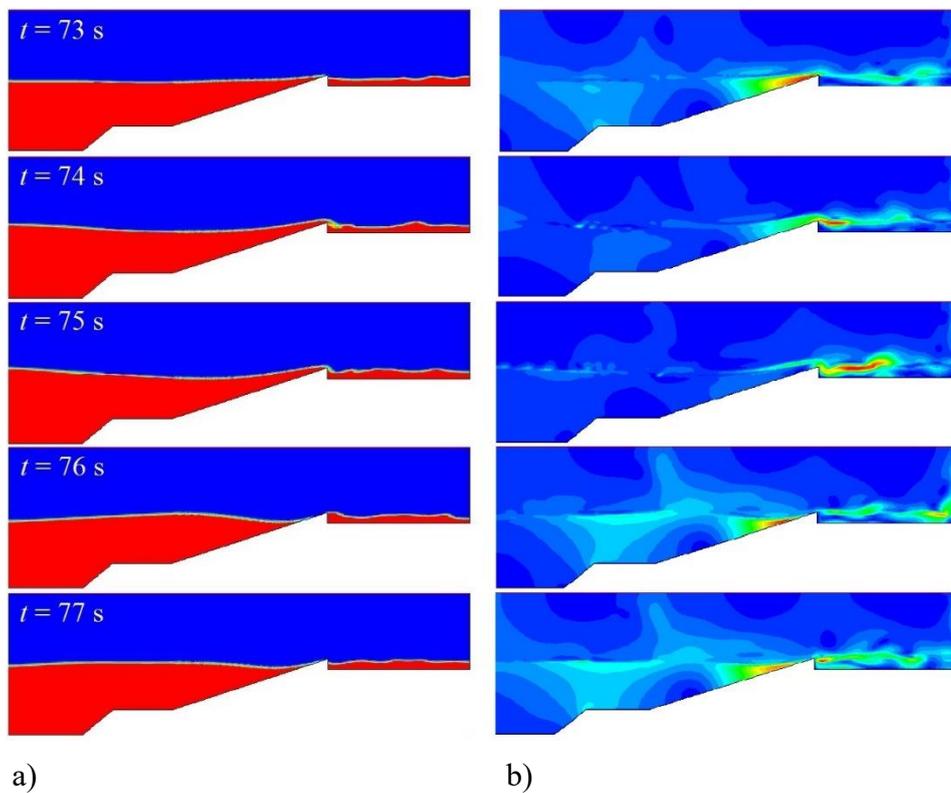


Figura 5.7 – Comportamento do escoamento da onda sobre o dispositivo para o caso $H_3/L_3 = 0.33$ e razão $L_1/L_2 = 0.67$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

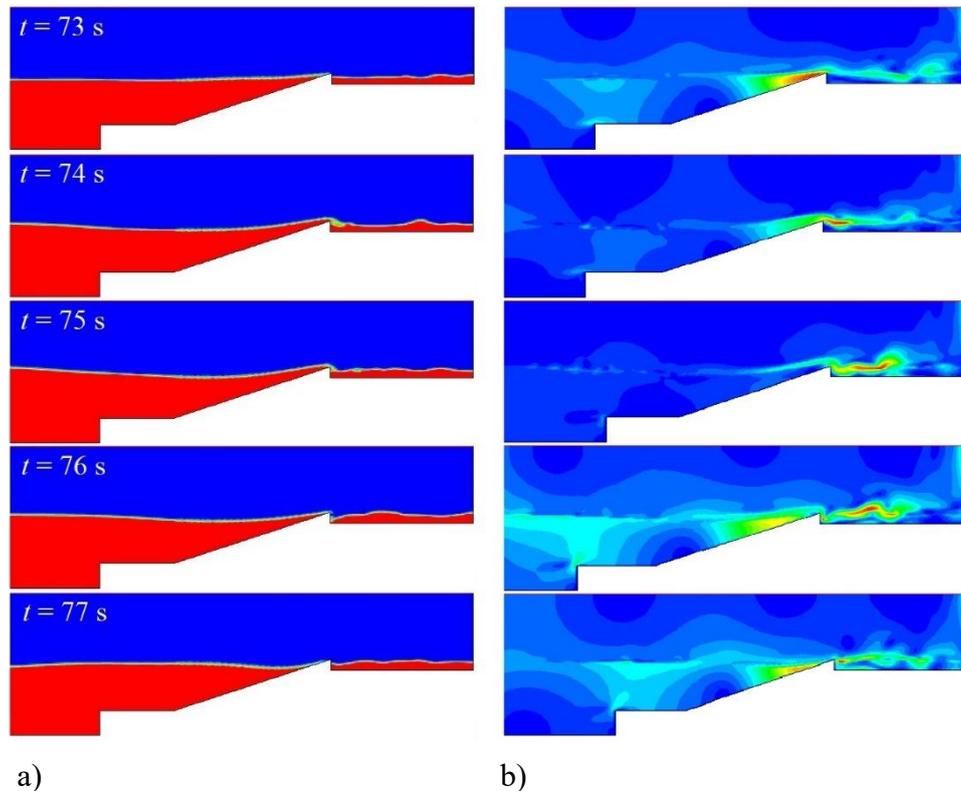


Figura 5.8 – Comportamento do escoamento da onda sobre o dispositivo para o caso $H_3/L_3 = 0.33$ e razão $L_1/L_2 = 1.00$: a) fração volumétrica de água, b) campo de velocidades em m/s.

Através dos campos de fração volumétrica apresentados nas Figuras 5.6 a), 5.7 a) e 5.8 a) é possível observar que no intervalo de tempo analisado ($73.0 \text{ s} \leq t \leq 77.0 \text{ s}$), o reservatório nos três casos já apresentava uma certa quantidade de água. Isso significa que antes de 73.0 s , o galgamento já havia ocorrido. Esse fenômeno ocorre quando a energia acumulada da onda que incide sobre o dispositivo é suficiente para ultrapassar a altura da rampa, fazendo então com que a água entre no reservatório. Nos três casos plotados, entre os instantes de tempo de $73.0 \text{ s} \leq t \leq 75.0 \text{ s}$, observa-se que a massa de água gera uma elevada inflexão na superfície livre da onda, que conduzirá a um processo de quebra de onda, ocasionado o galgamento. A partir do instante $t = 76.0 \text{ s}$, percebe-se que a onda se estabiliza e a massa de água começa a se deslocar em sentido contrário, à base da rampa do dispositivo.

Com relação aos campos de velocidades apresentados nas Figuras 5.6 b), 5.7 b) e 5.8 b), nas três situações, observa-se em geral, que suas maiores magnitudes ocorrem no ar devido a sua menor massa específica. Entre os instantes de tempo de $73.0 \text{ s} \leq t \leq 77.0 \text{ s}$, a massa de água que está entrando no reservatório ocasiona um deslocamento do ar, representando velocidades mais altas nestes instantes. Na região da água, os campos de velocidades são bastante reduzidos com relação às

magnitudes na região do ar. Logo, quando a massa de água começa a ter o sentido oposto ($t = 76.0$ s e $t = 77.0$ s), ou seja, descendo da rampa, a mesma encontra-se com a próxima onda incidente, colidindo-as e gerando as maiores magnitudes do campo de velocidades na água.

A performance do conjunto considerando uma mesma geometria de rampa (H_3/L_3), variando apenas o obstáculo (L_1/L_2), não sofre alteração significativa, porém consegue-se perceber que o caso $H_3/L_3 = 0.33$ e razão $L_1/L_2 = 0.67$ intensifica um pouco o comportamento oscilatório da onda na região da rampa próximo ao reservatório, causando um aumento da quantidade de água que entra no reservatório.

Por fim, com o objetivo de comparar os desempenhos entre um dispositivo de galgamento convencional e um dispositivo de galgamento com um obstáculo acoplado, foram analisados os resultados numéricos das simulações de cinco configurações de rampa (H_3/L_3) do dispositivo de galgamento convencional estudado em Martins et al., 2018 (sem obstáculo) e os resultados de três diferentes configurações de obstáculo (L_1/L_2), considerando as mesmas cinco variações geométricas de rampa simuladas para o dispositivo sem obstáculo. As três variações geométricas do obstáculo testadas configuraram uma estrutura triangular ($L_1/L_2 = 0.00$), uma trapezoidal ($L_1/L_2 = 0.67$) e uma retangular ($L_1/L_2 = 1.00$).

A Figura 5.9 ilustra o efeito da razão H_3/L_3 sobre a massa de água galgada no dispositivo.

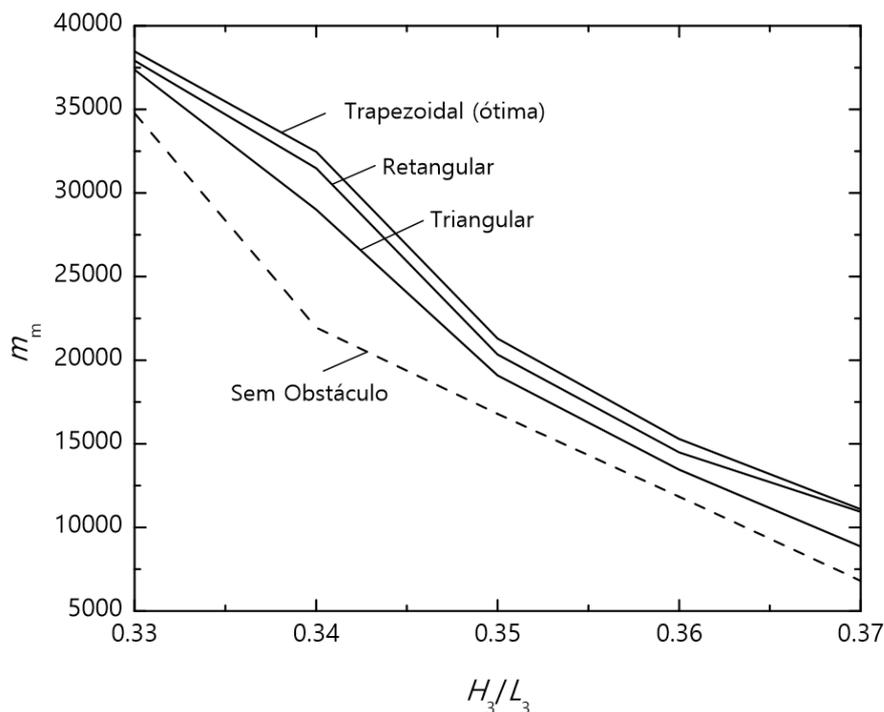


Figura 5.9 – Comparação entre o desempenho do dispositivo sem obstáculo estudado em Martins et al., (2018) com o dispositivo integrado com diferentes formas geométricas.

Em análise aos resultados expostos na Fig. 5.9, é possível afirmar que a configuração do conjunto dispositivo/estrutura capta uma quantidade maior de massa de água no reservatório, tornando essa configuração mais eficiente em relação ao dispositivo de galgamento convencional. Na configuração duas vezes ótima, i.e., para $(H_3/L_3)_o = 0.33$ e $(L_1/L_2)_{oo} = 0.67$, a inserção da rampa trapezoidal melhorou o desempenho do dispositivo em 30%, enquanto que para a pior razão ($H_3/L_3 = 0.67$ e $(L_1/L_2)_o = 0.67$) a inserção da rampa trapezoidal atingiu uma melhoria de aproximadamente 100%.

6. CONCLUSÕES

No presente trabalho realizou-se um estudo numérico de análise e otimização objetivando avaliar a geometria do conjunto rampa/estrutura, sendo esta estrutura acoplada à base de um dispositivo de galgamento *onshore* em escala real. 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* (VOF) foi empregado para o tratamento da interação entre as fases ar e água, permitindo a geração de ondas regulares em um canal de ondas e sua interação com o dispositivo de galgamento. A avaliação geométrica foi realizada através do método Design Construtal e a otimização pelo método de Busca Exaustiva.

Foi analisada a variação de dois graus de liberdade (L_1/L_2 – base superior do obstáculo sobre base inferior e H_3/L_3 – altura da rampa sobre o comprimento). O range geométrico da rampa ficou entre $0,33 < H_3/L_3 < 0,37$, totalizando cinco casos e para cada um destes, a geometria do obstáculo variou partindo de uma geometria triangular ($L_1/L_2 = 0,00$), passando por diversas configurações de geometrias trapezoidais, até chegar na análise de um obstáculo com geometria retangular ($L_1/L_2 = 1,00$). As frações de área (φ_r e φ_{obs}) e a altura do obstáculo (H_1) foram mantidos fixos. Os parâmetros remanescentes para uma onda específica ($\lambda = 65.4$ m, $T = 7.5$ s, $h = 10.0$ m e $H = 1.0$ m) também foram mantidos fixos. Os resultados foram analisados em um intervalo de tempo de $0.0 \text{ s} \leq t \leq 100.0 \text{ s}$.

No presente estudo, os resultados permitiram chegar às seguintes conclusões:

- Em todos os casos a quantidade máxima de água que entrou no reservatório ao longo do tempo ocorreu para a menor razão de H_3/L_3 associada a geometrias intermediárias de L_1/L_2 (configuração trapezoidal) e os piores desempenhos foram alcançados para a maior razão de H_3/L_3 ,

- Observou-se que magnitudes intermediárias de L_1/L_2 levaram ao melhor desempenho do conjunto rampa/obstáculo para todas as configurações de razão H_3/L_3 simuladas, comprovando que a geometria com formato trapezoidal é a mais eficiente. É importante citar que para as condições estudadas, a razão H_3/L_3 apresentou um efeito maior do que a razão L_1/L_2 . Apesar disso, a razão L_1/L_2 conduziu a melhorias de aproximadamente 20% quando comparadas às geometrias ótimas e piores geometrias para o obstáculo, indicando que é uma variável importante,

- Os resultados, de uma forma geral, mostraram a aplicabilidade e a eficiência do Design Construtal na avaliação geométrica, após comprovado que, a melhor geometria tem um desempenho 4 vezes superior do que o caso com pior geometria de todo o conjunto,

- A análise numérica comparativa entre um dispositivo de galgamento sem obstáculo com um dispositivo que possui uma estrutura acoplada, comprovou um melhor desempenho do conjunto rampa/obstáculo, sendo em média 66% superior para as diferentes razões de H_3/L_3 investigadas.

Fica proposto para continuidade do trabalho as seguintes análises:

- Realizar um estudo empregando outras ondas monocromáticas com comprimento e período diferentes,

- Variar tanto a área de construção da rampa quanto a da estrutura acoplada,

- Analisar a variação do grau de liberdade H_1 (altura de submersão do dispositivo),

- Otimizar geometricamente um dispositivo de galgamento acoplado a uma estrutura trapezoidal, adotando uma abordagem numérica tridimensional,

- Realizar estudos experimentais de um dispositivo de galgamento acoplado a uma estrutura trapezoidal considerando abordagens *onshore* e *offshore*, considerando a validação de modelos numéricos para simulação de dispositivos de galgamento.

7. REFERÊNCIAS

- ANSYS, 2011. Version 14.0 - Fluent User's Guide, Ansys Inc.
- BAHAJ, A. S. Generating electricity from the oceans. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 3399-3416, 2011.
- BASAK, T. The law of life: The bridge between Physics and Biology, **Physics Life Reviews**. v. 8, p. 249–252, 2011.
- BEELS, C., TROCH, P., DE VISCH, K., KOFOED, J. P., DE BACKER, G. Application of the time-dependent mild-slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of Wave Dragon wave energy converters. **Renewable Energy**, v. 35, p. 1644–1661, 2010.
- BEJAN, A. e LORENTE, S., 2006a, Constructal Theory of generation of configuration in nature and engineering, **Journal of Applied Physics**, Vol. 100, pp. 041301.
- BEJAN, A. **Shape and Structure, from Engineering to Nature**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000
- BEJAN, A. **The physics of life: the evolution of everything**. St. Martins Press, New York City, 2016.
- BEJAN, A., LORENTE, S. Constructal Law of design and evolution: physics, biology, technology and society. **Journal of Applied Physics**, v. 113, PP. 151301-1-151301-20, 2013.
- BEJAN, A., LORENTE, S. **Design with Constructal Theory**. Wiley, Hoboken, 2008.
- BEJAN, A., ZANE, J. **Design in nature**. Doubleday, USA, 2012.
- 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.
- CONTESTABILE, P., CRISPINO, G., LAURO, E. D., FERRANTE, V., VICINANZA, D. Overtopping breakwater for wave Energy Conversion: Review of state of art, recent advancements and what lies ahead. **Renewable Energy**, v. 147, part 1, p. 705-718, 2020.
- CRUZ, J. M. B. P., Sarmiento, A. J. N. A. **Energia das Ondas Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais**, Instituto do Ambiente, Alfragide, 2004.
- D'EGMONT, L. B. F., 2017. **Avaliação de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar e o papel das patentes nos projetos de engenharia**. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

- DEAN, R. G., DALRYMPLE, R.A. **Water wave mechanics for engineers and scientist**, World Scientific, vol. 2, Singapura, 353 p., 1991.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz Energética e Elétrica**. (<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>).
- FALCÃO, A. F., Wave energy utilization: A review of the technologies, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, pp 899-918, 2010.
- FLEMING, F. P., 2012. **Avaliação Do Potencial De Energias Oceânicas No Brasil**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- 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., 2010. **Modelagem computacional de um dispositivo coluna d'água oscilante para conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS.
- GOMES, M. N., 2014. **Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- GOMES, M. N., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D., ROCHA, L. A. O. **Análise de Malhas para Geração Numérica de Ondas em Tanques**. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM, São Luís, Maranhão, Brasil, 2012.
- GONÇALVES, A. M. **Utilização de dados de altímetro na avaliação de recursos energéticos das ondas do mar**. Relatório de estágio profissionalizante. Portugal, 2003.
- GOULART, M. M., 2014. **Estudo numérico da geometria de um dispositivo de galgamento onshore em escala real empregando constructal design**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS.
- GOULART, M. M., MARTINS, J. C., ACUNHA JUNIOR, I. C., GOMES, M. N., SOUZA, J. A., ROCHA, L. A. O., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D. Constructal design of an onshore overtopping device in real scale for two different depths. **Marine Systems & Ocean Technology**, v. 1, p. 1, 2015.
- GREENPEACE, 2013. **Revolução energética: a caminho do desenvolvimento limpo**. Cenário Brasileiro.
- GRIMMLER, J. DO A. M., 2013. **Conversor de energia das ondas em energia elétrica com dispositivo de Coluna de Água Oscilante: Simulação Numérica e estudo geométrico**. Dissertação de mestrado em modelagem computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS.
- HAN, Z., LIU, Z., SHI, H. Numerical study on overtopping performance of a multi-level breakwater for wave energy conversion. **Ocean Engineering**, v. 15015, p. 94-101, 2018.

- HIRT, C. W., NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, p. 201-225, 1981.
- HOLTHUIJSEN, L. H. **Waves in Oceanic and Coastal Waters**. New York: Cambridge, 2007. 405 p. 1, 5, 6, 15, 16, 17, 18, 2.
- HORKO, M., 2007. **CFD Optimization 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.
- IAHNKE, S. L. P., 2010. **Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento**, Dissertação de mestrado em modelagem computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). (<http://www.iea.org/topics/renewables>).
- J. Tedd, J. P. Kofoed. Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon, wave energy converter. **Renewable Energy**, v. 34(3), p. 711-717, 2009.
- KOFOED, J. P., 2002. **Wave Overtopping of Marine Structures: Utilization of Wave Energy**. Phd Thesis, Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering: Aalborg University.
- KOFOED, J. P., FRIGAARD, P., MADSEN, E. F., SØRENSEN, H. C., Prototype testing of the wave energy converter wave dragon, **Renewable Energy**, v. 31, p. 181-189, 2006.
- LAURO, E. D, MAZA, M., LARA, J. L., LOSADA, I. J., VICINANZA, D. Advantages of an innovative vertical breakwater with an overtopping wave energy converter. **Coastal Engineering**, v. 159, article 103713, 2020.
- LI, Y., YU, Y.-H. A synthesis of numerical methods for modeling wave energy converter-point absorbers, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 4352-4364, 2012.
- LING, L., YONGCAN, C., YULIANG, L., **Volume of fluid (VOF) method for curved free surface water flow in shallow open channel**, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing, 2001.
- LIU Z., Shi H., Cui Y., Kim K., Experimental study on overtopping performance of a circular ramp wave energy converter, **Renewable Energy**, v. 104, p. 163-176, 2017.
- LIU, Z., HYUN B., JIN, J. Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC, **Journal of The Korean Society for Marine Environmental Engineering**, v. 11, nº 1, 2008a.
- LOPES, N. DA R., 2012. **Modelagem Computacional e Otimização Geométrica de um Conversor do tipo Coluna de Água Oscilante**, Dissertação de mestrado em modelagem computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

- LÓPEZ, I., Andreu, J., Ceballos, S. Alegría, I. M., Kortabarria, I. Review of Wave Energy Technologies and the Necessary Power-Equipment, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 27, pp. 413 – 434, 2013.
- LV, X., ZOU, Q., REEVE, D. Numerical simulation of overflow at vertical weirs using a hybrid level set/VOF method, **Advances in Water Resources**. v. 34, p. 1320-1334, 2011.
- MACHADO, B. N., ZANELLA, M. M., GOMES, M. N., TEIXEIRA, P. R. F., ISOLDI, L. A., DOS SANTOS, E. D., ROCHA, L. A. O. Constructal Design of an Overtopping Wave Energy Converter. **Constructal Law Conference**, Porto Alegre. 2011c.
- MACHADO, B. N., 2012. **Modelagem Computacional e Otimização geométrica de um dispositivo de galgamento para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica**, Dissertação de mestrado em modelagem computacional, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- MACHADO, B. N., 2016. **Estudo Numérico Tridimensional de um Dispositivo de Galgamento para Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica aplicando o Método Constructal Design**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- MARGHERITINI, L., FRIGAARD, P. **The SSG Wave Energy Converter and Application on the Breakwater of the New Liseleje Harbour**. Technical report, Aalborg University, 2007.
- MARGHERITINI, L., STRATIGAKI, V., TROCH, P. Geometry Optimization of an Overtopping Wave Energy Device Implemented into The New Breakwater of the Hanstholm Port Expansion. **Twenty-Second International Offshore and Polar Engineering Conference**, p. 593-600, 2012.
- MARGHERITINI, L., VICINANZA, D. AND FRIGAARD, P. SSG wave energy converter: design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. **Renewable Energy**, v. 34, p. 1371-1380, 2009.
- MARTINS, J. C., 2016. **Design Construtal de um dispositivo de galgamento onshore em escala real para diferentes áreas de construção e ondas monocromáticas**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.
- MARTINS, J. C., GOULART, M. M., GOMES, M. N., SOUZA, J. A., ROCHA, L. A. O., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D. Geometric evaluation of the main operational principle of an overtopping wave energy converter by means of Constructal Design. **Renewable Energy**, v. 118, p. 727-741, 2018.
- MC CORMICK, M. E., **Ocean Engineering Mechanics**. New York: Cambridge University Press. 2010
- NAM, B. W., SHIN, S. H., HONG, K. Y., HONG, S. W. Numerical Simulation of Wave Flow Over the Spiral-Reef Overtopping Device. **The Eighth Isope Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium**, 2008.

- NIU, E. Z., MA, D. T., SUN, S. C. The movel comb-type breakwater. **China Civil. Engineering Journal**, v. 36 (10), p. 51-56, 2003.
- PAREDES, G. M., 2008. **Estudo experimental de um sistema offshore para produção de energia das ondas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- PATANKAR, S.V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. McGraw-Hill, New York, 1980.
- PEREIRA, S. R. V. V. DA S., 2010. **Caracterização do sector dos recursos energéticos marinhos para Portugal continental**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa, Portugal.
- ROCHA, L. A. O., LORENTE, S., Bejan, A. Constructal Theory in Heat Transfer. Handbook of Thermal Science and Engineering. 1a.ed.: **Springer International Publishing**, p.1-32, 2017.
- ROSA, P. B. G. **Controle e Otimização de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- 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.
- SCHLICHTING, H. **Boundary Layer Theory**, McGraw-Hill, 7th ed., Nova York, USA, 1979.
- TEDD, J., KOFOED, J. P. Measurements of Overtopping Flow Time Series On the Wave Dragon, Wave Energy Converter. **Renewable Energy**, 2009. v. 34, p. 711–717.
- THORPE, T. W. **A brief review of wave energy**. Harwell Didcort Oxfordshire, UK, 1999.
- VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics – the Finite Volume Method, Longman, England, 1995.
- VICINANZA, D., MARGHERITINI, L., KOFOED, J.P., BUCCINO, M. **The SSG wave energy converter: Performance, status and recent developments**. *Energies* 2012, 5, 193–226.
- ZHANG, T., WANG, Q., WANG, S. **Research on the Flange Plate of the Comb-type Caisson**. MTS/IEEE Oceans, Washington, DC, 2005.
- ZHAO, X. L., NING, D. Z., ZOU, Q. P., QIAO, D. S., CAI, S. Q. Hybrid floating breakwater-WEC system: A review. **Ocean Engineering**, v. 18615, article 106126, 2019.
- ZHAO, X. L., ZHANG, Y., LI, M., JOHANNUNG, L. Hydrodynamic performance of a Comb-Type Breakwater-WEC system: An analytical study. **Renewable Energy**, v. 159, p. 33-49, 2020.