

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

COMPARAÇÃO NUMÉRICA DE UM CONVERSOR DO TIPO GALGAMENTO SOB A
INCIDÊNCIA DE ONDAS REGULARES OU IRREGULARES BASEADAS EM ESTADOS DE
MAR REALÍSTICOS DA COSTA DO RIO GRANDE DO SUL

por

Ricardo Gabriel Hübner

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, dezembro de 2020

COMPARAÇÃO NUMÉRICA DE UM CONVERSOR DO TIPO GALGAMENTO SOB A
INCIDÊNCIA DE ONDAS REGULARES OU IRREGULARES BASEADAS EM ESTADOS DE
MAR REALÍSTICOS DA COSTA DO RIO GRANDE DO SUL

Por

Ricardo Gabriel Hübner

Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida 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. Liércio André Isoldi

Co-orientador: Prof. Dra. Bianca Neves Machado

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Jeferson Avila Souza

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, 02 de dezembro de 2020

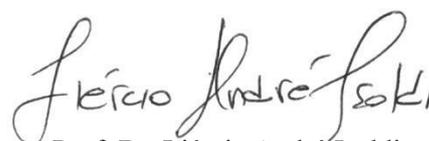
**“COMPARAÇÃO NUMÉRICA DE UM CONVERSOR DO TIPO GALGAMENTO SOB
A INCIDÊNCIA DE ONDAS REGULARES OU IRREGULARES BASEADAS EM
ESTADOS DE MAR REALÍSTICOS DA COSTA DO RIO GRANDE DO SUL”**

RICARDO GABRIEL HUBNER

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

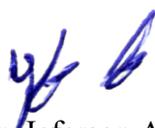
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Orientador – PPGEO/FURG



Profa. Dra. Bianca Neves Machado
Coordenadora - UFRGS



Prof. Dr. Jeferson Avila Souza
Membro Interno – PPGEO/FURG



Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes
Membro Externo – IFPR

Ficha Catalográfica

H879c Hübner, Ricardo Gabriel.

Comparação numérica de um conversor do tipo galgamento sob a incidência de ondas regulares ou irregulares baseadas em estados de mar realísticos da costa do Rio Grande do Sul / Ricardo Gabriel Hübner. – 2020.

78 f.

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

Orientador: Dr. Liércio André Isoldi.

Coorientadora: Dra. Bianca Neves Machado.

1. Modelagem Computacional 2. Estado Realístico de Mar
3. Energia das Ondas 4. Dados Transientes Discretos I. Isoldi, Liércio André II. Machado, Bianca Neves III. Título.

CDU 004:551.466(816.5)

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

AGRADECIMENTOS

Durante esta longa e sinuosa caminhada muitas pessoas estiveram ao meu lado e não mediram esforços para me apoiar nos momentos mais necessários, sem eles não seria possível a conclusão de mais esta etapa em minha formação.

Agradeço aos meus pais, Valter e Marinês, pela garra e perseverança que sempre demonstraram para superar todos os desafios que a vida lhes proporcionou e, desta forma, servirem de exemplo de vida para os seus filhos.

À minha namorada, Jerusa, pela compreensão dos momentos difíceis, apoio e distração na medida certa, sempre que necessário.

Ao meu professor orientador, Liércio, e à minha professora co-orientadora, Bianca, por suas orientações sempre precisas e pontuais.

A todos os governantes que investiram na ciência e tecnologia deste país.

À CNPq pela bolsa de estudos e auxílio financeiro recebido.

RESUMO

O presente estudo numérico objetiva avaliar a diferença no comportamento fluidodinâmico de um dispositivo de galgamento sob a incidência de ondas irregulares de um estado de mar realístico quando comparado à incidência de ondas regulares representativas deste estado de mar, considerando dados de mar de 3 pontos da costa do Rio Grande do Sul. Para a modelagem computacional o software Fluent[®], baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF) foi utilizado. A geração numérica das ondas irregulares e regulares, deu-se através da imposição da condição de contorno de velocidade de entrada do canal por meio de dados transientes discretos das velocidades orbitais de propagação das ondas nos sentidos horizontal e vertical. Para o tratamento adequado da interação água-ar foi empregado o modelo multifásico *Volume of Fluid*. No final do canal é imposta uma região de dissipação da energia das ondas (praia numérica), que permite a obtenção de resultados para 15 min de simulação. Os resultados para a quantidade de água que galgou a rampa e foi acumulada no reservatório mostraram que o comportamento fluidodinâmico do dispositivo de galgamento tem alterações significativas quando comparadas as duas abordagens propostas. Para os 3 pontos da costa analisados, o dispositivo de galgamento acumulou maior quantidade de água no reservatório e também apresentou comportamento mais estável quando sob a incidência das ondas regulares representativas do estado de mar do que quando sob a incidência das ondas irregulares do estado mar. Diferenças de até 350% foram encontradas para a massa de água acumulada no reservatório do conversor do tipo galgamento, demonstrando assim evidências de que os resultados podem estar sendo superestimados quando o dispositivo é simulado sob a incidência de ondas regulares representativas.

Palavras-chaves: Modelagem Computacional, Estado Realístico de Mar, Energia das Ondas, Dados Transientes Discretos.

ABSTRACT

The present numerical study aims to evaluate the difference in the fluid dynamics behavior of a overtopping device under the incidence of irregular waves in a realistic sea state when compared to the incidence of regular waves representative of this sea state, considering sea data from 3 points on the coast from Rio Grande do Sul, Brazil. For the computational modeling the Fluent[®] software, based on Finite Volume Method (MFV), was employed. The numerical generation of irregular and regular waves occurred through the imposition of the velocity boundary condition using transient discrete values. The volume of fluid (VOF) multiphase model was applied in the treatment of the water-air interaction. At the end of the numerical wave tank, a region of wave energy dissipation, called numerical beach, was imposed allowing results for 15 min of simulation. The results for the amount of water that climbed and was accumulated in the reservoir showed that the fluid dynamic behavior of the overtopping device has significant changes when comparing the two proposed approaches. For the 3 coast points analyzed, the overtopping device accumulated more water in the reservoir and also showed a more stable behavior when under the incidence of regular waves then when under the incidence of irregular waves. Differences of up to 350% were found for the water mass accumulated in the reservoir of the overtopping device, showing evidences that the results may be overestimated when the device is simulated under the incidence of representatives regular waves.

Keywords: Computational Modeling, Realistic Sea, Wave Energy, Transient discrete values.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Motivação e Justificativa	20
1.2. Objetivos	22
1.3. Estado da Arte	23
1.3.1. Geração e propagação de ondas regulares em canais numéricos	23
1.3.2. Geração e propagação de ondas irregulares	27
1.3.3. Dispositivo conversor de energia das ondas do tipo galgamento sob a incidência de ondas regulares	29
1.3.4. Dispositivo conversor de energia das ondas do tipo galgamento sob a incidência de ondas regulares	34
2. FUNDAMENTOS DE MECÂNICA DAS ONDAS	36
3. MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA	41
3.1. Fundamentos do Métodos de Volumes Finitos	41
3.2. Modelo Multifásico VOF	44
3.3. Demais Procedimentos Numéricos Utilizados	45
4. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E METODOLOGIA DE GERAÇÃO DA ONDA	47
4.1. Domínio Computacional	47
4.2. Fontes dos dados (Spec2Wave)	49
4.3. Batimetrias Locais	50
5. RESULTADOS	52
5.1. Análise Estatística dos dados de onda	52
5.2. Teoria de Onda Aplicável	54
5.3. Verificação do Modelo Numérico para Geração das Ondas	55
5.4. Verificação do Modelo Numérico na Região do Dispositivo	61
5.4. Comparação das Ondas considerando um Dispositivo de Galgamento localizado no município de Rio Grande	63
5.5. Comparação das Ondas considerando um Dispositivo de Galgamento localizado no município de Santa Vitória do Palmar	67
5.6. Comparação das Ondas considerando um Dispositivo de Galgamento localizado no município de Tavares	69

5.7. Análise dos resultados obtidos para as três localidades estudadas	71
6. CONCLUSÃO	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Capacidade Mundial de Geração de Energia, por recurso, 2008 – 2018 (Fonte: Adaptado de REN21, 2018).	13
Figura 1.2 - Percentual de produção de energia elétrica por fonte de energia para o ano de 2018 (Fonte: Adaptado de REN21, 2019).	14
Figura 1.3 - Percentual energético global (Fonte: Mork et al., 2010).	14
Figura 1.4 - Distribuição do potencial energético médio na costa brasileira. (Fonte: Espindola e Araújo, 2017).	15
Figura 1.5 - Matriz Elétrica Brasileira Ano Base 2018 (Fonte: EPE, 2019).	18
Figura 1.6 - Domínio computacional utilizado por Gomes et al. (2009).	20
Figura 1.7 - Domínio computacional utilizado por Zabihi et al. (2015).	21
Figura 1.8 - Subdivisão da região de imposição da condição de contorno de velocidade prescrita para a metodologia WaveMIMO (Fonte: Machado et al., 2017).	22
Figura 1.9 - Domínio Computacional e Malhas propostas para solução dos problemas de convergência na aplicação da metodologia Table Data com malha stretched (Fonte: Kisner et al., 2018).	23
Figura 1.10 - Domínio computacional utilizado por Lisboa et al. (2016).	25
Figura 1.11 - Domínio computacional utilizado por Goulart et al., (2015).	27
Figura 1.12 - Domínio espacial e malha estruturada com maior refinamento na região de propagação da onda e do dispositivo (Fonte: Martins et al., 2017).	27
Figura 1.13 - Equipamento experimental estudado por Liu et al. (2017a).	28
Figura 1.14 - Modelo Experimental de um dispositivo de galgamento circular flutuante proposto por Liu et al. (2017b).	29
Figura 1.15 - Comparação entre os resultados experimentais e numéricos obtidos por Han et al. (2018).	29
Figura 1.16 – Curvas para a rampa do dispositivo testadas por Barbosa et al. (2019).	30
Figura 2.1 - Processo de geração de ondas de vento (Fonte: Patterlini, 2009)	32
Figura 2.2 - Características da Onda (Fonte: Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991).	32
Figura 2.3 - Aplicabilidade das teorias de ondas (Fonte: Adaptado de Chakrabarti (2005).	34
Figura 2.4 - Exemplo de possíveis dados de elevação da superfície livre de um estado de mar real (Fonte: Adaptado de Dean e Dalrymple (1991).	35
Figura 2.5 - Onda complexa obtida através da soma de duas ondas senoidais (Fonte: Dean e Dalrymple (1991).	35
Figura 2.6 - Exemplo de um espectro de frequência de um estado realístico de mar.	36
Figura 3.1 - Função do Método Numérico (Fonte: Maliska, 2004).	37

Figura 3.2 - Volume elementar para os balanços de conservação (Fonte: Malisa, 2014).	38
Figura 3.3 - Conexões espacial e temporal de um volume "P". (Fonte: Adaptado de Maliska, 2004).	40
Figura 4.1 - Domínio computacional bidimensional de um dispositivo de galgamento.	43
Figura 4.2 - Região de imposição de condição de contorno de velocidade para a geração da onda através de dados transientes discretos. (Fonte: Adaptado de Machado et al., 2017).	44
Figura 4.3 - Pontos disponíveis para análise no Spec2Wave.	45
Figura 4.4 – Batimetrias do ponto P6, na costa de Rio Grande.	46
Figura 4.5 – Batimetria do ponto P2, na costa de Santa Vitória do Palmar.	46
Figura 4.6 – Batimetria do ponto P10, na costa de Tavares.	46
Figura 5.1 - Histograma de frequência de ocorrência de cada estado de mar para o ponto P6 na costa de Rio Grande no ano de 2014.	47
Figura 5.2 - Histograma de frequência de ocorrência de cada estado de mar para o ponto P2 na costa de Santa Vitória do Palmar no ano de 2014.	48
Figura 5.3 - Histograma de frequência de ocorrência de cada estado de mar para o P10 na costa de Tavares no ano de 2014.	48
Figura 5.4 - Teoria de onda regular aplicável para cada local estudado.	49
Figura 5.5 - Referências de malhas utilizadas no presente trabalho.	50
Figura 5.6 - Teste de qualidade de malha para Região 1.	51
Figura 5.7 – Avaliação do comprimento da Região 1 do domínio computacional.	53
Figura 5.8 - Teste de independência de passo de tempo.	54
Figura 5.9 – Geração de ondas regulares: 0 a 150 s.	54
Figura 5.10 – Geração de ondas regulares: 150 a 300 s.	55
Figura 5.11 – Geração de ondas regulares: 300 a 450 s.	55
Figura 5.12 – Geração de ondas regulares: 450 a 600 s.	55
Figura 5.13 – Geração de ondas regulares: 600 a 750 s.	56
Figura 5.14 – Geração de ondas regulares: 750 a 900 s.	56
Figura 5.15 – Ilustração do Domínio Computacional do canal de ondas considerando o dispositivo de galgamento.	57
Figura 5.16 – Comparação da vazão mássica para $[\Delta x]_{RD} = 50, 75, 100$ e 125 volumes por comprimento de onda.	57
Figura 5.17 - Elevação da superfície livre obtida com as ondas regulares e irregulares para o ponto P6, na costa de Rio Grande.	59
Figura 5.18 - Vazão mássica na entrada do reservatório para a ondas regulares e irregulares para o ponto P6, na costa de Rio Grande.	59

Figura 5.19 - Comportamento fluidodinâmico do dispositivo no instante em que ocorrem as máximas vazões na entrada do reservatório para o ponto P6, na costa de Rio Grande.	61
Figura 5.20 - Comportamento fluidodinâmico do problema para o ponto P6, na costa de Rio Grande, no instante $t = 800$ s.	62
Figura 5.21 - Comportamento fluidodinâmico do problema para o ponto P6 na costa de Rio Grande, no final da simulação.	62
Figura 5.22 – Elevação da superfície livre obtida com as ondas regulares e irregulares para o ponto P2, na costa de Santa Vitória do Palmar.	63
Figura 5.23 – Vazão mássica na entrada do reservatório para as ondas regulares e irregulares para o ponto P2, na costa de Santa Vitória do Palmar.	64
Figura 5.24 - Elevação da superfície livre obtida com as ondas regulares e irregulares para o ponto P10, na costa de Tavares.	65
Figura 5.25 - Vazão mássica na entrada do reservatório para as ondas regulares e irregulares para o ponto P10, na costa de Tavares.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1. Principais características dos espectros de onda analisados.	49
Tabela 5.2. Influência na qualidade de malha na Região 1 da Fig. 5.5.	52
Tabela 5.3. Teste do comprimento da Região 1 da Fig. 5.5.	53
Tabela 5.4. Teste de independência de malha no dispositivo.	58
Tabela 5.5. Resumo das principais características da onda de Rio Grande	58
Tabela 5.6. Resumo das principais características da onda de Santa Vitória do Palmar	63
Tabela 5.7. Resumo das principais características da onda de Tavares.	65

LISTA DE SÍMBOLOS

- L – Comprimento da onda [m];
- a – Amplitude da onda [m];
- H – Altura da Onda [m];
- h – Profundidade [m];
- η – Elevação da Superfície Livre da Água [m];
- C – Celeridade da onda [m/s];
- k – Número da onda [1/m];
- ω – Frequência da onda [1/s];
- t – Tempo [s];
- x – Coordenada horizontal [m];
- z – Coordenada vertical [m];
- u – Velocidade horizontal [m/s];
- w – Velocidade vertical [m/s];
- Δ – Variação;
- ρ – Massa específica [kg/m³];
- H_s – Altura significativa [m];
- T_p – Período de pico [s];
- g – Aceleração da gravidade [m/s²];
- C_1 – Coeficiente de amortecimento linear;
- C_2 – Coeficiente de amortecimento quadrático;
- z_{fs} – Coordenada vertical da superfície [m];
- z_b – Coordenada vertical do fundo [m];
- x_s – Coordenada horizontal do início da região de praia numérica [m];
- x_e – Coordenada horizontal do fim da região de praia numérica [m]

LISTA DE ABREVIATURAS

CFD – Dinâmica dos Fluidos Computacional

UDF – Função Definida pelo Usuário

VOF – *Volume of Fluid*

MVF – Método dos Volumes Finitos

JONSWAP – *Joint North Sea Wave Project*

1. INTRODUÇÃO

A demanda da humanidade por energia é crescente e, segundo Fontana et al. (2015), este fato ocorre devido ao crescimento populacional nos países subdesenvolvidos e ao elevado consumo energético dos países desenvolvidos. De acordo com o Relatório Planeta Vivo, divulgado em 2018 pela organização não governamental *World Wide Fund for Nature (WWF)*, a partir do ano de 1971 a capacidade dos ecossistemas se regenerarem é menor do que a demanda mundial por recursos naturais (WWF, 2018). Desta forma, é necessário reduzir o consumo mundial de fontes esgotáveis e não renováveis de energia.

A utilização de recursos renováveis para a produção de energia elétrica é um importante fator para que os recursos naturais não sejam esgotados. Segundo REN21 (2019) o investimento e a capacidade de se produzir energia através de fontes renováveis tem aumentado anualmente, como pode ser observado na Fig. 1.1. (REN21, 2019).

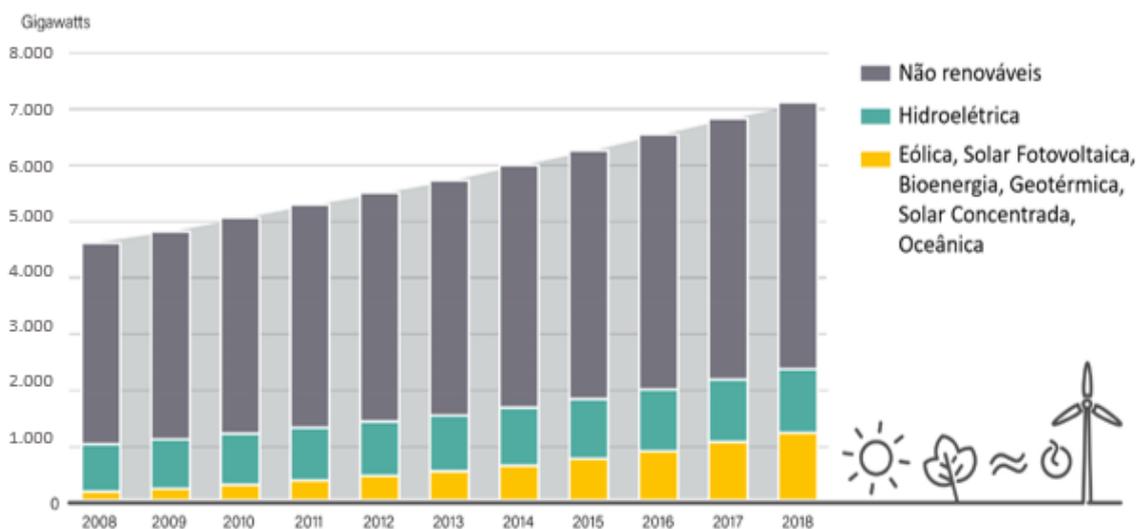


Figura 1.1 - Capacidade Mundial de Geração de Energia, por recurso, 2008 – 2018 (Fonte: Adaptado de REN21, 2019).

Apesar dos incrementos anuais na capacidade mundial de produção de energia renovável, esta forma de energia representou, em 2018, apenas 10,6% da energia total consumida no mundo. Onde, somadas energia eólica, solar, geotérmica e oceânica representaram apenas 2,0% do total. Analisando apenas o consumo de energia elétrica no ano de 2018, este percentual chega a 26,2% para fontes renováveis de energias, sendo que energia geotérmica, solar concentrada e oceânica produzem juntas apenas 0,4% do total de energia elétrica consumida no planeta e a energia hidroelétrica produz sozinha 15,8 % deste percentual, como pode ser observado na Fig. 1.2. (REN21, 2019).

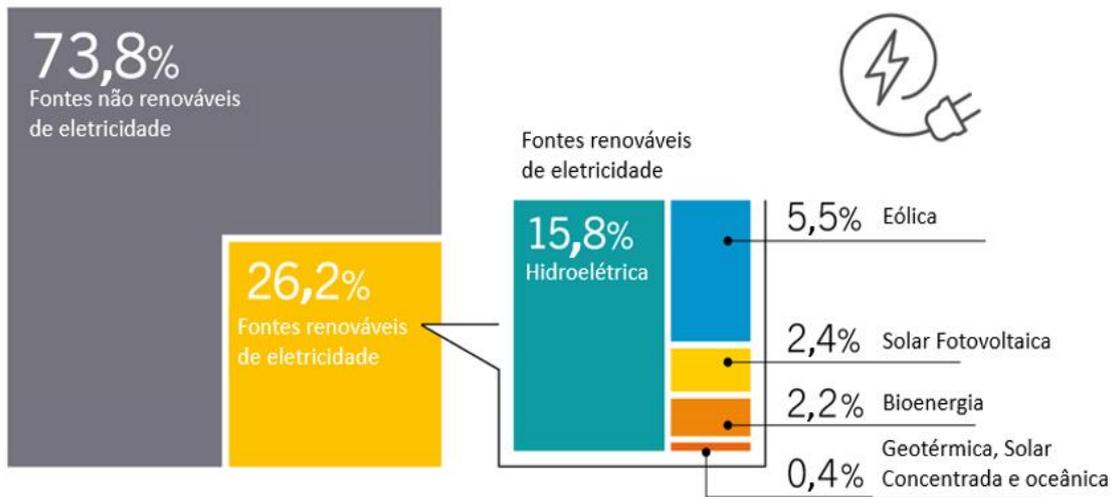


Figura 1.2 - Percentual de produção de energia elétrica por fonte de energia para o ano de 2018 (Fonte: Adaptado de REN21, 2019).

Segundo Mork et al. (2010) o potencial energético dos oceanos é de aproximadamente 3,7 TW. Porém, este potencial chega a 2,9 TW quando excluídas regiões das geleiras e com potencial inferior a 5 kW/m de frente de onda. A Figura 1.3 apresenta a distribuição do potencial energético dos oceanos.

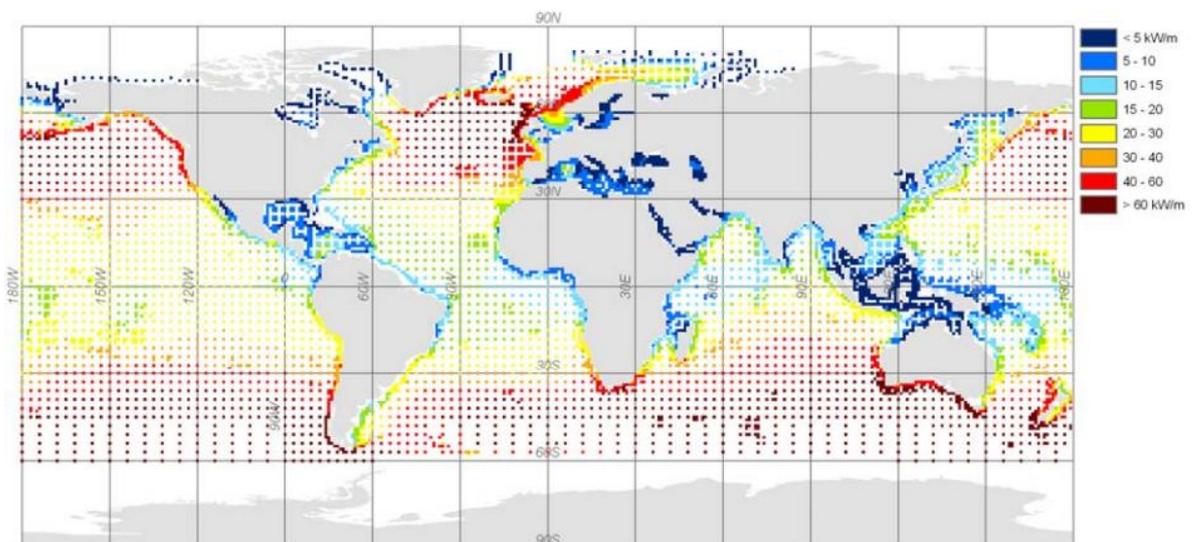


Figura 1.3 - Potencial energético global (Fonte: Mork et al., 2010).

Devido à extensa costa, aproximadamente 7.500 km, o Brasil possui potencial promissor para exploração da energia contida nas ondas. Segundo Espindola e Araujo (2017), o potencial anual total

estimado para costa brasileira é de 89,97 GW e o ponto com o maior potencial energético fica localizado na região sul do país e atinge a média de 20,63 kW/m de frente de onda. Além disso, os autores concluíram que o oceano incidente na costa brasileira possui baixa variação temporal, o que, facilitaria a instalação de equipamentos conversores de energia das ondas nestes locais. Ainda, na Fig. 1.4 é possível observar a distribuição do potencial energético médio da região analisada.

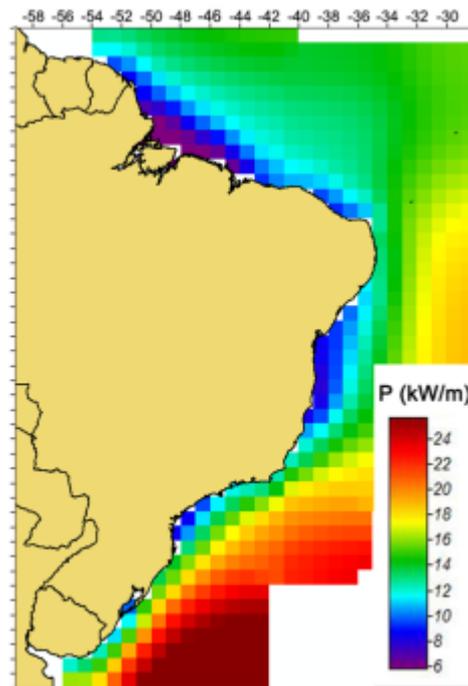


Figura 1.4 - Distribuição do potencial energético médio na costa brasileira (Fonte: Espindola e Araújo, 2017).

Diversos estudos foram e ainda são realizadas com o objetivo de determinar a melhor forma de aproveitar o potencial energético das ondas do mar. Segundo Pecher & Kofoed (2017), a primeira patente de um dispositivo utilizado para conversão de energia das ondas em energia elétrica foi registrada em 1799 e as primeiras tentativas de conversão desta fonte de energia foram realizadas no século XVIII.

Distintos princípios físicos de dispositivos de conversão de energia das ondas são estudados e testados. De acordo com Falcão (2010) estes dispositivos podem ser classificados em três princípios físicos diferentes, como:

- Coluna D'água Oscilante: Estrutura Fixa ou Flutuante;
- Corpos Oscilantes: Flutuante ou Submerso;
- Galgamento: Estrutura Fixa ou Flutuante.

Além disso, outros princípios físicos são apresentados na literatura, como por exemplo a placa

horizontal submersa, como em Seibt et al (2014).

Os dispositivos conversores de energia das ondas ainda podem ser classificados de acordo com a sua localização. Assim como as estruturas oceânicas em geral, os dispositivos de conversão instalados na costa ou que podem ser acessados por terra são chamados de *onshore*; Já aqueles localizados próximo à costa e com 8 a 20 m de profundidade são chamados de *near-shore* e aqueles mais distantes da costa e com profundidade maiores do que 20 m são os *offshore* (Cruz e Sarmento, 2004).

O dispositivo de galgamento, escopo do presente estudo, se destaca pela possibilidade de construção de equipamento robusto e resistente. Este dispositivo é composto, basicamente, por uma rampa, um reservatório e uma turbina de baixa queda para conversão de energia das ondas em energia elétrica. Seu princípio físico de funcionamento baseia-se no galgamento da rampa pelas ondas oceânicas que, logo após, incidem no reservatório formando uma coluna d'água. Esta água é direcionada para as turbinas, que, por sua vez, giram e geram energia (Falcão, 2010).

Estudos práticos e em escala real são importantes para que o conhecimento do princípio físico de funcionamento dos dispositivos seja ampliado, porém são de alto custo e de lenta aplicação. Estudos práticos em escala laboratorial também são importantes, porém em alguns casos também podem apresentar custos elevados e riscos à segurança. Estes fatos aliados ao desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento, tornaram a modelagem computacional uma realidade para solução de problemas complexos de engenharia e da física. Os métodos numéricos são amplamente aplicados em problemas complexos de engenharia e física, pois, representam adequadamente problemas reais que são difíceis de reproduzir em escala real ou laboratorial. Desta forma, resta ao projetista na engenharia moderna associar adequadamente a solução numérica com experiências selecionadas em laboratório, isso resultará em um projeto melhor e mais barato (Maliska, 2004).

O presente trabalho utiliza a modelagem computacional para reproduzir o princípio de funcionamento de um dispositivo de galgamento, submetido a dois tipos de ondas: regulares e irregulares. A partir de um estado de mar realístico, ondas regulares representativas desse estado mar e ondas irregulares que o reproduzem, são geradas numericamente em um canal de ondas. Para isso, três diferentes pontos da costa do Rio Grande do Sul foram considerados, permitindo comparar o comportamento fluidodinâmico do conversor tipo galgamento quando submetido às ondas regulares e irregulares. Para a geração computacional das ondas será utilizada a metodologia proposta por Machado et al. (2017), esta metodologia consiste na imposição de condições de contorno de velocidade prescrita a partir de dados transientes discretos das velocidades orbitais de propagação da

onda nos sentidos horizontal e vertical.

1.1. Motivação e Justificativa

A necessidade de inovar tecnologicamente, de explorar a energia disponível nos oceanos – até o momento pouco explorada – e da possibilidade de resolver problemas complexos de engenharia de uma maneira confiável, segura e de baixo custo motivam e justificam a realização do presente trabalho. Somados, também, a necessidade de a humanidade utilizar os recursos disponíveis de uma maneira mais sustentável e menos danosa ao planeta Terra.

No ano de 2015 o Brasil, junto com outros 194 países, assinou o acordo de Paris. Este acordo objetivava manter o aumento da temperatura média global em menos de 2°C ao ano. Para o alcance do objetivo deste acordo, cada país trabalhou na elaboração de metas específicas para redução dos gases de efeito estufa. No Brasil, em 12 de setembro de 2016, o Congresso Nacional aprovou a ratificação do Acordo de Paris, reafirmando o compromisso e as metas assumidas. Dentre os compromissos assumidos pelo país, destacam-se (MMA, 2016):

- reduzir a emissão dos gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, até 2025;
- reduzir a emissão dos gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005, até 2030;

De forma a atingir estes objetivos, o país se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia sustentável em sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de floresta, bem como, alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição de sua matriz energética em 2030 (MMA, 2016).

Segundo Friedlingstein et al. (2019) a emissão total de Dióxido de Carbono (CO₂) no mundo segue em tendência de crescimento, mesmo após o Acordo de Paris. Impulsionado, principalmente, pelo crescimento na emissão de CO₂ pela China, que atualmente é o país que mais o emite, seguido pelos Estados Unidos. Se esta comparação for realizada em relação à emissão per capita, os Estados Unidos passa a figurar como o país com maior emissão de CO₂ por habitante.

De acordo com EPE (2019), as energias renováveis representaram, no ano de 2018, 45,3% da oferta interna de energia na matriz energética brasileira, enquanto no restante do mundo a média é de 13,7%. Destaca-se a energia proveniente de hidroelétricas representando 12,6% (incluindo importação) da matriz energética nacional, a biomassa da cana, lenha e carvão vegetal – emissoras de gases de efeito estufa – representam 25,8% da matriz. Por fim, lixívia e outras fontes representam apenas 6,9% da matriz energética brasileira.

Quando contabilizada apenas energia elétrica, no ano de 2018, as fontes renováveis representaram 83,3% do total de energia ofertada no país (EPE, 2019), enquanto no mundo o

percentual era de apenas 26,4% no mesmo ano (REN21, 2019). Estes dados mostram que o Brasil está à frente da média mundial em relação à oferta de energia proveniente de fontes renováveis. Porém, a energia proveniente da fonte hidráulica representa, sozinha, 66,6% do percentual da energia elétrica consumida no país, conforme pode ser observado na Fig. 1.5. Além disso, o Brasil não é autossuficiente na geração de energia e precisou importar cerca de 35 TWh de energia elétrica no ano de 2018 (EPE, 2019).

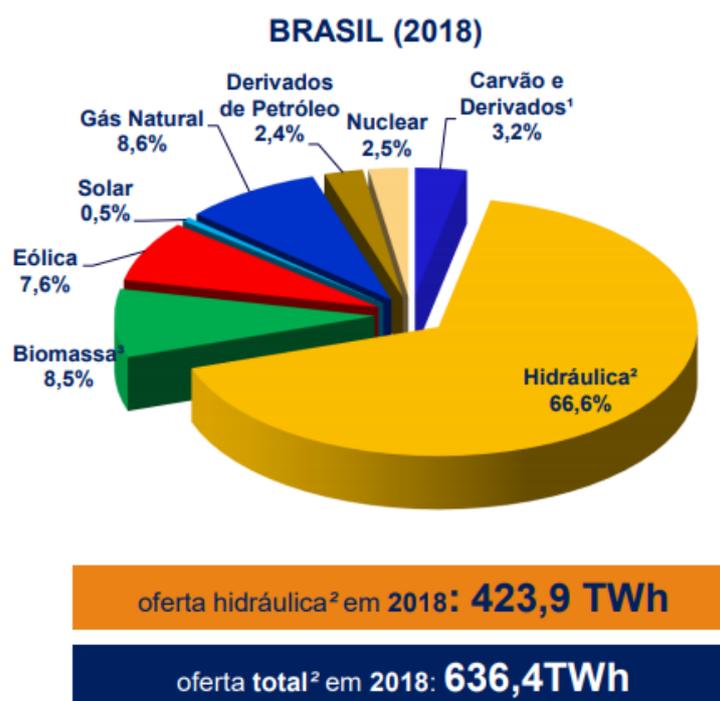


Figura 1.5. Matriz Elétrica Brasileira Ano Base 2018 (Fonte: EPE, 2019).

Apesar de a Matriz Energética nacional apresentar maior participação de energia renovável quando comparada à média mundial, a emissão de gases do efeito estufa tem aumentado no país e a projeção é que a meta do Acordo de Paris não seja atingida. Isso acontece porque algumas das fontes de energia ditas como renováveis também são emissoras destes gases e, além disso, o país não tem conseguido diminuir o consumo de fontes de energia emissoras dos gases de efeito estufa (renováveis ou não). Neste cenário, considera-se importante que a capacidade de produção de energia limpa aumente no país e, portanto, este trabalho é inserido no contexto de estudar uma forma alternativa de produção de energia renovável e limpa ainda não explorada comercialmente no Brasil.

Além das questões energéticas e ambientais mencionadas, segundo Romanowski et al. (2019) na literatura atual ainda há uma lacuna em relação à estudos de CFD (Dinâmica de Fluidos Computacional) que envolvem modelagem de estados de mar reais, irregulares e até extremos. A

ferramenta mais utilizada atualmente para geração de estados de mar irregulares é a superposição de efeitos com um número específico de ondas e respectivos períodos, no entanto estas simulações abrangem um pequeno intervalo de tempo e uma onda prescrita padronizada (onda regular). Desta forma, avanços nesta área podem gerar significativa contribuição não só para modelagem de dispositivos de conversão de energia, mas também para várias outras estruturas marítimas como navios, plataformas, pontes, entre outros.

O presente trabalho utilizará uma forma ainda pouco utilizada na literatura para imposição da condição de contorno de velocidade prescrita que tem potencial para simular ondas irregulares de estados realísticos de mar, avaliando o comportamento fluidodinâmico tanto sob a incidência de ondas regulares representativas, quanto para ondas irregulares de um estado de mar realístico. Sendo assim, esta será também uma contribuição do presente estudo para a literatura atual.

Além disso, outra contribuição – que motiva a realização do presente trabalho – é o fato de que, no final do canal de ondas será imposta uma região de praia numérica aliada a um perfil hidrostático que permite tempos maiores de simulação. A maioria dos trabalhos encontrados na literatura a respeito do dispositivo de galgamento obtém dados entre 2 ou 3 minutos de simulação. Com a metodologia aplicada, o presente trabalho irá obter dados de até 15 min de simulação, com potencial para simular um tempo ainda maior, caso desejado.

1.2. Objetivos

No presente trabalho é realizada uma abordagem numérica do princípio físico de funcionamento de um conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo galgamento. Tem-se como objetivo, comparar um modelo numérico bidimensional do dispositivo de galgamento submetido a um estado de mar realístico (ondas irregulares) e à incidência de ondas regulares (representativas do estado de mar realístico), considerando diferentes pontos da costa do Rio Grande do Sul.

Os objetivos específicos do presente estudo são:

- obter dados realísticos de mar e da onda regular representativa deste estado de mar para diferentes pontos localizados na costa do Rio Grande do Sul;
- gerar um domínio computacional para o ponto localizado na costa de Rio Grande, RS;
- realizar o teste de independência de malha para geração da onda através da metodologia proposta em Machado et al. (2017);
- realizar a verificação da geração das ondas regulares e do estado de mar realístico (ondas irregulares);

- adicionar o dispositivo de galgamento, baseado em Martins et al. (2017a), no canal de ondas numérico;
- realizar o teste de independência de malha para a região do dispositivo;
- simular numericamente o princípio de funcionamento do dispositivo de galgamento sob a incidência das ondas regulares e do estado de mar realístico (ondas irregulares);
- avaliar as diferenças de desempenho do dispositivo de galgamento sob a incidência das ondas regulares e irregulares.

1.3. Estado da Arte

Visando a organização do trabalho e, desta forma, facilitar a compreensão do texto o estado da arte foi dividido em duas partes: a primeira apresentará principalmente os estudos focados na geração de ondas numéricas. Enquanto, a segunda parte, apresentará artigos relacionados ao dispositivo de conversão de energia do tipo galgamento. Para cada uma das seções são apresentadas, em um primeiro momento, estudos que utilizaram ondas regulares e, posteriormente, artigos que utilizaram ondas irregulares.

1.3.1. Geração e propagação de ondas regulares em canais numéricos

Os próximos parágrafos apresentarão as principais contribuições encontradas na literatura referente à geração e propagação de ondas regulares em canais numéricos.

Em Gomes et al. (2009) foi utilizado o software baseado em CFD, o Fluent[®], para estudar e comparar duas diferentes formas para gerar a onda em um canal de ondas numérico (Fig. 1.6). Na primeira forma proposta, a geração da onda se dá através de uma parede móvel na lateral esquerda do domínio computacional aliada a uma malha móvel nas proximidades desta. Neste caso, uma Função Definida pelo Usuário (UDF), que é uma ferramenta disponibilizada pelo software, foi utilizada para descrever o movimento da parede em função do tempo, a qual, realiza um movimento de pistão agitando a água e, conseqüentemente, gerando a onda; a segunda forma analisada utiliza-se também de uma UDF, porém, neste caso, a função é utilizada para descrever a condição de contorno de velocidade prescrita na lateral esquerda do canal de ondas, gerando assim, a onda numérica. Em ambos os casos, foi estudada a geração de uma onda de Stokes de 2^a Ordem e a interação água-ar foi tratada utilizando-se a metodologia *Volume of Fluid* (VOF). Os autores realizaram várias simulações para diferentes características de onda e do canal de ondas, concluindo que as formas de geração de ondas analisadas apresentaram comportamento similar e representaram adequadamente a propagação de uma onda regular.

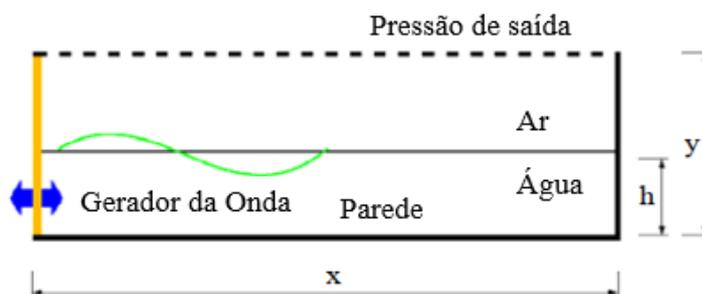


Figura 1.6 – Domínio computacional utilizado por Gomes et al., (2009).

Em Gomes et al. (2012) foi realizada uma análise de malhas para geração de ondas em canal de ondas. A solução numérica das equações da conservação da massa e da quantidade de movimento foi realizada com o software ANSYS Fluent[®]. Para a imposição da condição de contorno de velocidade prescrita foi utilizada uma função definida pelo usuário que, neste caso, impõe as componentes de velocidade na lateral do canal a partir da teoria de onda selecionada e para o tratamento adequado da interação entre água e ar foi utilizado o modelo multifásico VOF, disponível no software. O estudo foi realizado em escala laboratorial, considerando 4 conjuntos de malha, onde, cada conjunto apresentou diferentes refinamentos. Foi possível observar que uma malha estruturada, com maior refinamento na região entre a crista e cava – 15 volumes – e 50 volumes no comprimento da onda, obteve acurácia nos resultados, aliado a um baixo esforço computacional.

Em Zabihi et al. (2015), foram comparados dois diferentes softwares numéricos capazes de gerar ondas regulares em um tanque de ondas numérico: Fluent[®] e Flow-3D[®]. Os dois modelos são baseados nas equações de Navier-Stokes e no modelo multifásico VOF. Neste estudo, além de comparar os dois softwares, foi realizada uma investigação de uma forma de dissipar a energia da onda no final de sua propagação, impedindo ou amenizando o fenômeno de reflexão da onda. A forma proposta para dissipar a energia foi a utilização de uma rampa localizada no final do domínio computacional, ilustrado na Fig. 1.7. Em relação aos dois softwares utilizados, os autores concluíram que ambos apresentaram resultados similares, entretanto os resultados obtidos através do Fluent[®] apresentaram uma ligeira defasagem em relação à teoria de ondas. Já em relação à rampa utilizada no final do canal, foram investigadas 4 diferentes inclinações para a rampa, onde os autores concluíram que a inclinação mínima deveria ser de 1:35.



Figura 1.7 - Domínio computacional utilizado por Zabihi et al., (2015).

Já Saincher e Banerjee (2015) desenvolveram um canal experimental de ondas em escala laboratorial e um canal de ondas numérico e compararam os resultados de ambos os estudos com os resultados analíticos. O canal numérico foi baseado no modelo multifásico VOF e nas equações governantes de Navier-Stokes. Para a geração da onda regular, foi utilizada a queda de uma massa no interior do tanque de ondas. Na extremidade esquerda foi utilizada uma combinação de amortecimento das velocidades, assim como uma malha mais grosseira para auxiliar no amortecimento da onda. Enquanto, na extremidade direita, foi utilizada uma combinação entre malha mais grosseira e uma condição de contorno de *Sommerfeld* (radiação) para evitar reflexões. O canal experimental de ondas foi construído de material acrílico, a onda foi gerada por um batedor e, no final do dispositivo, foi construída uma rampa com o objetivo de amenizar os efeitos de reflexão. Os autores concluíram que o tanque de ondas numérico utilizado capturou adequadamente a elevação da superfície livre da água e as características do trem de ondas progressivo, entretanto, foram encontradas discrepâncias entre a solução analítica e a numérica em relação ao movimento de uma partícula de água.

Machado et al. (2017), apresentaram um método para geração de ondas regulares utilizando o software ANSYS Fluent[®], em um canal de ondas numérico. Este método consiste em inserir dados discretos transientes na condição de contorno de velocidade de entrada do canal de ondas. Para a inserção destes dados, a região do canal de ondas onde é imposta a condição de contorno de velocidade prescrita é dividida em sub-regiões, conforme apresenta a Fig. 1.8. Neste trabalho, foi gerada uma onda regular de Stokes de 2^a ordem através dos dados discretos transientes e comparada a geração desta mesma onda através imposição das componentes de velocidades verticais e horizontais da onda a partir da teoria selecionada. Além disso, foram realizados estudos em escala real e em escala laboratorial. Foi utilizado também o modelo multifásico VOF para tratamento da interação entre água-ar. Os autores concluíram que a diferença entre as ondas geradas é praticamente nula (0,001%), também, foi possível observar que imposição de dados transientes discretos reduziu em praticamente 30% o tempo de simulação para o mesmo caso. Ainda, foi observado que esta forma

de geração da onda também poderá ser utilizada para representação de estados realísticos de mar (ondas irregulares).

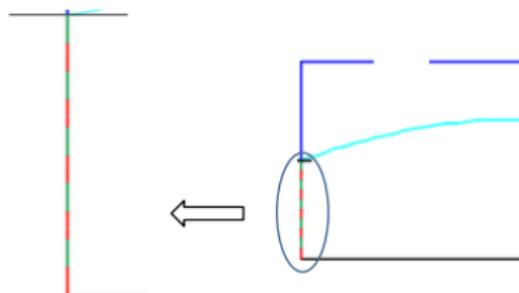


Figura 1.8 - Subdivisão da região de imposição da condição de contorno de velocidade prescrita utilizando dados discretos transientes (Fonte: Machado et al., 2017).

Em Miranda et al. (2018), foi realizada uma análise da influência das condições de contorno no efeito de reflexão na simulação numérica de ondas oceânicas. Neste estudo foi utilizado o software Fluent[®] para a solução das equações de conservação da massa e de quantidade de movimento e, para o tratamento da interação entre água e ar, foi utilizado o modelo multifásico VOF. Foram testadas 3 condições de contorno distintas para análise de sua influência sob o fenômeno de reflexão da onda: parede vertical no final do tanque; rampa no final do tanque e região de absorção com perfil hidrostático no final do tanque. Foi possível concluir que a utilização de uma região de absorção com um perfil hidrostático no final do tanque – também chamado de praia numérica – é o mais adequado para eliminar o fenômeno de reflexão da onda e possibilita experimentos numéricos em uma escala de tempo maior em relação aos demais modelos analisados.

Em Kisner et al. (2018), foi estudada a aplicação da malha estruturada com maior refinamento na região de propagação da onda, aliada à geração da onda através de dados transientes discretos, proposta em Machado et al. (2017), já que nos trabalhos anteriores esta forma de imposição da condição de contorno de velocidade de entrada havia sido aplicada apenas em malha regular. Para isto foram avaliadas duas malhas: a primeira, com 3 subdivisões do domínio computacional: apresentando, na primeira região, malha retangular estruturada; na segunda região, malha triangular não estruturada; por fim, na terceira região, malha retangular estruturada; na segunda malha o domínio foi subdividido em duas regiões, utilizando-se apenas as regiões com malha triangular não estruturada e malha retangular estruturada. A Figura 1.9 apresenta o domínio computacional e malhas utilizadas no trabalho. Foi concluído que ambas as malhas permitiram melhorar significativamente a convergência dos resultados numéricos quando comparadas às malhas estruturadas desde o início do canal, quando aplicadas à geração de ondas monocromáticas através de dados discretos transientes

em um canal de ondas numérico.

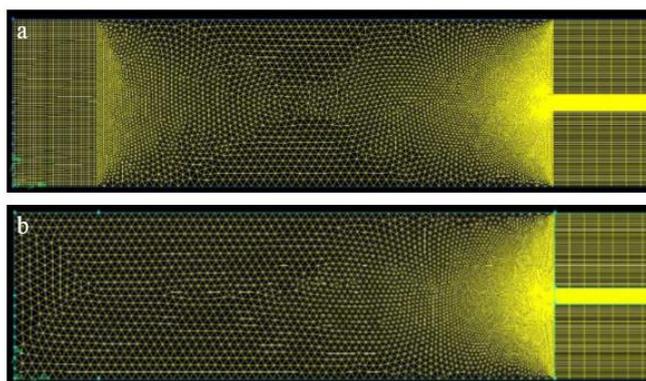


Figura 1.9 - Domínio Computacional e Malhas propostas para solução dos problemas de convergência do modelo numérico que utiliza dados discretos transientes (Fonte: Kisner et al., 2018).

Machado et al. (2018), utilizaram o ANSYS Fluent[®] para estudar a geração e propagação de ondas regulares de Stokes de 2ª Ordem. Os autores utilizaram a metodologia multifásica VOF para tratamento da interação entre água e ar. Neste trabalho foi apresentada uma otimização de um tanque de ondas numérico onde avaliaram as metodologias para geração da onda, o comprimento do tanque, a malha empregada, o passo de tempo utilizado e a inclinação da rampa adicionada no final do tanque para amortecimento da onda. Após o trabalho de otimização realizado, a onda gerada pelos autores no tanque de onda numérico otimizado apresentou um erro máximo de 0,9% quando comparada à onda teórica.

1.3.2. Geração e propagação de ondas irregulares

Os próximos parágrafos do texto apresentarão importantes contribuições acerca de simulação computacional de ondas irregulares.

Em Liang et al. (2010), foi realizada a simulação numérica de ondas irregulares. Para a geração da onda foi utilizado um gerador de ondas do tipo pistão na entrada do reservatório onde, a parede lateral esquerda do domínio computacional era móvel. O movimento desta parede foi responsável pela perturbação da água e geração do movimento ondulatório da mesma. Para obtenção do movimento necessário para geração da onda pretendida, em um primeiro momento, a onda foi decomposta em uma série de ondas de pequenas amplitudes e a expansão em séries de Fourier foi utilizada para determinar a amplitude e o ângulo de fase inicial de cada componente de onda. Assim, uma função de transferência hidrodinâmica foi utilizada para a obtenção da amplitude de movimento do gerador, relacionando as componentes da onda. O movimento do pistão foi definido pela

sobreposição de todas as frações de movimento calculadas. Além disso, foi incluída no domínio computacional, uma zona de dissipação numérica, visando amenizar os efeitos da reflexão da onda. Foi possível concluir que o modelo adotado é capaz de representar adequadamente um trem de ondas irregulares.

Finnegan e Goggins (2015) utilizaram o software ANSYS[®], para estudar a geração e propagação de ondas irregulares em escala real. Para tal estudo, foram obtidos dados reais de mar para três situações diferentes na Estação Atlântica de Testes de Energia Marinha (AMETS) [54,225 N, -9,991 W]. Os dados foram transformados em espectro de ondas através das transformadas de Fourier, viabilizando sua inserção no software como condição de contorno de velocidade de entrada. Neste trabalho, foi utilizado o modelo multifásico VOF, para tratamento da interação entre água e ar e adicionada uma zona de dissipação numérica, para amortecimento da onda no final do canal. A partir disto, foram avaliadas as diferenças entre o perfil de velocidades obtido através da simulação e o perfil de velocidades teórico, obtido através do espectro de ondas. Também, foram avaliadas as diferenças entre a elevação da superfície livre numérica e teórica, além do espectro de energia real e teórico. Os autores concluíram que a metodologia utilizada representa, com significativa precisão, dados reais de mar. Porém, representa com maior precisão altas amplitudes e baixas frequências do que baixas amplitudes e altas frequências.

Em Lisboa et al. (2016), foram realizadas análises da propagação de ondas regulares e irregulares em um canal bidimensional com praia numérica (vide Fig. 1.10). Foi utilizado o software ANSYS Fluent[®] objetivando analisar e aferir os coeficientes de amortecimentos linear e quadrático utilizados no termo sumidouro da equação de conservação da quantidade de movimento, viabilizando a utilização da praia numérica ao fim do canal de ondas para redução do fenômeno de reflexão. Foi concluído que, no geral, coeficientes baixos causam diminuição da altura média da onda; por outro lado, coeficientes altos causam elevação na altura média da onda devido aos altos amortecimentos na região da praia numérica. Os autores concluíram ainda que a utilização da praia numérica apresenta resultados satisfatórios na dissipação de energia da onda e recomendam utilização do coeficiente linear igual a 20 e do coeficiente de amortecimento quadrático nulo. Vale destacar que os resultados foram verificados para ondas regulares de Stokes de 2^a ordem e para ondas irregulares quando considerado um espectro de JONSWAP (*Joint North Sea Wave Observation Project*). Ambos os modelos empregados apresentaram boa concordância entre os resultados numéricos e analíticos.

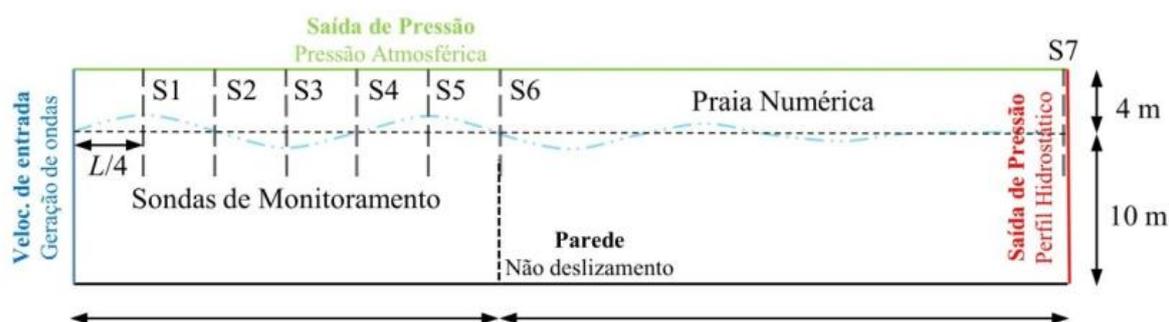


Figura 1.10 - Domínio computacional utilizado por Lisboa et al., (2016).

Costa e Gomes (2018) utilizaram o espectro JONSWAP para geração de ondas irregulares e utilizaram a praia numérica para amortecimento da onda no final do canal. Os autores utilizaram o modelo multifásico VOF para tratamento da interação água-ar. Analisou-se as características do espectro em 5 diferentes posições do canal de ondas, sendo a última delas dentro da região de praia numérica. Observou-se uma significativa redução de energia na região da praia numérica e os resultados analíticos e numéricos foram bastante próximos para as três primeiras das cinco posições analisadas, sendo que para a última região já era esperada uma diferença devido à utilização da praia numérica.

Rodrigues et al. (2019), apresentaram uma metodologia para a simulação numérica de um espectro de ondas do tipo Pierson – Moskowitz, objetivando a obtenção de recomendações para a discretização temporal do mesmo. A simulação numérica foi realizada através do software Fluent[®], foi aplicado o modelo multifásico VOF para tratamento da interação entre água e ar e utilizada a metodologia de amortecimento da onda denominada praia numérica. A onda foi gerada através da condição de contorno de velocidade prescrita. Concluiu-se que o modelo proposto representa a geração de ondas mais próximo à realidade, quando comparados com ondas regulares; que a discretização temporal recomendada (passo de tempo) para este tipo de estudo é o período mínimo do espectro dividido por 1.000; porém, a metodologia necessita de avanços para representação adequada de maiores frequências de onda e para manter os resultados totalmente em fase.

1.3.3. Dispositivo conversor de energia das ondas do tipo galgamento sob a incidência de ondas regulares

Os parágrafos que seguem apresentarão os principais estudos encontrados na literatura referentes à simulação numérica e computacional de um dispositivo conversor de energia das ondas do tipo galgamento sob a incidência de uma onda regular, assim como testes de alguns protótipos deste dispositivo em escala laboratorial.

Em Iahnke et al. (2009), foi realizado um estudo numérico computacional bidimensional sobre um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo de galgamento sob a incidência de uma onda regular de período 3,5 s. O gerador de ondas utilizado foi do tipo pistão, com parede e malha móvel. O movimento do pistão foi descrito por equação escrita em código C e inserida no software através da ferramenta UDF. Para tratamento da interação entre água e ar foi utilizado o modelo multifásico VOF e o software comercial Fluent[®] para realização das simulações. A geração da onda foi verificada e foram realizados testes considerando distintas geometrias do dispositivo de galgamento, comparando a quantidade de água no interior do reservatório do dispositivo. Concluiu-se que o modelo numérico desenvolvido pode ser aplicado em estudos de dimensionamento deste tipo de conversor.

Em Machado (2012) foram realizados dois estudos numéricos de um dispositivo conversor de energia das ondas em energia elétrica do tipo galgamento, com o auxílio do software ANSYS Fluent[®]. No primeiro deles foi aplicado o *Constructal Design* para otimização geométrica de um dispositivo em uma abordagem bidimensional para dois diferentes climas de onda. No segundo estudo foi realizada uma abordagem tridimensional do dispositivo e avaliada a influência da razão da abertura da rampa do dispositivo sobre a vazão mássica na entrada do reservatório. O domínio computacional e a malha foram elaborados com a utilização do software GAMBIT e o tratamento da interação entre água e ar foi tratada no Fluent[®] através da utilização do modelo multifásico VOF. Através desta abordagem e da determinação da geometria ótima para o dispositivo foi possível obter resultados até 20 vezes melhores do que para geometrias não otimizadas.

Em Goulart et al. (2015), foi realizado um estudo de otimização geométrica de um dispositivo de galgamento em escala real, aplicando o Design Construtal e avaliando duas profundidades do dispositivo. Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado o software Fluent[®]. Para geração da onda foi utilizada a condição de contorno de velocidade prescrita, onde o perfil de velocidades da onda foi imposto através das equações da teoria de onda de Airy. No trabalho não foi apresentada uma razão ótima para a inclinação da rampa do dispositivo, concluiu-se que – com profundidade, período da onda e áreas fixadas – menores inclinações conduziram a melhores performances. Além disso, em relação à distância do fundo do canal até o fundo do dispositivo, foi detectado que menores alturas requerem de maiores inclinações da rampa do dispositivo para que se obtenha a melhor performance. A Figura 1.11 apresenta o domínio computacional utilizado pelos autores.

Em Machado (2017) foram realizados dois estudos numéricos tridimensionais de um dispositivo conversor de energia das ondas do tipo galgamento. Para ambos estudos foi utilizado o software Fluent[®] para a simulação e solução das equações governantes. Para tratamento da interação

entre água e ar foi utilizado o modelo multifásico VOF. Nos dois estudos foi aplicado o design construtal para analisar a influência da variação na razão de abertura da rampa e otimizar esta variável. O primeiro estudo foi realizado em escala real e o segundo em escala laboratorial. Foi possível detectar comportamento similar para os dois casos, porém com valores para a razão de abertura da rampa diferente para cada caso.

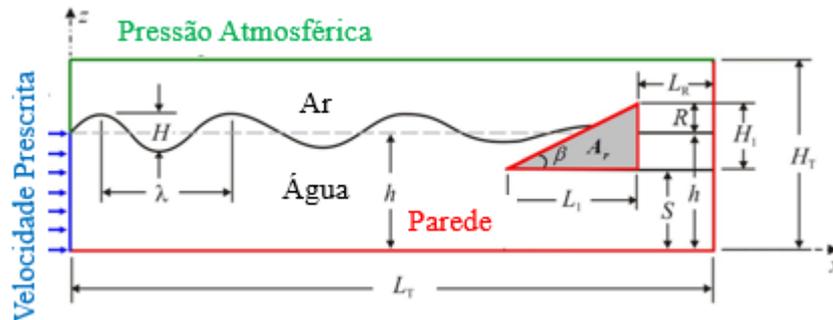


Figura 1.11 - Domínio computacional utilizado por Goulart et al., (2015).

Martins et al. (2017a), realizaram uma avaliação geométrica de um dispositivo de galgamento aplicando o Design Construtal. As simulações numéricas foram realizadas através do software Fluent[®], considerando uma onda de Stokes de 2ª ordem. Utilizou-se uma malha estruturada com maior refinamento na região entre a crista e a cava da onda e na região do dispositivo, conforme apresenta a Fig. 1.12, e o modelo multifásico VOF para tratamento da interação entre água e ar. Os autores avaliaram o comportamento do dispositivo para diferentes inclinações da rampa, profundidades do dispositivo e para dois períodos de onda. Como conclusão, recomendam a geometria ótima do dispositivo para o estado de mar analisado e o Design Construtal como metodologia de otimização geométrica.

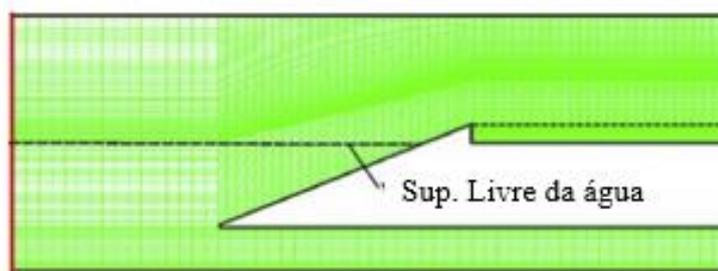


Figura 1.12 - Domínio espacial e malha estruturada com maior refinamento na região de propagação da onda e do dispositivo (Fonte: Martins et al., 2017).

Liu et al. (2017a), desenvolveram um estudo experimental de um dispositivo de galgamento do tipo múltiplo-estágio sob a incidência de uma onda regular. Os autores destacam que foi proposto um dispositivo com dois estágios de galgamento (2 reservatórios e 2 rampas) devido à grande variação

de maré presente nos oceanos que incidem sobre a costa chinesa. A imagem do modelo experimental em funcionamento é apresentada na Fig. 1.13, onde T representa o período da onda regular incidente no dispositivo. A partir do protótipo proposto, foi possível avaliar e simular o efeito da variação do ângulo da rampa superior do reservatório e a variação da razão entre a altura da onda e a altura do primeiro reservatório. Concluíram que o modelo representou adequadamente o fenômeno físico e, ainda, que o reservatório inferior pode quebrar a onda incidente e impedir seu galgamento no reservatório superior, por outro lado, este reservatório pode coletar e acumular a água que não galga a rampa subsequente. Por fim, indicam o ângulo de 30° para a inclinação da rampa superior.

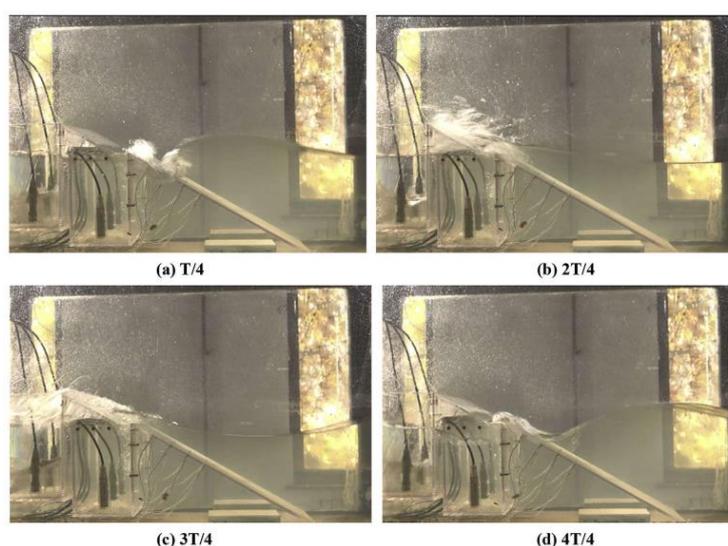


Figura 1.13 - Equipamento experimental estudado por Liu et al. (2017a).

Machado et al. (2017), realizaram um estudo de um modelo computacional tridimensional de um dispositivo de galgamento em escala real sob a incidência de uma onda regular, através do software Fluent[®]. O tratamento da interação entre água e ar foi realizado através do modelo multifásico VOF. Com o modelo desenvolvido foi possível analisar, aplicando o Design Construtal, a razão ótima entre a largura da rampa do dispositivo e a largura da entrada do reservatório.

Liu et al. (2017b), realizaram um estudo experimental de um dispositivo de galgamento flutuante com formato circular e avaliaram o efeito da inclinação da rampa e de guias na rampa do dispositivo para o funcionamento do equipamento. Uma ilustração deste protótipo considerando um corte da seção transversal é apresentada na Fig. 1.14. Este dispositivo foi submetido a um estado de mar em escala laboratorial com altura de onda de 0,05 m, 0,10 m, 0,15 m e períodos de onda variando de 1,0 s a 2,0 s. No teste sem utilização de guias, apenas o fluxo de água que faceava o reservatório galgou a rampa, causando um baixo rendimento do dispositivo; a utilização de guias na rampa causou um melhor aproveitamento de diferentes fluxos gerando assim um melhor rendimento do dispositivo.



Figura 1.14 - Modelo experimental de um dispositivo de galgamento circular flutuante proposto por Liu et al. (2017b)

Han et al. (2018), apresentam um estudo numérico, através do software Fluent[®], de um dispositivo de galgamento com 2 estágios sob a incidência de uma onda regular e o compararam com os resultados experimentais obtidos por Liu et al (2017). Os autores concluíram que o modelo numérico representou adequadamente o modelo experimental. Uma comparação entre os resultados pode ser observada na Fig. 1.15.

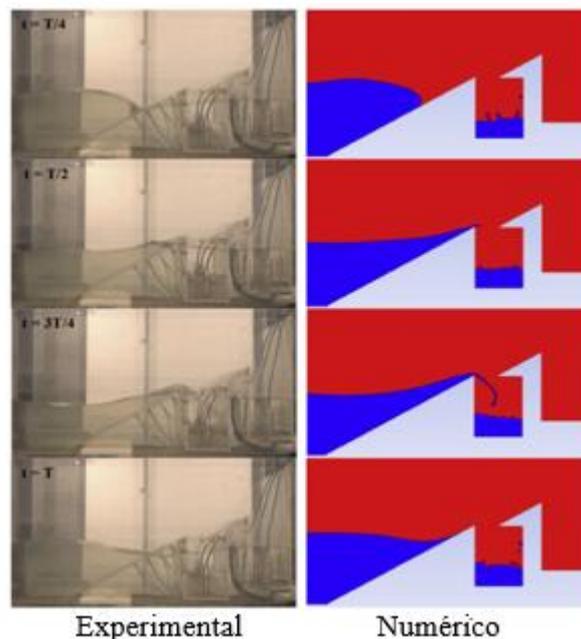


Figura 1.15 - Comparação entre os resultados experimentais e numéricos obtidos por Han et al., (2018).

Barbosa et al. (2019), realizaram a verificação da solução obtida pelo código aberto de CFD, OpenFOAM e avaliaram a performance do equipamento para diferentes curvas da rampa do dispositivo, conforme ilustrado na Fig. 1.16. As equações de conservação foram resolvidas através do MFV e o modelo multifásico VOF foi utilizado para tratamento da interação entre água e ar. Os

resultados obtidos da elevação da superfície livre e para as velocidades foram verificados através das equações analíticas de Stokes de 2ª ordem. A vazão mássica no reservatório do dispositivo de galgamento, foi verificada através de comparações com resultados obtidos através do software ANSYS Fluent® Após a verificação do modelo, foram testadas 6 curvas diferentes para a rampa do dispositivo a fim de avaliar qual delas acarretaria em uma maior performance do dispositivo.

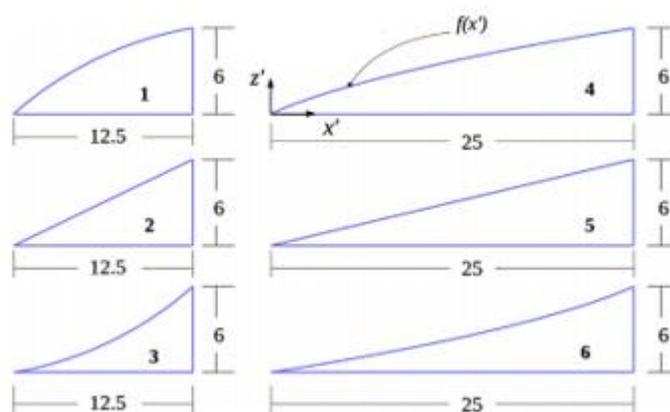


Figura 1.16 - Curvas para a rampa do dispositivo testadas por Barbosa et al. (2019).

1.3.4. Dispositivo conversor de energia das ondas do tipo galgamento sob a incidência de ondas regulares

Nos próximos parágrafos serão apresentadas as principais contribuições na literatura a respeito de simulação numérica de dispositivos de galgamento sob a incidência de onda irregular.

Em Martins et al. (2017b), foi realizada uma análise numérica de um dispositivo de galgamento *onshore* comparando a influência de uma onda regular e de um espectro de ondas (irregular), através do *software* Fluent®. Os resultados obtidos foram comparados considerando o mesmo dispositivo de galgamento, em um mesmo canal de ondas numérico, quando submetido à incidência de uma onda Stokes de 2ª Ordem e quando submetido à incidência de uma onda irregular, obtida através de um espectro de Pierson-Moskowitz. Conclui-se que, embora o espectro de ondas tenha a mesma altura significativa e período de médio que onda regular, os resultados obtidos foram significativamente diferentes.

Em Hübner et al. (2018), foi apresentada uma comparação numérica do princípio de funcionamento de um dispositivo de galgamento sob a incidência de uma onda realística, imposta utilizando dados transientes discretos das velocidades horizontais e verticais da onda, e sob a incidência de uma onda regular representativa deste estado de mar realístico. O estudo foi realizado através do *software* de Fluent®, o tratamento da interação entre água e ar foi realizado através do modelo multifásico VOF e utilizou-se uma região de praia numérica aliada a um perfil hidrostático

no final do canal de ondas, objetivando reduzir o efeito de reflexão da onda, através, do qual, viabilizou-se a simulação de 850 s. Concluiu-se que a utilização de um estado realístico de mar apresenta diferenças significativas, quando comparado com um estado regular de mar.

Como observado no levantamento de estado da arte, na literatura atual, foram encontrados apenas dois estudos numéricos de dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo galgamento sob a incidência de ondas irregulares. Além disso, destaca-se que os tempos de simulação apresentados nos estudos são relativamente pequenos para representação de um estado de mar irregular. É sabido que maiores tempos de simulação são acometidos pelo fenômeno de reflexão da onda, a não ser que seja utilizada alguma forma de amortecimento da onda, como a praia numérica. Portanto, o presente trabalho visa ampliação do estudo apresentado em Hübner et al. (2018) aperfeiçoando, por exemplo, a discretização espacial empregada. Com isto, pretende-se apresentar uma significativa contribuição à literatura atual.

2. FUNDAMENTOS DE MECÂNICA DAS ONDAS

Para se compreender o fenômeno das ondas oceânicas é importante conhecer como se formam, se propagam, se transformam, como dissipam energia e rebentam. Estes fenômenos, assim como as principais características de uma onda, serão brevemente explicados nesta seção.

Existem vários fenômenos na natureza que geram as ondas oceânicas, entretanto ondas utilizadas para geração de energia, escopo do presente estudo, geralmente são formadas pelo vento (Pecher & Kofoed, 2017). As ondas são formadas no oceano a partir da ação do vento, que causa uma tensão na superfície da água, deformando-a e gerando movimento (Kinsman, 1965). Uma breve ilustração do processo de formação de ondas de vento no oceano pode ser observado na Fig 2.1.

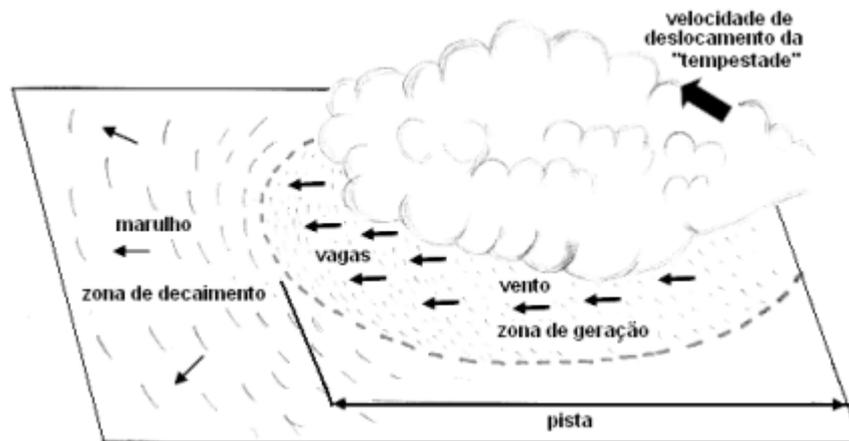


Figura 2.1 - Processo de formação das ondas de vento (Fonte: Paterlini, 2009).

As ondas formadas pelo vento, dentro da zona de agitação (denominada pista) são chamadas de vagas (*sea*) e tem características completamente irregulares, quando avançam e saem da zona de agitação passam a ser chamadas de ondulações (*swell*) e apresentam características mais regulares (Kinsman, 1965).

Após a geração, as ondas se propagam pelo oceano e possuem as características ilustradas na Fig. 2.2.

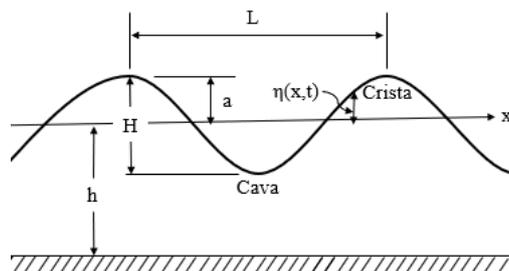


Figura 2.2 - Características da Onda (Fonte: Adaptado de Dean e Darlymple, 1991).

onde:

L é o comprimento da onda [m];

a é a amplitude da onda [m];

H é a altura da onda [m];

h é a altura da linha d'água [m];

η é a elevação da superfície livre da água [m];

x é o eixo de coordenadas horizontais [m];

t é o tempo [s].

A partir das características da onda mencionadas, é possível determinar e conhecer outros conceitos importantes a respeito das ondas regulares, tais como: velocidade da onda, que é denominada celeridade e definida como $C = L/T$ [m/s], onde T é o período da onda [s]; o número de onda, definido como $k = 2\pi/L$ e a frequência da onda, definida como $\omega = 2\pi/T$ (Dean e Darlymple, 1991).

Durante o percurso, a onda sofre transformações, a maioria delas causadas por variações no fundo do oceano. Segundo Dean e Darlymple (1991) em locais onde a relação entre profundidade e comprimento da onda (h/L) for maior do que 0,5, as variações do fundo não interferem na propagação da onda e estes locais são considerados de águas profundas; caso esta relação esteja entre 0,5 e 0,05, o fundo passa a interferir na propagação da onda e esta região denominada de águas intermediárias; por fim, quando esta relação for inferior a 0,05, considera-se uma situação de águas rasas e o fundo passa a ter forte interferência na propagação da onda.

Estas variações no fundo do oceano causam transformações nas ondas, destaca-se os principais fenômenos de transformação da onda como: a difração, a reflexão e a rebentação. O fenômeno de refração causa variações na direção e altura da onda, que sente as variações do fundo ao se propagar. Já, a difração ocorre quando a energia da onda se expande perpendicularmente à direção predominante de propagação, geralmente é causado por obstáculos na região de propagação (Dean e Darlymple, 1991). Rebentação é um fenômeno muito complexo, que depende principalmente da inclinação do fundo e do processo de dissipação de energia da onda - recomendasse que dispositivos de conversão de energia sejam instalados em locais anteriores a este fenômeno - que geralmente ocorre em regiões em que a relação $H/h = 0,8$, como pode ser visto na Fig. 2.3 (Chakrabarti, 2005).

Existem várias teorias na literatura que descrevem as ondas oceânicas, cada teoria melhor se aplica a uma determinada região ou um determinado processo de transformação (mencionados anteriormente). Estas teorias são fundamentalmente de ondas regulares, as mais utilizadas são: Teoria

linear de Airy, Teoria Stokes de 2ª ordem, Teoria de onda Cnoidal ou Solitária (Chakrabarti, 2005). Como esta seção tem o cunho de revisão breve, serão apresentados apenas o equacionamento e as particularidades da teoria de ondas utilizada neste estudo.

Existem diversas maneiras de selecionar a teoria que melhor descreve a onda de uma determinada região, uma delas é apresentada na Fig. 2.3:

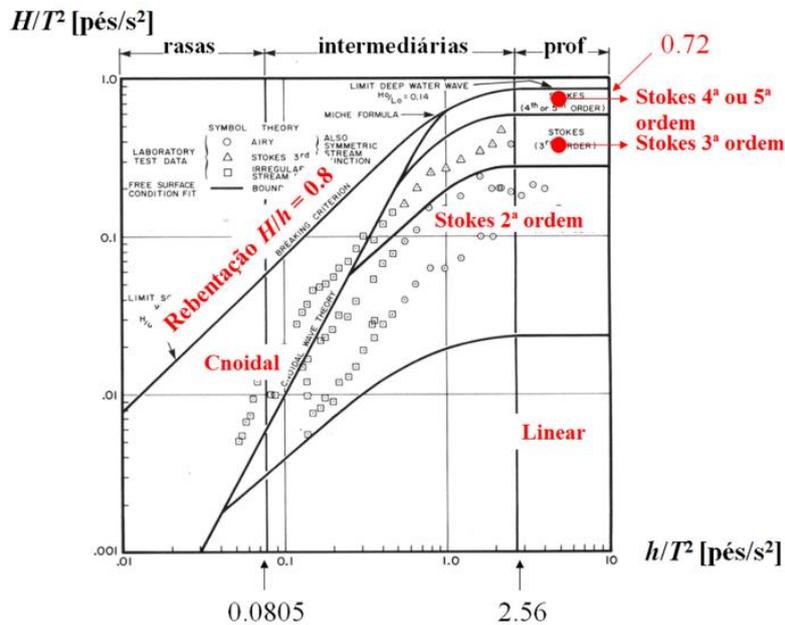


Figura 2.3 - Aplicabilidade das teorias de ondas (Fonte: Adaptado de Chakrabarti, 2005).

Neste trabalho, a teoria de onda regular utilizada será a de Stokes de 2ª ordem, os motivos pelos quais esta teoria será utilizada serão apresentados no momento oportuno. Desta forma, de acordo com Dean & Dalrymple (1991) a elevação da superfície livre descrita por esta teoria pode ser obtida analiticamente através da seguinte equação:

$$\eta = a \cos(kx - \omega t) + \frac{(2a)^2 k \cosh(kh)}{16 \sinh^3(kh)} (2 + \cosh(2kh)) \cos 2(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

onde: η é a elevação da superfície livre da onda [m]; e x e z representam as direções horizontal e vertical do sistema de coordenadas [m], respectivamente.

Ainda de acordo com Dean & Dalrymple (1991) as equações que representam as velocidades orbitais nos eixos x e z podem ser obtidas derivando a equação da elevação da superfície livre para cada eixo coordenado e são dadas por:

$$u = agk \frac{\cosh(kz + kh)}{\omega \cos(kh)} \cos 2(kx - \omega t) + a^2 \omega k \frac{\cosh 2k(h + z)}{\text{sen}^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (2.2)$$

$$w = agk \frac{\text{senh}(kz + kh)}{\omega \text{sen}(kh)} \text{sen}(kx - \omega t) + a^2 \omega k \frac{\text{senh} 2k(h + z)}{\cos^4(kh)} \text{sen} 2(kx - \omega t) \quad (2.3)$$

onde: u e w são as componentes horizontal e vertical da velocidade [m/s]; g é a aceleração da gravidade [m/s²].

No entanto, as ondas encontradas nos oceanos raramente são como descritas nas teorias regulares, pois, geralmente, cada onda é diferente da onda anterior e também raramente se propagam na mesma direção. Comumente, a elevação da superfície livre das ondas tem um comportamento similar ao apresentado na Fig. 2.4 e pode ser aproximado por uma sobreposição de um grande número de ondas senoidais se propagando em diferentes posições, como apresentado na Fig. 2.5 (Dean e Dalrymple, 1991).



Figura 2.4 - Exemplo de possíveis dados de elevação da superfície livre de um estado de mar real. (Fonte: Dean e Dalrymple, 1991).

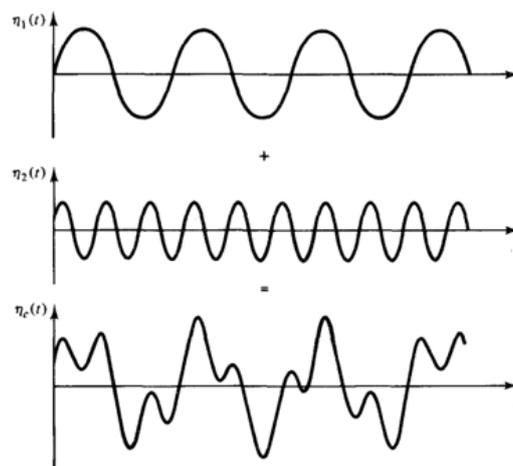


Figura 2.5 - Onda complexa obtida através da soma de duas ondas senoidais (Fonte: Dean e Dalrymple, 1991).

A partir disto, se faz importante avaliar o espectro de energia do estado de mar que representa a variação da energia com a frequência da onda. Na literatura existe uma gama de espectros sugeridos para representar um estado de mar completamente desenvolvido, destacando-se os espectros de Pierson-Moscowitz e o JONSWAP (Pecher & Kofoed, 2017). A Fig. 2.6 apresenta um exemplo de espectro de frequência de um estado de mar completamente desenvolvido.

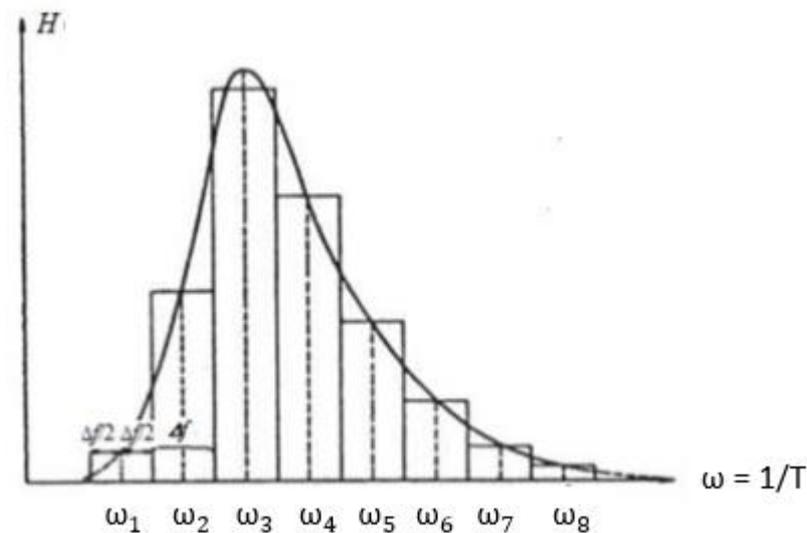


Figura 2.6 - Exemplo de um espectro de frequência de um estado realístico de mar.

A partir do espectro de frequência, é possível calcular a altura significativa do estado de mar, através da Eq. (2.4). E a partir do histograma de elevação da superfície livre em função do tempo é possível obter o período médio e o período de pico deste estado de mar (Dean e Dalrymple, 1991).

$$H_{(S)} = 4\sqrt{m_0} \quad (2.4)$$

onde: $H_{(S)}$ é a altura significativa média [m] e m_0 é o momento do espectro ou a energia total média, calculada através da integração da curva do espectro.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA

Neste capítulo serão apresentados fundamentos sobre as principais ferramentas matemáticas e numéricas utilizadas no presente trabalho.

3.1. Fundamentos do Métodos de Volumes Finitos

O Método dos Volumes Finitos (MVF) é uma importante ferramenta para se resolver com confiabilidade problemas complexos da engenharia moderna e com grande aplicação em problemas fluidodinâmicos. O método consiste, basicamente, em dividir o domínio de interesse em vários volumes elementares e realizar o balanço de conservação das propriedades para cada volume elementar, de forma a obter a correspondente equação aproximada (Maliska, 2004).

A Fig. 3.1 apresenta o processo de discretização empregado pelo MVF. Nesta, uma equação diferencial, definida no domínio D , é transformada em um sistema de equações algébricas.

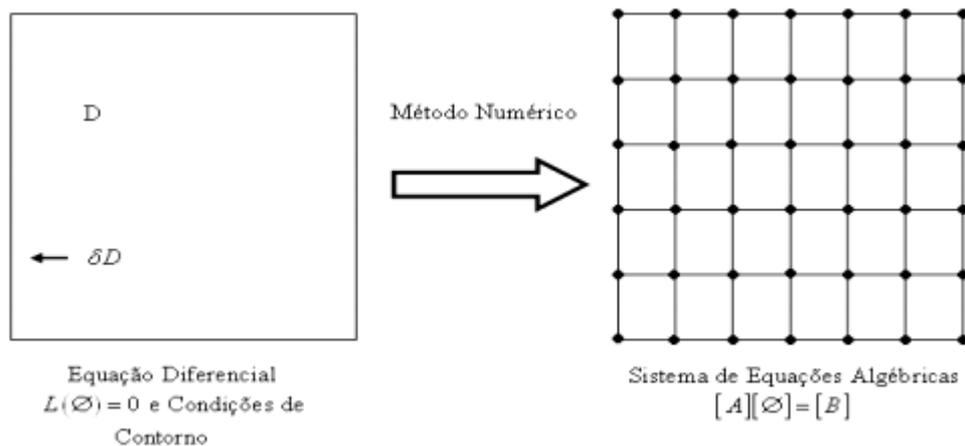


Figura 3.1 - Função do Método Numérico (Fonte: Maliska, 2004).

Existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas para esta metodologia. A primeira é a realização de balanços da propriedade nos volumes elementares e, a segunda, a integração no espaço e no tempo as equações na forma conservativa sobre o volume elementar. Os processos são equivalentes, pois para deduzir as equações diferenciais é necessário primeiro realizar um balanço no volume finito e, depois, aplica-se os limites para se obter as equações (Maliska, 2004). Para demonstrar esta equivalência, considera-se o volume elementar apresentado na Fig. 3.2.

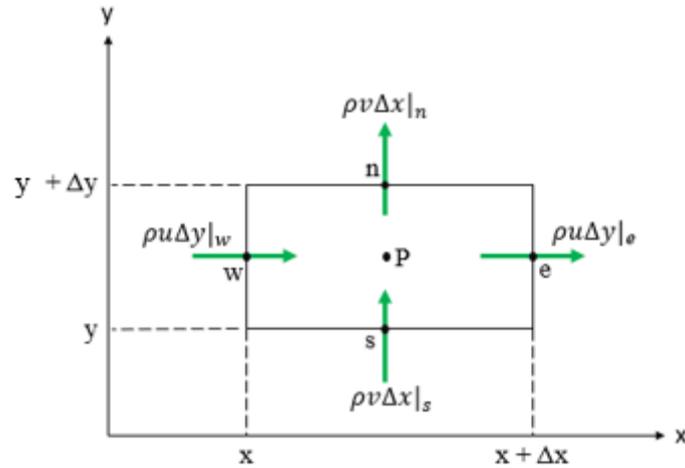


Figura 3.2 - Volume elementar para os balanços de conservação (Fonte: Adaptada de Maliska, 2004).

A equação que descreve o balanço de conservação do volume elementar da Fig. 3.3 é:

$$\rho u \Delta y|_w - \rho u \Delta y|_e + \rho v \Delta x|_s - \rho v \Delta x|_n = 0 \quad (3.1)$$

onde u e v representam as componentes de velocidades [m/s] nas direções x e y , respectivamente; e ρ representa a massa específica [kg/m³] do fluido.

Dividindo-se a Eq. (3.1) pelo produto $\Delta x \Delta y$ – os quais denotam a variação espacial ortogonal entre os limites horizontais e verticais do volume de controle elementar, respectivamente – obtém-se:

$$\frac{\rho u|_w - \rho u|_e}{\Delta x} + \frac{\rho v|_s - \rho v|_n}{\Delta y} = 0 \quad (3.2)$$

Aplicando-se os limites com as variações espaciais tendendo a 0, encontra-se a equação diferencial que define a forma conservativa da massa para um escoamento bidimensional permanente:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (3.3)$$

A Equação (3.3) está na forma conservativa, pois os produtos ρu e ρv estão dentro do sinal de derivadas. Logo, a equação de conservação para um volume finito é um passo intermediário para se obter a equação de conservação em nível infinitesimal, de tal forma que se a equação de conservação

foi integrada sobre o volume elementar e os limites forem adequadamente aplicados será obtida exatamente a Eq. (3.1).

Realizando a integração ou o balanço conservativo de todos os volumes elementares, obtém-se uma equação algébrica para cada volume de modo a formar um sistema de equação algébrica. Este sistema de equação pode ser resolvido através de algum método numérico conhecido (Maliska, 2004).

Quando o problema envolve o regime transiente, no qual o comportamento e as características do fluxo variam com o tempo, é necessário decidir sobre como as propriedades do fluxo variam em um intervalo de tempo Δt . Isso ocorre com a escolha das funções de interpolação temporais, dependendo da função escolhida tem-se formulações explícitas, totalmente implícitas e implícitas. Na formulação explícita, todas as propriedades vizinhas são avaliadas no instante anterior e, portanto, são conhecidas. Na formulação totalmente implícita, os termos da vizinhança são calculados para o instante de tempo em questão. Já na formulação implícita, ocorre uma ponderação das propriedades entre o instante de tempo anterior e o instante de tempo atual. As conexões espaciais e temporais das propriedades para um volume de controle P são apresentadas na Fig. 3.3 para cada tipo de formulação (Maliska, 2004).

Ainda, de acordo com Dos Santos (2011), quando o problema envolve escoamentos predominantemente advectivos, a discretização por diferenças finitas centrais para o tratamento destes termos produzem soluções que sofrem oscilações que não são reais. É possível reduzir estas oscilações empregando um maior refinamento de malha. Porém, de acordo com Maliska (2004), é difícil empregar um refinamento muito grande para problemas reais devido ao elevado esforço computacional necessário para solução destes problemas. Em função disso, foram desenvolvidas funções de interpolações que auxiliam na abordagem deste tipo de problema.

O presente trabalho abordará o esquema *upwind*, que, diferente do método de diferenças centrais, produzem soluções fisicamente coerentes, porém tem a propriedade de suavizar altos gradientes (Maliska, 2004). O esquema de interpolação *upwind* possui a seguinte formulação:

$$\begin{aligned} \phi_W &= \phi_W \text{ e } \phi_e = \phi_P && \text{para } u > 0 \\ \phi_W &= \phi_P \text{ e } \phi_e = \phi_e && \text{para } v > 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

O sistema *upwind* tem relação direta com o termo parabólico, ou seja, o valor da função na interface é igual ao valor da função no volume à montante (Maliska, 2004).

Ainda – em métodos numéricos em geral – existe o problema do não acoplamento pressão-velocidade quando a solução das equações da conservação da quantidade do movimento e da massa

para escoamentos incompressíveis é realizada de forma segregada, já que os campos de velocidade e temperatura podem ser avançados no tempo empregando-se as equações de conservação. Porém, a solução de problemas incompressíveis não possui uma equação própria para o avanço da pressão, pois neste caso a equação da conservação da massa não serve de equação evolutiva (Maliska, 2004).

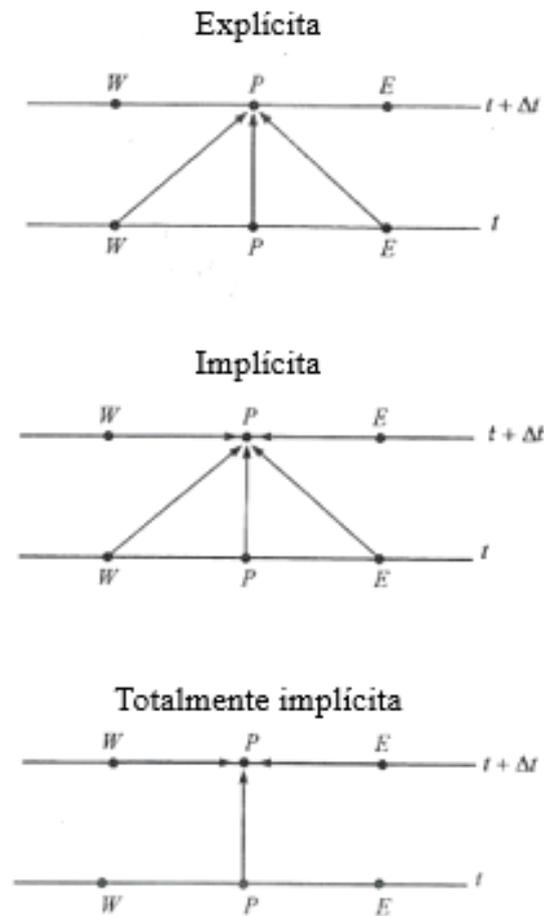


Figura 3.3 - Conexões espacial e temporal de um volume P . (Fonte: Adaptado de Maliska, 2004).

Existem vários métodos desenvolvidos com o objetivo de acoplar as soluções de velocidade e pressão. O objetivo de todos eles é o de criar uma equação para a pressão que permita que o processo iterativo avance, observando a conservação da massa (Maliska, 2004). Em simulações computacionais de canais de ondas, o método PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) é amplamente utilizado, como por exemplo em Gomes et al. (2012), Martins et al. (2017), Machado et al. (2018).

3.2. Modelo Multifásico VOF

Para a realização do presente estudo será necessário trabalhar com um escoamento bifásico

de ar e água, para isso, será utilizada a metodologia *Volume of Fluid* (VOF), desenvolvida por Hirt & Nichols (1981) e disponibilizada no software Fluent[®], que permite o tratamento adequado da interação entre o ar e a água. Este método considera que o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra fase e, para representar qual fase está presente em cada volume de controle, realiza o cálculo da fração volumétrica (α). O presente estudo considera apenas a interação entre as fases água e ar, logo, α varia entre 0 e 1 para cada fase ($\alpha_{\text{água}}$ e α_{ar}), onde 0 indica que a fase medida não está presente no volume de controle e 1 indica que apenas aquela fase está presente no volume. Portanto, $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$ (Hirt & Nichols, 1981).

Além disto, quando o VOF é aplicado são resolvidas as equações de quantidade de movimento - Eq. (3.5) - e da continuidade - Eq. (3.6) - para cada célula do domínio computacional e α é calculada para cada volume de controle do domínio computacional através da equação de transporte - Eq. (3.7) - para uma das fases. Assim, o seguinte conjunto de equações é resolvido (Hirt & Nichols, 1981):

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho\vec{g} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}) = 0 \quad (3.6)$$

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

onde: ρ é a massa específica do fluido [kg/m^3]; \vec{v} é o vetor velocidade do escoamento [m/s]; p é a pressão [Pa]; $\bar{\tau}$ é o tensor taxa de deformação [N/m^2] e \vec{g} é o vetor aceleração da gravidade [m/s^2].

É importante ressaltar que as Eqs. (3.5) e (3.6) são resolvidas para a mistura. Desta forma, é necessário obter os valores da massa específica e da viscosidade para a mistura, as quais podem ser obtidas pelas seguintes equações (Srinivasan et al., 2011):

$$\rho = \alpha\rho_{\text{água}} + (1 - \alpha)\rho_{\text{ar}} \quad (3.8)$$

$$\mu = \alpha\mu_{\text{água}} + (1 - \alpha)\mu_{\text{ar}} \quad (3.9)$$

3.3. Demais Procedimentos Numéricos Utilizados

Além disso, para a realização do presente trabalho o domínio computacional e a malha foram gerados utilizando os softwares *Design Modeler* e *Meshing*, respectivamente, e a simulação numérica

foi realizada utilizando o software Fluent[®], que é baseado no MVF. Ainda, como já mencionado, para a interação entre água e ar foi utilizado o modelo multifásico VOF.

A discretização espacial do termo advectivo da equação da conservação da quantidade do movimento será realizada com o esquema de advecção *Upwind* de primeira ordem, enquanto a discretização espacial da pressão será realizada com a utilização do método PRESTO. O método GEO-RECONSTRUCT será aplicado para solução da fração volumétrica. Já o acoplamento pressão-velocidade será realizado através do método PISO. Grande parte dos trabalhos na literatura utilizam este mesmo conjunto de métodos para simulação computacional de um canal de ondas, tal como: Liang et al. (2010), Gomes et al. (2012), Martins et al. (2017), Machado et al. (2018), entre outros. Por fim, fatores de sub relaxação de 0,3 e 0,7 foram impostos para as equações da conservação da massa e da quantidade de movimento.

4. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E METODOLOGIA DE GERAÇÃO DA ONDA

Neste capítulo serão apresentados o domínio computacional utilizado para as simulações e suas particularidades, assim como as fontes dos dados utilizados para realização do presente trabalho e a metodologia adotada para a geração numérica das ondas regulares e irregulares.

4.1. Domínio Computacional

O problema analisado consiste em um dispositivo de galgamento inserido em um canal de ondas, conforme apresentado na Fig. 4.1. Neste canal de ondas serão impostos estados realísticos de mar, através de ondas irregulares, como também, ondas regulares representativas destes estados de mar. Com isto pretende-se avaliar as diferenças no funcionamento do dispositivo para cada situação.

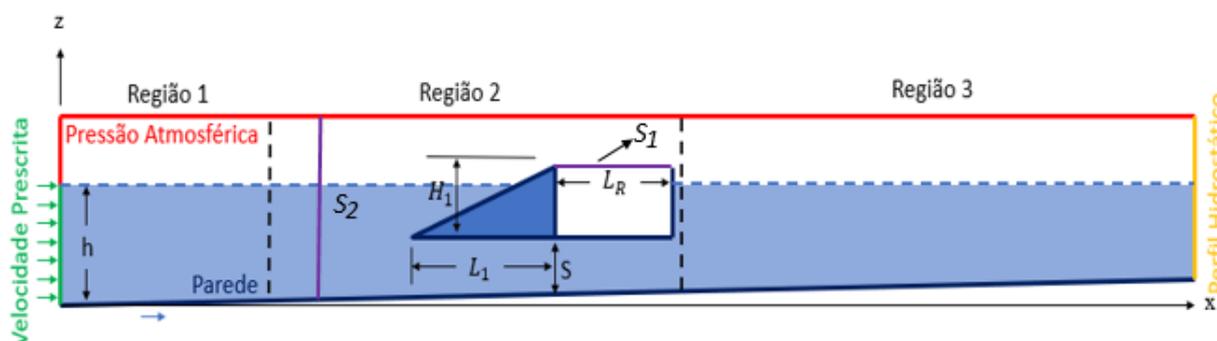


Figura 4.1 - Domínio computacional bidimensional de um dispositivo de galgamento.

O dispositivo foi desenhado conforme recomendações adaptadas de Martins et al (2017): razão $H_1/L_1 = 0,33$, $L_R = 20 m$ e $(h - S) = 6,5 m$. As dimensões do dispositivo não foram alteradas durante as simulações. As linhas lilás indicadas por S_1 e S_2 indicam, respectivamente, os locais das sondas de monitoramento da vazão mássica na entrada do reservatório e da elevação da superfície livre, esta localizada a 120m de distância da parede lateral esquerda do domínio computacional.

Quanto às condições de contorno, a geração das ondas será feita pela imposição da condição de contorno de velocidade prescrita, no segmento inferior da superfície lateral esquerda (linha verde) do canal de ondas numérico (ver Fig. 4.1). As linhas vermelhas do domínio computacional representam regiões com pressão atmosférica, já na linha amarela da lateral direita do canal será imposto um perfil hidrostático e nas linhas azuis escuras serão utilizadas condições de contorno de parede (impermeabilidade e não deslizamento), onde as velocidades são prescritas como nulas.

Como pode ser observado na Fig. 4.1, o fundo é inclinado e essa inclinação foi definida pela batimetria da região da costa Rio Grande do Sul de onde foram obtidos os dados realísticos discretos

de velocidade orbital das ondas que serão utilizados no presente trabalho. Além disso, o domínio computacional foi dividido em três regiões que serão tratadas e discretizadas de diferentes maneiras. A região 1 é a região de geração e propagação da onda; a região 2 é a região do dispositivo onde ocorre a interação entre água, ar e dispositivo; e a região 3 é o local onde será adicionada a praia numérica para amortecer as ondas e impedir o fenômeno de reflexão.

Conforme Machado et al. (2017), para a imposição da condição de contorno de velocidade de entrada através de dados discretos transientes é necessário discretizar o segmento da região 1 - onde é imposta esta condição de contorno - em segmentos menores, conforme demonstrado na Fig. 4.2. A recomendação é de se utilizar segmentos de aproximadamente 1 m de comprimento cada.

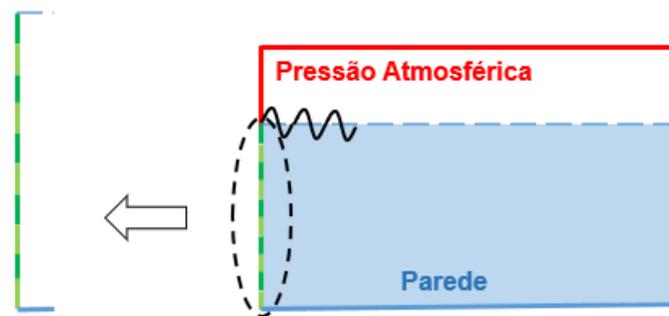


Figura 4.2 - Região de imposição da condição de contorno de velocidade prescrita para a geração da onda através de dados transientes discretos (Fonte: Adaptada de Machado et al., 2017).

Conforme mencionado, na região 3, foi considerada uma praia numérica, como em Lisboa et al. (2016), baseada na adição de um termo sumidouro (*Sum*) na equação da conservação da quantidade de movimento, objetivando o amortecimento das ondas incidentes. Neste estudo, a utilização da praia numérica impede que as ondas numéricas incidam na parede final do canal de ondas e reflitam, possibilitando, assim, simulações em maiores intervalos de tempo. De acordo com Fluent (2018), a equação do termo de sumidouro é dada por:

$$Sum = - \left[C_1 \rho V + \frac{1}{2} C_2 \rho |V|V \right] \left(1 - \frac{z - z_{fs}}{z_b - z_{fs}} \right) \left(\frac{x - x_s}{x_e - x_s} \right)^2 \quad (4.1)$$

onde: C_1 e C_2 são os coeficientes de amortecimento linear e quadrático, respectivamente; z é a posição vertical [m]; z_{fs} e z_b são as posições verticais da superfície e do fundo [m], respectivamente; x é a posição horizontal [m]; x_s e x_e são as posições horizontais do início e do fim da região de praia numérica [m].

Ainda, conforme recomendado por Lisboa et al. (2016): o coeficiente de amortecimento quadrático foi considerado nulo, o coeficiente de amortecimento linear será considerado igual a 20 e a praia numérica apresenta comprimento horizontal igual a dois comprimentos de onda, sendo adotado aqui o comprimento L da onda regular representativa.

Cabe informar que como condição inicial para as simulações numéricas o canal de ondas é considerado em repouso.

4.2. Fontes dos dados (Spec2Wave)

Os dados utilizados para a geração das ondas no presente estudo serão obtidos do software Spec2Wave, que trabalha com um banco de dados obtido do TOMAWAC (*TELEMAC-Based Operational Model Addressing Wave Action Computation*) e, consiste, basicamente, em um conjunto de pontos no espaço e cada ponto, por sua vez, consiste em um espectro direcional de ondas que varia no tempo. Esta variação é discretizada no tempo resultando em um espectro direcional completo a cada passo de tempo. Por fim, este espectro também é dividido em um número finito de frequências e direções (SPEC2WAVE, 2019).

Os bancos de dados fornecidos têm um conjunto de pontos predefinidos imutável (apresentados na Fig. 4.3). Desta forma é possível informar que a cada passo de tempo há um espectro para cada ponto e este espectro é válido durante este passo de tempo. Com a informação do ponto a ser estudado, do instante inicial simulado e da duração da simulação, o software Spec2Wave transforma o espectro de cada segmento em uma série de elevação temporal equivalente, esta transformação utiliza o espectro de amplitude do banco de dados e um espectro de fase aleatório. Estes espectro são passados a uma Transformada de Fourier Inversa que transforma-os em uma série temporal de elevação da superfície aleatória representativa do espectro de amplitude geral (SPEC2WAVE, 2019).

Para o presente trabalho o Spec2Wave utiliza um banco de dados com 14 pontos localizados no litoral sul do Brasil, distantes 2.000 m da costa, como apresentado na Fig. 4.3. Para cada um destes pontos existem dados referente a um ano de estado de mar, iniciando em 01/01/2014 às 0 h até 31/12/2014 às 23 h e 45 min, com um passo de tempo de 15 min. Ou seja, tem-se informações do estado de mar realístico a cada 15 min por um ano inteiro para cada um dos 14 pontos localizados à 2.000 m da costa sul-brasileira.

Inicialmente é necessário determinar para quais dentre os 14 pontos o estudo será realizado e depois qual o espectro de onda que será utilizado para representar o estado de mar daquele ponto. Para as análises iniciais de verificação do modelo computacional, foi escolhido o ponto P6 por se

tratar de ponto localizado na costa de Rio Grande – RS, região de interesse do presente estudo; e ainda por existir uma gama de referências de dispositivos de conversão de energia das ondas para onda regular representativa deste estado de mar, como em Iankhe et al (2009), Goulart et al. (2015), Martins et al. (2017), Machado et al. (2018), entre outros.

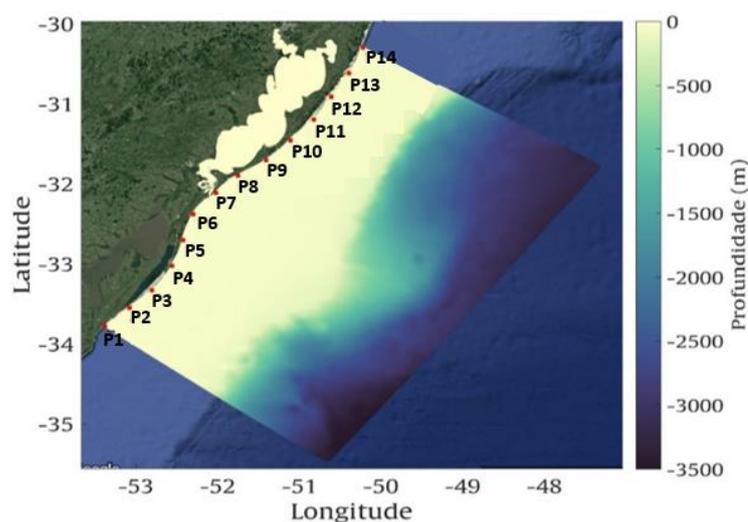


Figura 4.3 – Pontos disponíveis na costa do Rio Grande do Sul para análise no Spec2Wave.

Além deste ponto inicial, o estudo será replicado para outros dois pontos. Para esta análise não serão considerados os dois pontos mais extremos dentre os disponíveis já que de acordo com SPEC2WAVE (2019) os dados realísticos nos limites das malhas são menos confiáveis do que os demais. Desta forma optou-se por analisar o segundo ponto mais ao sul (P2) dentre os apresentados na Fig. 4.3, que está localizado à 2.000 m da costa de Santa Vitória do Palmar/RS e, por fim, analisar outro ponto ao norte de Rio Grande (P10), que possui aproximadamente a mesma distância entre os dois pontos anteriores, localizado à 2.000 m da costa de Tavares/RS.

4.3. Batimetrias Locais

Definidos os três pontos que serão analisados, são apresentados nas Figs. 4.4, 4.5 e 4.6 a batimetria local para cada um deles, onde o eixo horizontal representa as dimensões horizontais do canal de ondas e o eixo vertical a altura da linha d'água. Os dados batimétricos foram obtidos de cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha Brasileira, e digitalizadas por Cardoso et al. (2014).

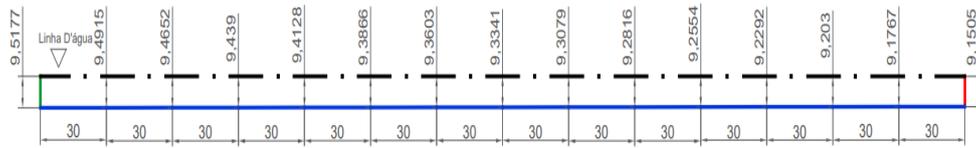


Figura 4.4 - Batimetria do ponto P6, na costa de Rio Grande.

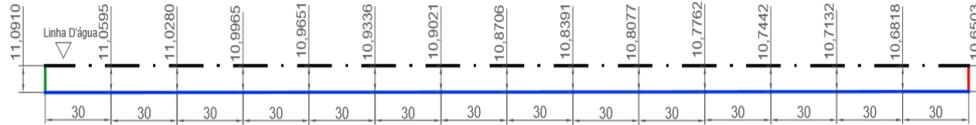


Figura 4.5 - Batimetria do ponto P2, na costa de Santa Vitória do Palmar.

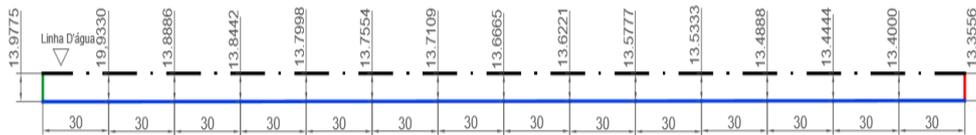


Figura 4.6 - Batimetria do ponto P10, na costa de Tavares..

5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos no presente estudo e abordadas as principais discussões pertinentes aos resultados obtidos.

5.1. Análise Estatística dos dados de onda

Antes de iniciar as simulações é necessário realizar uma análise preliminar para determinar qual intervalo de tempo será estudado para cada local. Destaca-se, que esta avaliação é necessária devido à indisponibilidade de ferramentas computacionais capazes de simular o período completo (dados referentes a um ano de estado de mar). Portanto, o presente estudo simula um intervalo de 15 min (900 s) do estado de mar, de mesmo passo de tempo dos dados disponíveis no banco de dados analisado. Esta definição foi tomada para evitar erros devido à suavização das descontinuidades entre o final de um espectro e o início do outro no Spec2Wave (SPEC2WAVE, 2019).

Apresenta-se nas Figs. 5.1, 5.2 e 5.3 o histograma de frequência de ocorrência de cada espectro de onda ao longo do ano de 2014 para os municípios de Rio Grande, Santa Vitória do Palmar e Tavares, respectivamente, combinando altura significativa e período de pico do espectro.

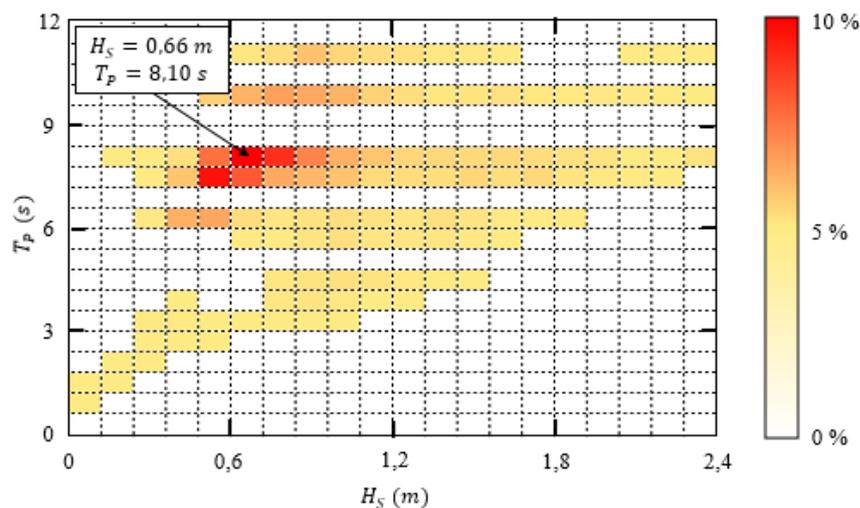


Figura 5.1 – Histograma de frequência de ocorrência de cada estado de mar para o ponto P6, na costa de Rio Grande no ano de 2014.

Como é possível observar, as Figs. 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam o ponto médio do intervalo do estado de mar com maior ocorrência durante o ano de 2014 para os locais em questão. Porém, existem vários espectros compreendidos dentro do intervalo com maior frequência de ocorrência para cada banco de dados analisado. Desta forma, de modo a selecionar o espectro a ser utilizado foi calculada a soma da diferença entre os pontos médios do intervalo selecionado e as características de cada um

destes espectros, esta diferença é obtida através da Eq. 5.1. O instante inicial da simulação foi determinado como aquele em que a diferença calculada fosse a menor dentre todos.

$$dif = \sqrt{(H_{Smed} - H_S|_t)^2 + (T_{Pmed} - T_P|_t)^2} \quad (5.1)$$

onde t é o instante de tempo inicial do espectro e varia de 0 s a 25.896.600 s, com passo de 900 s.

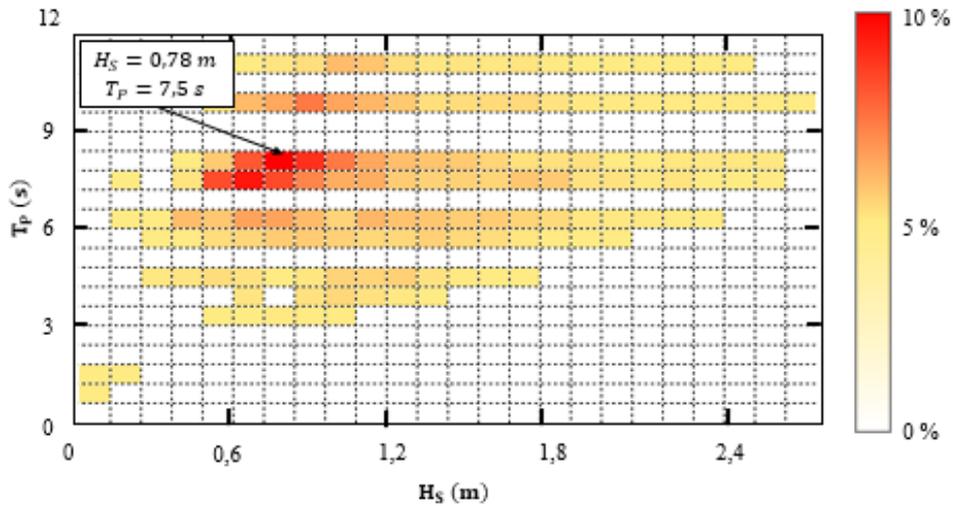


Figura 5.2 - Histograma de frequência de ocorrência de cada estado de mar para o ponto P2, na costa de Santa Vitória do Palmar no ano de 2014.

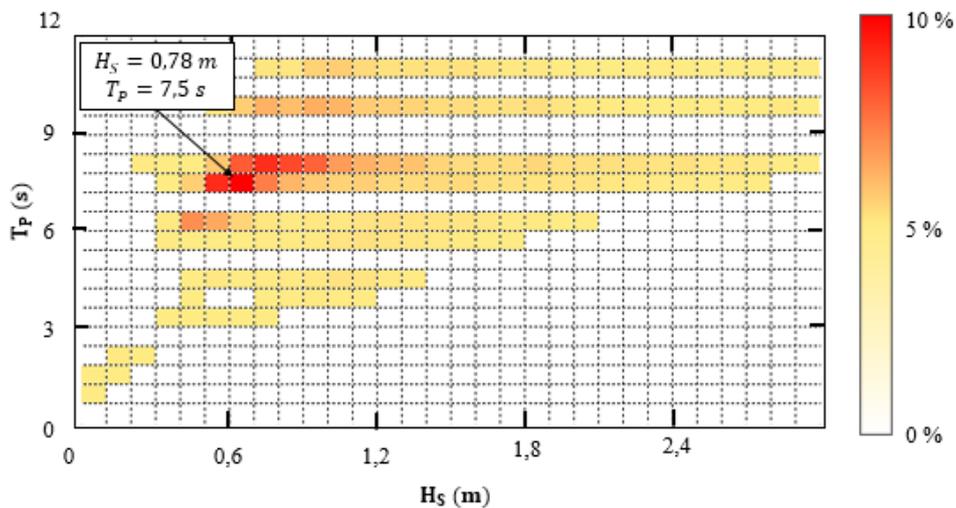


Figura 5.3 - Histograma de frequência de ocorrência de cada estado de mar para o ponto P10, na costa de Tavares no ano de 2014.

A Tabela 5.1 apresenta os principais resultados obtidos com esta análise.

Tabela 5.1. Principais características dos espectros de onda analisados

Localização	Característica	Valor	Unidade
Rio Grande	Período de pico do espectro analisado	8,3791	s
	Altura significativa do espectro analisado	0,6599	m
	Data e hora do fenômeno	8/9/2014 8:15	#
Santa Vitória do Palmar	Período de pico do espectro analisado	7,3505	s
	Altura significativa do espectro analisado	0,7801	m
	Data e hora do fenômeno	31/07/2014 18:30	#
Tavares	Período de pico do espectro analisado	7,3505	s
	Altura significativa do espectro analisado	0,7799	m
	Data e hora do fenômeno	24/02/2014 12:45	#

5.2. Teoria de Onda Aplicável

Ao se utilizar o modelo proposto por Chakrabarti (2005) e já descrito no presente trabalho (Fig. 5.3) para determinar a aplicabilidade das teorias de onda, é necessário combinar os dados apresentados na Tabela 5.1 com a profundidade de cada local (apresentado nas Figs. 4.4-4.6). A Fig 5.4 mostra a análise da teoria de onda regular aplicável para cada estado de mar e que representa o estado realístico de mar em cada caso. Nesta análise as cores vermelha, azul e verde representam Rio Grande, Santa Vitória do Palmar e Tavares, respectivamente.

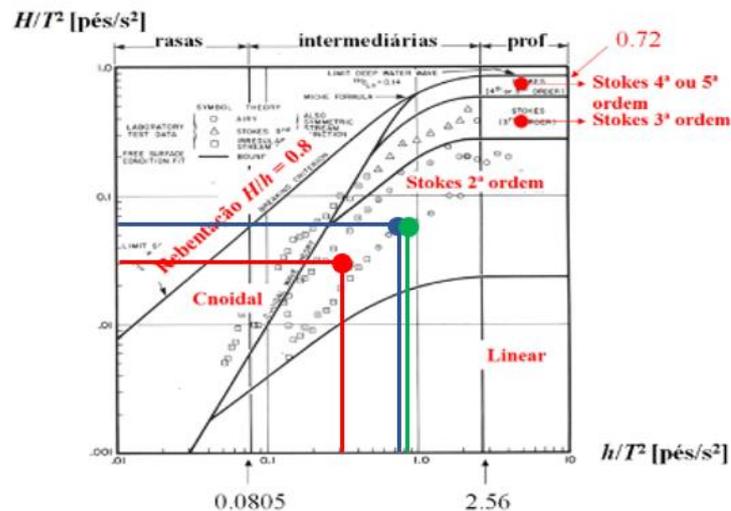


Figura 5.4. Teoria de onda regular aplicável para cada local estudado.

Como pode ser observado na Fig. 5.4 todos os estados de mar analisados podem ser representados pela teoria regular de Stokes de 2ª Ordem. É possível determinar ainda que os locais se encontram em águas intermediárias e, segundo Dean e Dalrymple (1991), neste cenário o fundo começa a interferir na propagação da onda. Desta forma torna-se importante analisar também a variação do fundo do oceano na região de interesse.

5.3. Verificação do Modelo Numérico para Geração das Ondas

Para verificar a metodologia empregada, foi utilizada a estratégia de comparação entre a solução analítica para a movimentação da superfície livre da água, dada pela Eq. (2.1), e a solução numérica, que consiste em gerar as ondas regulares no canal de ondas e observar a variação na posição da superfície livre da água, ou seja, a sua amplitude, em um dado ponto do tanque de ondas. Destaca-se que, para realização deste estudo, utilizou-se a onda regular representativa do estado de mar relativo ao município de Rio Grande.

Em um primeiro momento, realizou-se a verificação do modelo sem o dispositivo de galgamento no canal de onda, conforme ilustrado na Fig. 5.5. Este procedimento será realizado pelo fato que o dispositivo interfere na propagação da onda, principalmente em regiões mais próximas do mesmo, prejudicando a verificação do modelo.

Para realizar o estudo de qualidade de malha, foram consideradas as subdivisões do domínio computacional em 3 regiões de interesse, conforme descrito na Fig. 4.1. Para cada uma destas regiões, a discretização espacial foi realizada conforme recomendações de Kisner et al. (2018), Gomes et al. (2012) e Saincher e Banerjee (2015), vide Fig. 5.5.

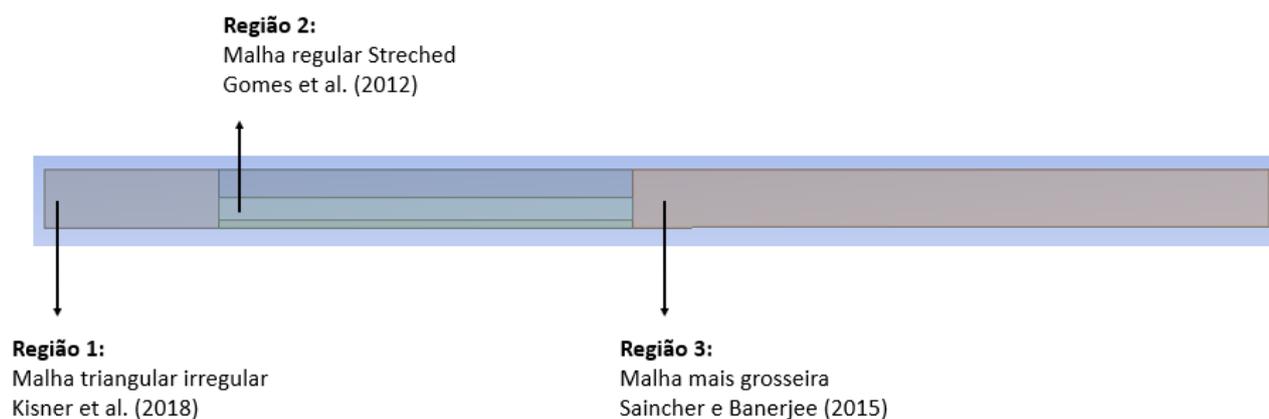


Figura 5.5 - Referências de malhas utilizadas no presente trabalho.

Para a discretização espacial da Região 1, Kisner et al. (2018) indicam a utilização de malha triangular. Pois a utilização de uma malha estruturada apresentada em Gomes et al. (2012) e normalmente utilizada em problemas de geração e propagação de ondas, aliada à imposição da condição de contorno de velocidade prescrita através da imposição de dados discretos transientes da velocidade de propagação da onda, apresentada em Machado et al. (2017), apresenta dificuldade de convergência na equação da continuidade para resíduos superiores a 10^{-3} . A utilização da malha

triangular na Região 1 apresenta melhor convergência para a equação da continuidade, permitindo a geração das ondas através dessa metodologia. Já na Região 2 foi utilizada a malha estruturada proposta por Gomes et al. (2012). Por fim, na Região 3 foi utilizada, segundo recomendação de Saincher e Banerjee (2015), uma malha mais grosseira, tendo em vista a característica da região de amortecimento da onda e visando redução do esforço computacional.

De toda forma, realizou-se avaliação da qualidade de malha para a Região 1, tendo em vista que Kisner et al. (2018) recomendam a utilização de malha triangular com dimensões de 0,3 m, porém, não avaliam outras dimensões. Com relação à discretização das regiões 2 e 3, utilizou-se a recomendação apresentada anteriormente (Fig 5.5), tendo em vista a aplicação destas recomendações nos estudos de Goulart et al. (2015), Finnegans e Goggins (2015), Martins et al. (2017), Lisboa et al (2016), entre outros.

No estudo de qualidade de malha para a Região 1, foram avaliadas as malhas de dimensão $\Delta x = 0,3$ m, 0,5 m, 0,7 m e 1,0 m. Na Figura 5.6, é apresentada a comparação dos resultados das ondas numéricas regulares obtidas para cada discretização com as ondas analíticas previstas pela Eq. (2.1) na posição $x = 120$ m. Destaca-se ainda que, com o objetivo de facilitar a visualização dos resultados, são apresentados apenas os dados referentes ao intervalo de tempo central das simulações (400 a 500 s).

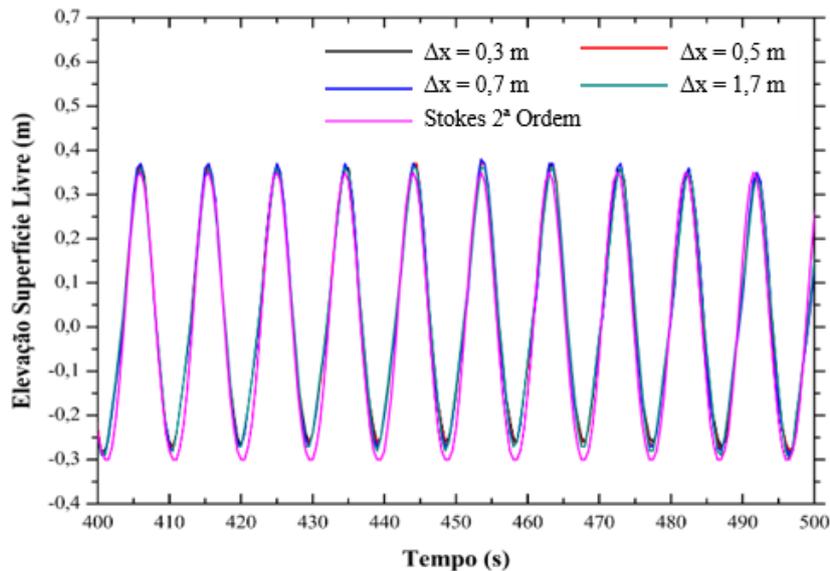


Figura 5.6 - Teste de qualidade de malha para Região 1.

Como pode ser observado na Fig. 5.6, as malhas comparadas apresentaram um comportamento cíclico estável no intervalo de tempo apresentado. Além disso, embora sejam encontradas diferenças entre cavas e cristas das ondas, de uma forma geral, observa-se que o modelo

numérico apresentado representa o fenômeno físico adequadamente. Visando uma análise quantitativa dos resultados, a Tab. 5.2 apresenta o Erro Médio Absoluto (MAE) – o qual é obtido através do cálculo do erro médio obtido -, e o tempo de simulação para cada um dos casos simulados.

Tabela 5.2. Influência na qualidade da malha da Região 1 da Fig. 5.5.

Δx (m)	MAE (%)	Tempo de Processamento (h)
0,3	7,545	19,06
0,5	7,647	18,35
0,7	8,327	18,12
1,0	8,723	17,52

Destaca-se que, para a análise das diferenças, foram desconsiderados os 20 s iniciais de propagação da onda numérica, tendo em vista que o canal de ondas numérico parte do repouso. Portanto, as primeiras ondas geradas são mais amortecidas e se faz necessário este tempo de geração para que ocorra a agitação completa do tanque de ondas na posição da sonda de medição da elevação da superfície livre. Conforme observado na Tab. 5.2, os resultados para as discretizações analisadas foram semelhantes e apresentam, entre si, diferença máxima de 1,178%. Destaca-se, também, que a diferença no tempo total de processamento não foi expressiva dentre os casos avaliados. Tendo em vista que este é o primeiro trabalho na literatura de aplicação de um estado realístico de mar através de dados discretos transientes e com 15 min de simulação em um dispositivo conversor de energia das ondas do tipo galgamento e, considerando que a malha com maior refino não impactou de maneira expressiva no tempo de processamento, optou-se pela utilização da discretização com $\Delta x = 0,3 m$ em consonância, também, com o trabalho de Kisner et al. (2018).

Com relação ao comprimento da Região 1, o estudo realizado por Kisner et al. (2018) não apresenta o comprimento utilizado nesta região de malha irregular. Assim, nos primeiros testes realizados no presente estudo, o comprimento desta região foi de 60 m. Porém, de acordo com Maliska (2004), a malha estruturada deve ser preferida em relação à irregular, principalmente em regiões próximas às paredes, por isso, foi testada uma malha com o comprimento de 30 m, visando a redução do comprimento da região de aplicação da malha irregular. A comparação dos comprimentos testado para a Região 1 com o resultado analítico, obtida através da Eq. 2.1, é apresentada na Fig. 5.7.

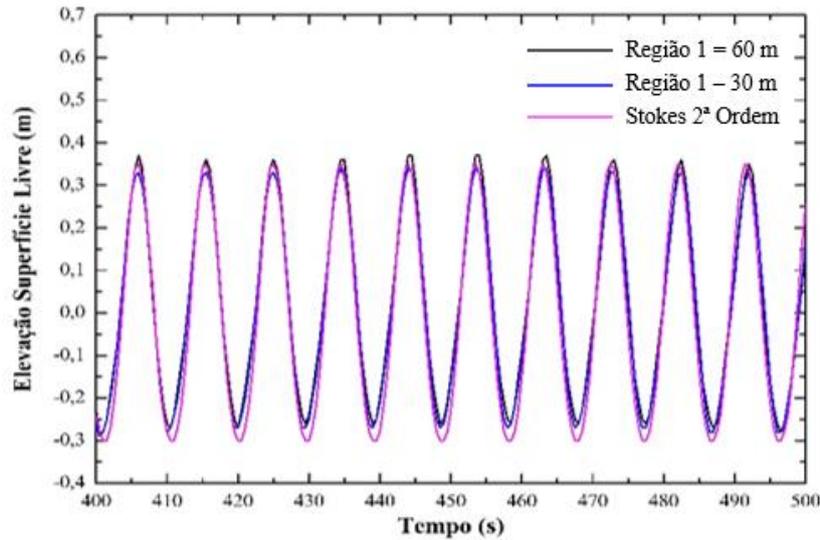


Figura 5.7 – Avaliação do comprimento da Região 1 do domínio computacional.

Como é possível notar na Fig. 5.7 as duas malhas apresentaram comportamento estável no tempo. Pode ser observada uma pequena diferença entre as cristas e as cavas das ondas obtidas através da utilização de cada malha. A Tabela 5.3 apresenta o Erro Médio Absoluto (MAE) para cada malha testada em relação à malha analítica obtida através da teoria Stokes de 2ª Ordem.

Tabela 5.3. Teste do comprimento da Região 1 da Fig. 5.5

Comprimento da Região 1 (m)	MAE (%)
30	7,437
60	7,545

Baseado no fato do MAE em relação à onda analítica ter apresentado diferença de 0,108 % e que a malha com menor região irregular apresentou melhores resultados, definiu-se que o comprimento utilizado para a Região 1 do domínio computacional será de 30 m.

Para avaliação da influência da qualidade de malha e comprimento da Região 1 foi utilizado um passo de tempo $\Delta t = 0,05$ s, recomendação obtida no estudo de Machado et al. (2017). Objetivando avaliar a influência do passo de tempo, foram considerados também os valores de $\Delta t = 0,025$ s e $\Delta t = 0,0125$ s. A Fig. 5.8 apresenta os resultados obtidos para esta comparação.

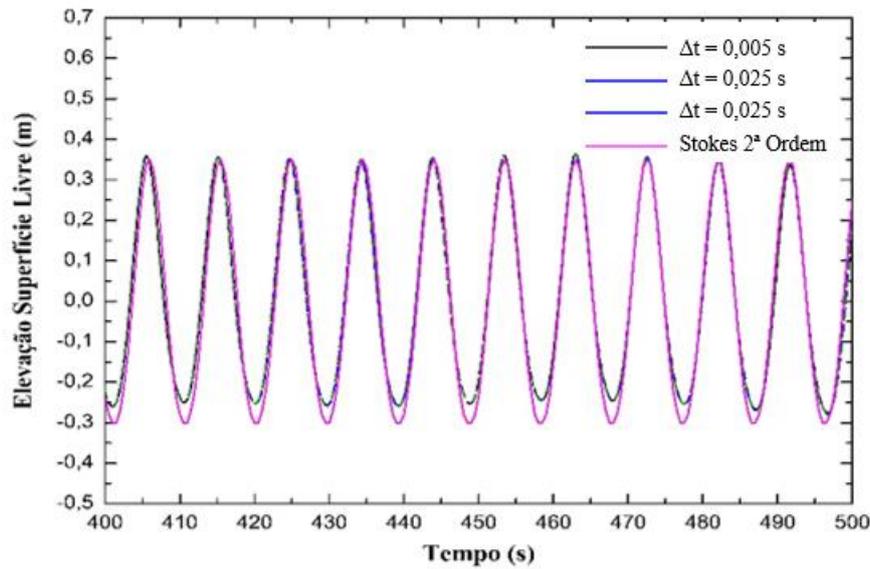


Figura 5.8 - Teste de independência de passo de tempo

Notar na Fig. 5.8 que a diminuição no passo de tempo não interferiu significativamente na acurácia dos resultados, de tal forma que se optou por utilizar o passo de tempo de 0,05 s para as demais simulações, o mesmo utilizado por Machado et al. (2017).

Desta forma as Figs. 5.9-2.14 apresenta a comparação entre a onda simulada e a onda analítica, obtida através da Teoria de Stokes de 2ª Ordem, para os 900 s de simulação na sonda localizada na posição $x = 120\text{m}$.

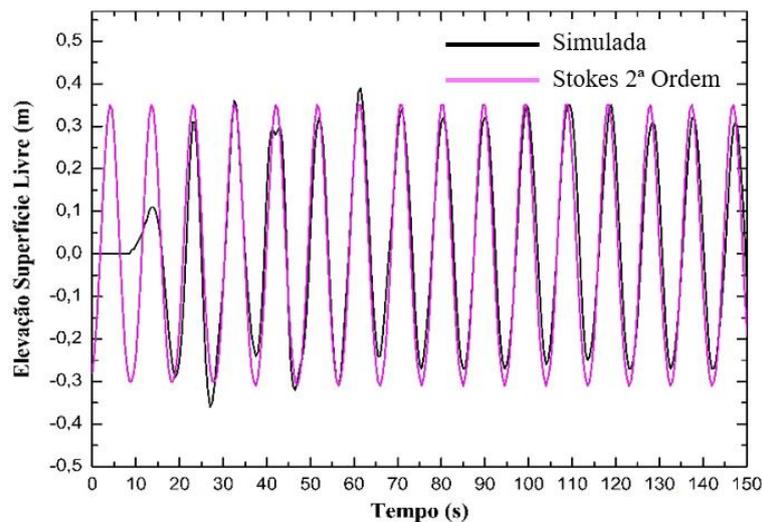


Figura 5.9 - Geração de ondas regulares: 0 a 150 s.

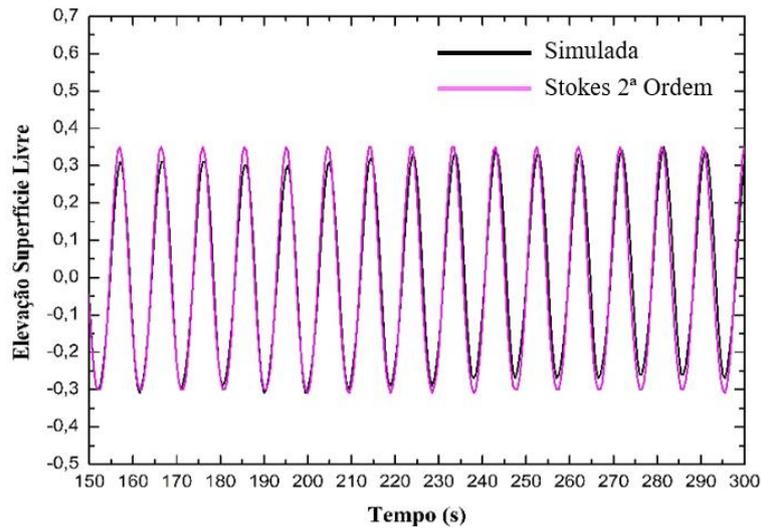


Figura 5.10 - Geração de ondas regulares: 150 a 300 s.

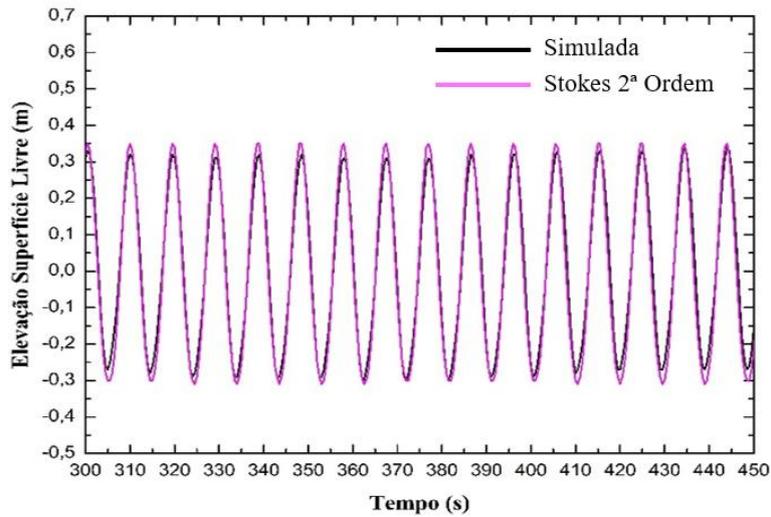


Figura 5.11 - Geração de ondas regulares: 300 a 450 s.

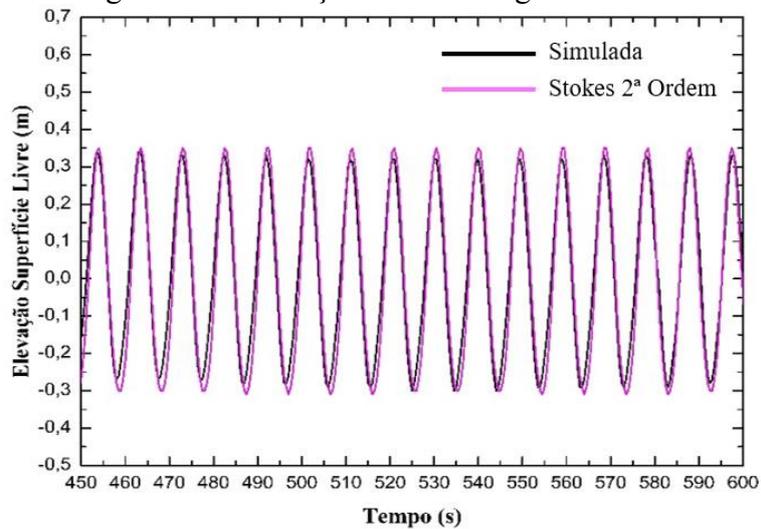


Figura 5.12 - Geração de ondas regulares: 450 a 600 s.

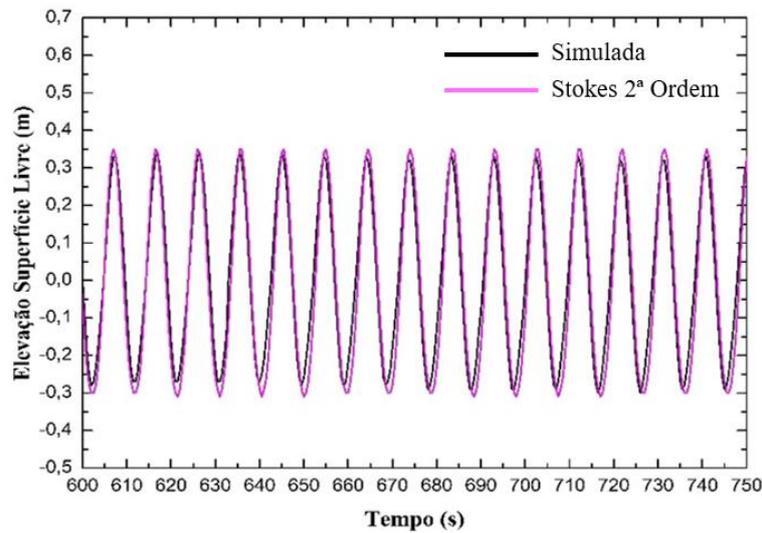


Figura 5.13 - Geração de ondas regulares: 600 a 750 s.

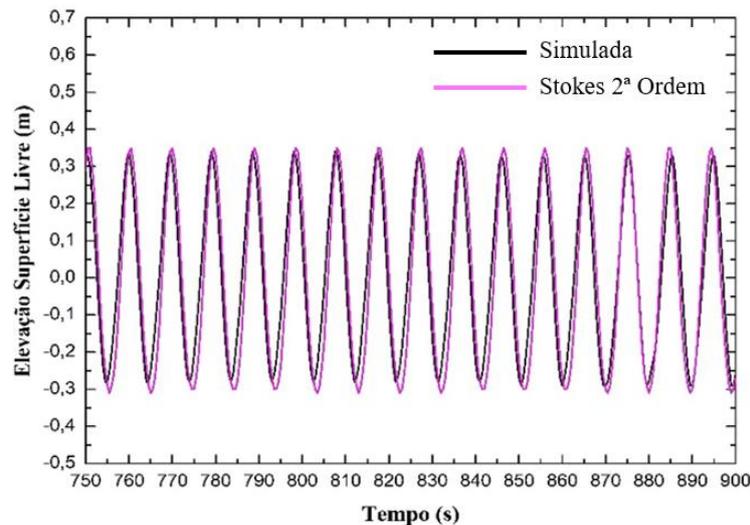


Figura 5.14 - Geração de ondas regulares: 750 a 900 s.

5.4. Verificação do Modelo Numérico na Região do Dispositivo

Visando garantir a acurácia da medição do volume de água incidente no reservatório do dispositivo de galgamento, realizou-se um estudo de qualidade da malha para a região do canal de ondas contendo o dispositivo. Para isso, é necessário destacar que a denominada Região do Dispositivo encontra-se dentro da Região 2 do canal de ondas da Fig. 5.5. Região esta, onde, segundo a recomendação apresentada em Martins et al. (2016), utilizou-se uma malha estruturada.

Inicialmente, destaca-se que o estudo de qualidade de malha para a Região do Dispositivo tange a avaliação da discretização do domínio computacional apenas no eixo horizontal. Inicialmente, avaliou-se a malha estruturada proposta por Gomes et al. (2012), que prevê a discretização horizontal $\Delta x_{RD} = 50$ volumes de malha por comprimento de onda. Além desta, avaliou-se três outras malhas

apresentando maior refino nesta direção, são elas: $\Delta x_{RD} = 50, 75, 100$ e 125 volumes por comprimento de onda. A Fig 5.10 apresenta o domínio computacional utilizado, destacando a Região do Dispositivo.

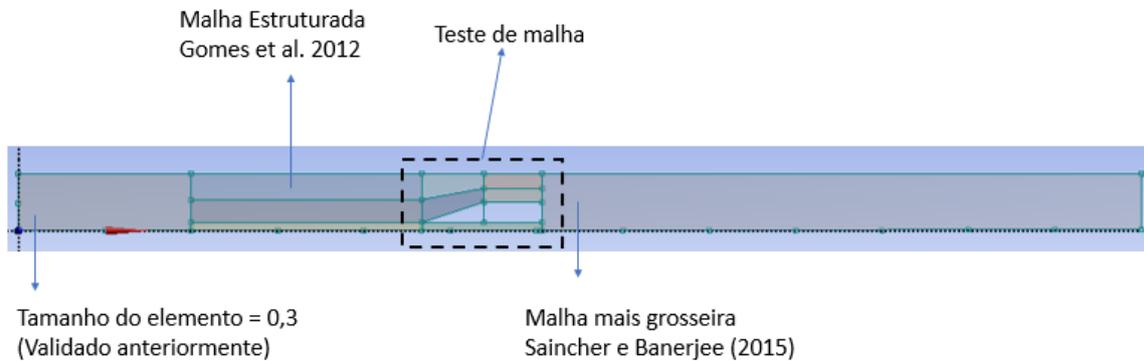


Figura 5.15 – Ilustração do domínio computacional do canal de ondas considerando o dispositivo de galgamento.

Para comparar os casos, inicialmente, computou-se a vazão mássica de água na entrada do reservatório do dispositivo de galgamento, vide Fig. 5.15. Foi possível constatar que, para todos os casos estudados, o reservatório do dispositivo transborda a partir de aproximadamente 750 s de simulação.

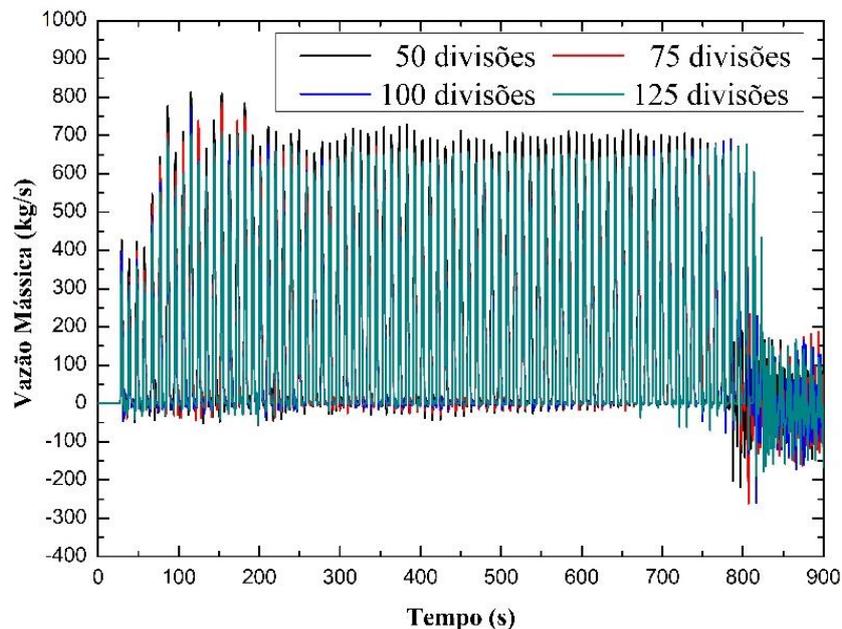


Figura 5.16 – Comparação da vazão mássica para $\Delta x_{RD} = 50, 75, 100$ e 125 volumes por comprimento de onda.

A Tabela 5.4 apresenta a quantidade total de água no reservatório a 700 s de simulação para cada uma das malhas analisadas, assim como a diferença relativa entre os resultados obtidos.

Tabela 5.4. Teste de independência de malha no dispositivo.

Divisões por comprimento de onda	Quantidade de água (kg)	Diferença relativa
50	120.802,88	-
75	109.353,95	9,48%
100	106.659,80	2,46%
125	105.412,51	1,17%

Com a análise dos resultados apresentados na Tab. 5.4 verifica-se que a malha com 125 divisões para cada comprimento de onda é a malha independente para a região do dispositivo.

5.4. Comparação das Ondas considerando um Dispositivo de Galgamento localizado no município de Rio Grande

Conforme mencionado anteriormente, este problema consiste em calcular numericamente a massa de água que entra no reservatório do dispositivo de galgamento inserido em um canal de ondas em escala de real. O objetivo é comparar o desempenho do conversor quando submetido às ondas irregulares de um estado de mar realista - através de velocidades orbitais de propagação da onda obtidas do software Spec2Wave (SPEC2WAVE, 2019) - com seu desempenho sob a incidência de ondas regulares representativas desse estado de mar realístico. O estado de mar realístico para a cidade de Rio Grande tem suas principais características indicadas na Tab. 5.5.

Tabela 5.5. Resumo das principais características da onda de Rio Grande.

Descrição	Valor
Localização do Ponto	-52° 17' 47.25' W, -032° 22' 30.95' S
Distância da costa	2.000 m
Profundidade do canal	9,5177 m
Características médias do intervalo de maior ocorrência	$H_s = 0,66$ m e $T_p = 8,10$ s
Data e hora do fenômeno com características mais similares às médias do intervalo de maior ocorrência	08/09/2014 08:15
Características deste estado de mar	$H_s = 0,6599$ m e $T_p = 8,3791$ s
Teoria de Onda Regular Aplicável	Stokes de 2ª Ordem

Inicialmente, foram comparadas a elevação da superfície livre e a vazão mássica

medidas na entrada do reservatório do dispositivo de galgamento submetido às ondas irregulares e regulares. O objetivo desta comparação foi analisar o comportamento dos picos de vazão para ambas as abordagens e como se relacionam com a elevação da superfície livre. A partir disso, foram discutidas as diferenças, em termos de desempenho, entre as duas situações, e realizada uma análise visando apurar se a simplificação realizada com a utilização de ondas regulares em simulações numéricas do dispositivo de galgamento representa de forma adequada seu comportamento fluidodinâmico. As Fig. 5.12 e 5.13 apresentam os resultados aqui mencionados.

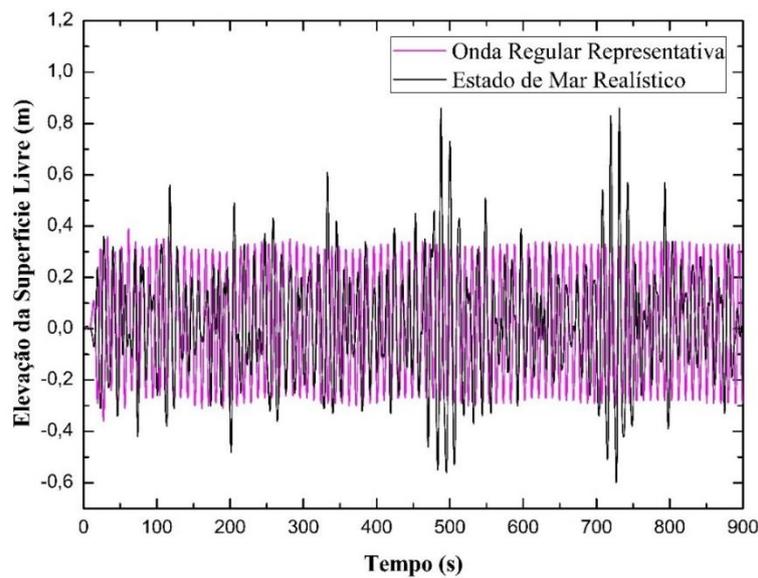


Figura 5.17 - Elevação da superfície livre obtida com as ondas regulares e irregulares para o ponto P6, na costa de Rio Grande.

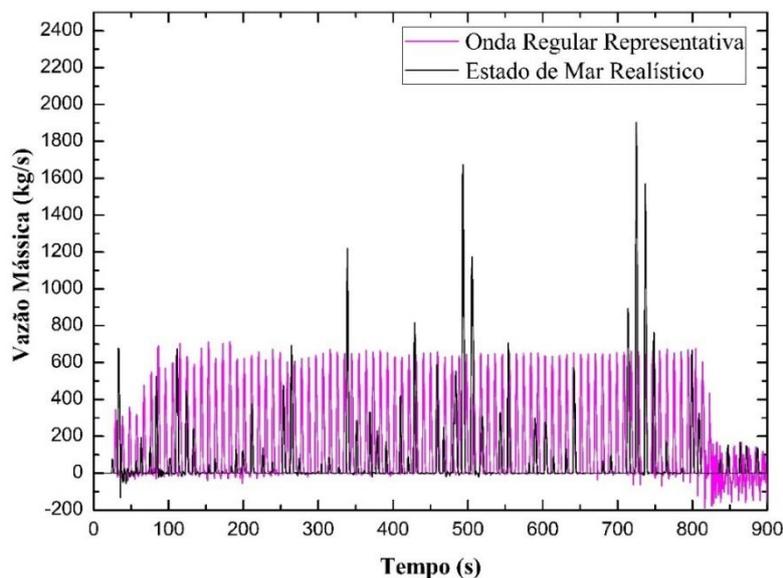


Figura 5.18 – Vazão mássica na entrada do reservatório para a ondas regulares e irregulares para o ponto P6, na costa de Rio Grande.

Conforme pode-se observar na Fig. 5.17 e como já era esperado a altura das ondas regulares é sempre a mesma durante todo o período de tempo simulado no local medido, nos resultados da simulação ela sofre pequena variação no decorrer do tempo provavelmente relacionados ao amortecimento da onda, a inércia inicial do tanque, a resistência ao escoamento e à presença do dispositivo. Devido às suas características essencialmente regulares é esperado também que os picos de vazão sejam regulares, o que pode ser confirmado nos resultados obtidos e apresentados na Fig. 5.18. Pode ser inferido ainda, que os primeiros picos de vazão na entrada do reservatório são menores do que os outros para as ondas regulares, isso acontece por causa da inércia do canal de ondas, que parte do repouso e faz com que as primeiras ondas propagadas sejam menores do que as seguintes. Em relação às ondas regulares, ainda é possível destacar que o tanque do reservatório encheu pouco depois de 800 s de simulação para este caso, proporcionando assim valores negativos para a vazão mássica na parte superior do reservatório, como pode ser observado na Fig. 5.18. Entre o intervalo de 100 s a 800 s de simulação, a vazão mássica na entrada do reservatório manteve-se estável e em torno de 600 kg/s.

Conforme já esperado, o estado realístico de mar apresenta comportamento irregular, tanto no que diz respeito à série de elevação da superfície livre, quanto à vazão mássica incidente no reservatório do dispositivo. Comportamento, este, também encontrado no estudo de Hübner et al. (2018). Por fim, foi possível observar, na Fig. 5.13, que o reservatório do dispositivo de galgamento não transborda quando submetido às ondas irregulares do estado de mar realístico. Comportamento este, diferente do apresentado com as ondas regulares representativas, quando o dispositivo transborda depois dos 800 s de simulação. Desta forma as comparações e análises feitas aqui limitam-se a este intervalo de simulação.

Visando avaliar quantitativamente o desempenho do conversor de galgamento em relação à magnitude da massa de água no reservatório, obteve-se a quantidade total de água que galgou a rampa do dispositivo para as duas abordagens. Especificamente essa diferença foi de 2,29 vezes superior para as ondas regulares do que para as ondas irregulares do estado realístico de mar, em 800 segundos de simulação: ondas regulares = 120.706,11 kg e ondas irregulares = 52.486,70 kg. Outra observação importante é que, para as ondas irregulares o pico máximo de vazão mássica foi consideravelmente maior do que para as ondas regulares, com uma diferença de 2,67 vezes (Ondas Regulares = 713,14 kg/s e Ondas Irregulares = 1.904,33 kg/s). Ainda pode-se analisar que ocorrem 3 intervalos de tempo em que a vazão na entrada do dispositivo foi consideravelmente maior para as ondas irregulares do estado realístico de mar do que para as ondas regulares representativas. Estes instantes estão

diretamente relacionados com os instantes em que ocorreram as maiores alturas de ondas do estado realístico de mar.

Além de comparar a vazão mássica e a elevação da superfície livre, analisou-se o comportamento fluidodinâmico do problema para ambos os casos. Nesta etapa serão avaliados o comportamento fluidodinâmico do problema no instante em que ocorrem os picos máximos de vazão, no instante referente a 800 s de simulação (já que logo após o dispositivo transborda para as ondas regulares representativas) e no instante final da simulação para ambas as simulações.

A Fig. 5.19 apresenta o comportamento fluidodinâmico para os picos máximo de vazão mássica para o ponto em análise. Como pode ser observado, o instante em que ocorre a máxima vazão na entrada do reservatório é diferente para as duas abordagens. Considerando a Fig. 5.13, para as ondas regulares representativas a vazão máxima ocorre logo no início da simulação, em $t = 175$ s; já para as ondas irregulares do estado realístico de mar esse pico ocorre no instante $t = 720$ s. A Fig. 5.19 permite ainda avaliar o comportamento do dispositivo instantes antes e após a ocorrência do fenômeno, com isso pode-se inferir que para as ondas regulares representativas o dispositivo passa por este fenômeno de uma maneira mais suave do que para as ondas irregulares, devido a maior quantidade de massa de água que incide no dispositivo neste curto intervalo de tempo para essa última situação.

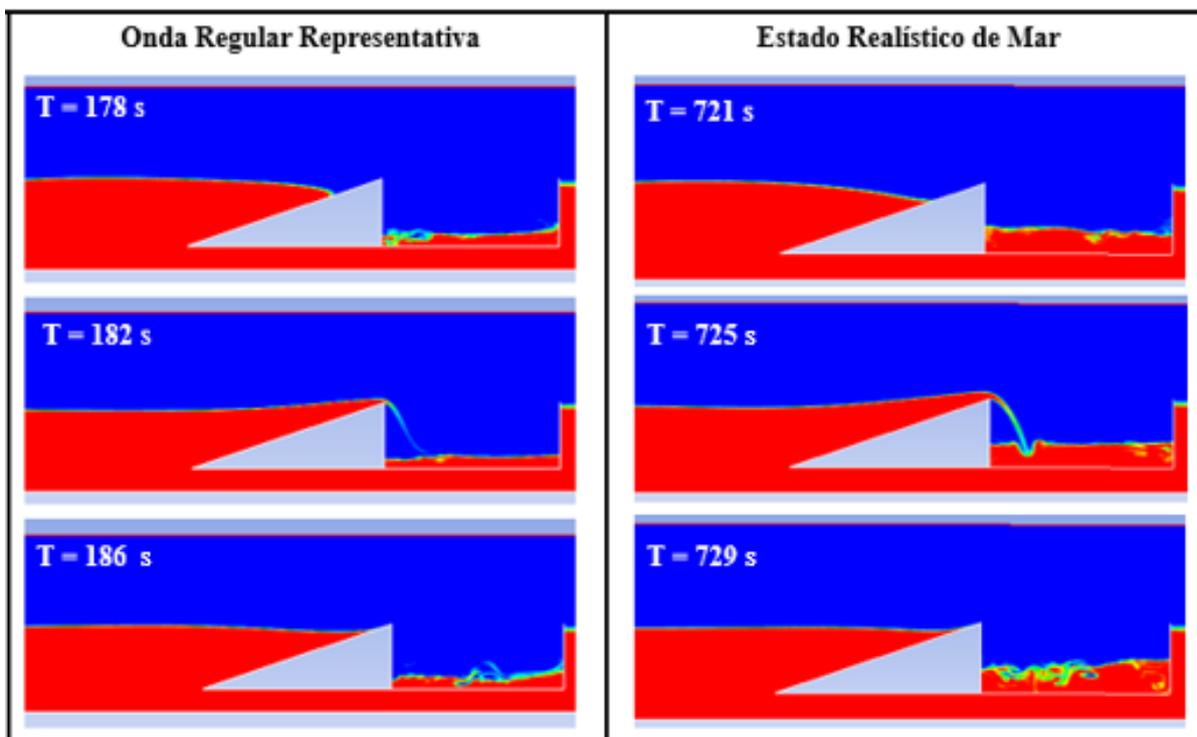


Figura 5.19 - Comportamento fluidodinâmico do dispositivo no instante em que ocorrem as máximas vazões na entrada do reservatório para o ponto P6, na costa do Rio Grande.

A Figuras 5.20 e 5.21 apresentam o comportamento fluidodinâmico do dispositivo no instantes $t = 800$ s e $t = 900$ s (tempo final da simulação), para ambas as abordagens.

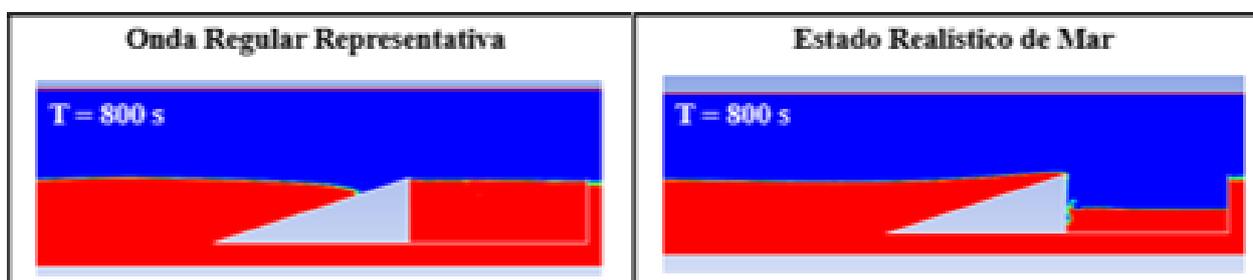


Figura 5.20 - Comportamento fluidodinâmico do problema para ponto P6, na costa do Rio Grande, no instante $t = 800$ s.

A Figura 5.20 demonstra que a diferença calculada através da vazão mássica na entrada do reservatório, assim como o gráfico apresentado na Fig. 5.18 estão coerentes com o comportamento fluidodinâmico do problema, já que aos 800 s o tanque do reservatório sob a incidência das ondas regulares representativas estava em vias de transbordar.

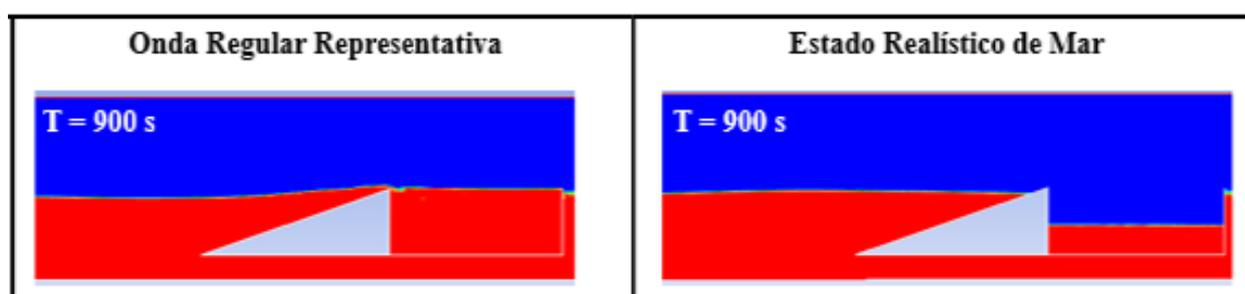


Figura 5.21 - Comportamento hidrodinâmico do problema para o ponto P6, na costa de Rio Grande, no final da simulação.

Note na Fig. 5.21 que para o instante final da simulação o reservatório está completamente cheio para as ondas regulares representativas, já para as ondas irregulares do estado realístico de mar o nível do reservatório está abaixo da metade.

5.5. Comparação das Ondas considerando um Dispositivo de Galgamento localizado no município de Santa Vitória do Palmar

Inicialmente, a Tab. 5.6 apresenta as principais características da onda analisada nesta seção.

Tabela 5.6. Resumo das principais características da onda de Santa Vitória do Palmar.

Descrição	Valor
Localização do Ponto	-53° 04" 29.27' W, -033° 32" 42.47' S
Distância da costa	2.000 m
Profundidade do canal	11,091 m
Características médias do intervalo de maior ocorrência	$H_s = 0,78$ m e $T_p = 7,27$ s
Data e hora do fenômeno com características mais similares às médias do intervalo de maior ocorrência	31/07/2014 18:30
Características deste estado de mar	$H_s = 0,7799$ m e $T_p = 8,3791$ s
Teoria de Onda Regular Aplicável	Stokes de 2ª Ordem

As Figuras 5.22 e 5.23 apresentam os resultados da elevação da superfície livre e da vazão mássica na entrada do reservatório para as duas abordagens propostas, aplicadas ao ponto situado em Santa Vitória do Palmar.

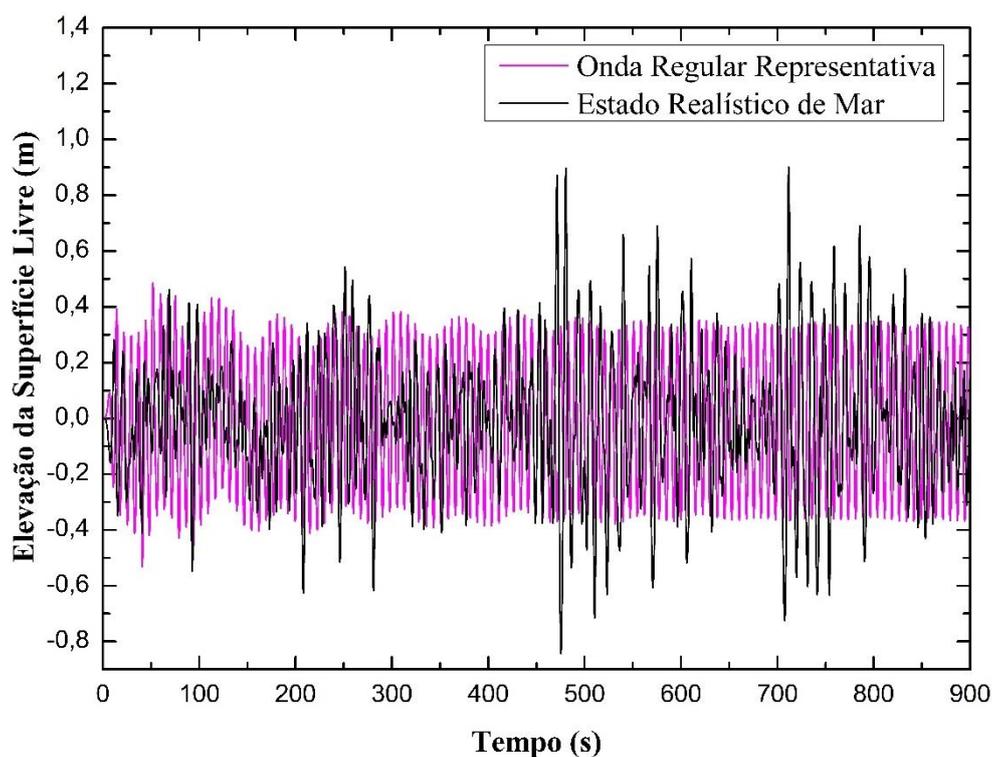


Figura 5.22 - Elevação da superfície livre obtida com as ondas regulares e irregulares para o ponto P2, na costa de Santa Vitória do Palmar.

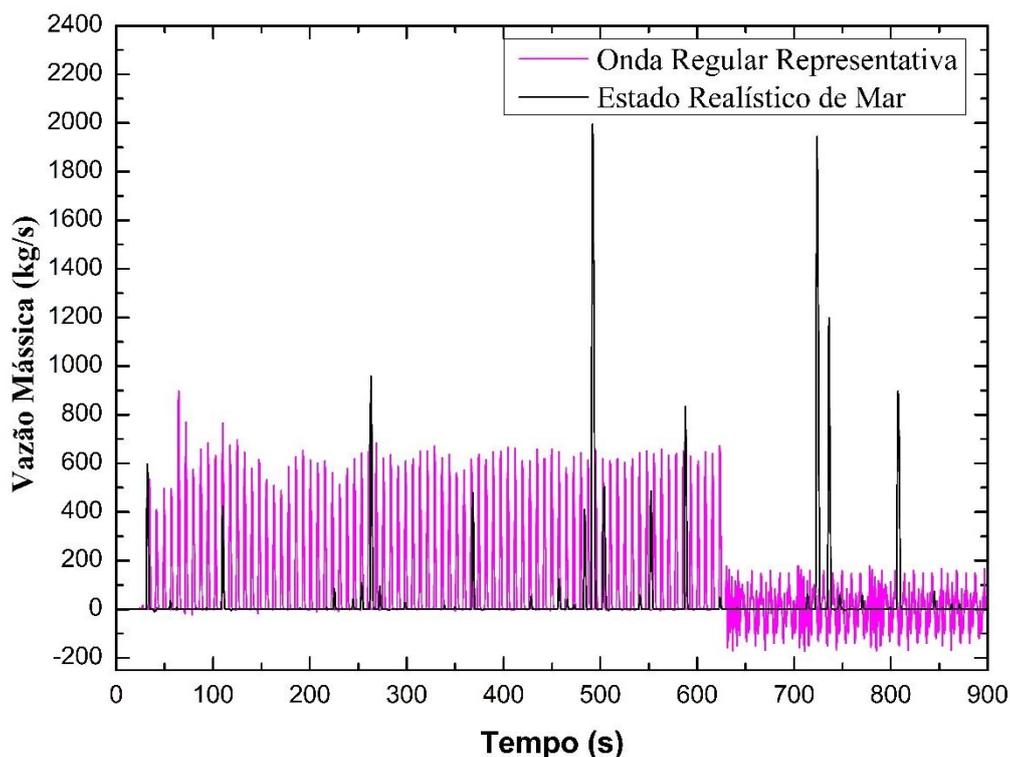


Figura 5.23 - Vazão mássica na entrada do reservatório para as ondas regulares e irregulares para o ponto P2, na costa de Santa Vitória do Palmar.

É possível observar na Fig 5.23 que quando sob a incidência das ondas irregulares do estado realístico de mar, a entrada de água no reservatório ocorreu com menos frequência, porém com picos maiores do que quando submetido às ondas regulares representativas. O maior pico de vazão para as ondas irregulares do estado realístico de mar foi 2,82 vezes maior do que para as ondas regulares representativas.

Por outro lado, o reservatório do dispositivo captou 3,50 vezes mais água quando submetido às ondas regulares representativas do que quando submetido às ondas irregulares do estado realístico de mar. Ainda comparando as duas abordagens, é possível inferir que devido ao fato do estado realístico de mar possuir parte das ondas menores do que as ondas regulares e que estas não conseguem vencer a rampa do dispositivo a captação de água no reservatório é consideravelmente menor quando o dispositivo está sob a incidência deste estado de mar, apesar de este apresentar picos de captação consideravelmente superiores que quando submetido às ondas regulares representativas.

5.6. Comparação das Ondas considerando um Dispositivo de Galgamento localizado no município de Tavares

A Tabela 5.7 apresenta as principais características da onda analisada no ponto localizado no município de Tavares.

Tabela 5.7: Resumo das principais características da onda de Tavares.

Descrição	Valor
Localização do Ponto	-51° 06" 20.37' W, -031° 27" 7.97' S
Distância da costa	2.000 m
Profundidade do canal	13,977 m
Características médias do intervalo de maior ocorrência	$H_s = 0,78$ m e $T_p = 7,27$ s
Data e hora do fenômeno com características mais similares às médias do intervalo de maior ocorrência	31/07/2014 18:30
Características deste estado de mar	$H_s = 0,7801$ m e $T_p = 8,3791$ s
Teoria de Onda Regular Aplicável	Stokes de 2ª Ordem

As Figuras 5.24 e 5.25 apresentam os resultados da elevação da superfície livre e da vazão mássica na entrada do reservatório para os dois casos analisados.

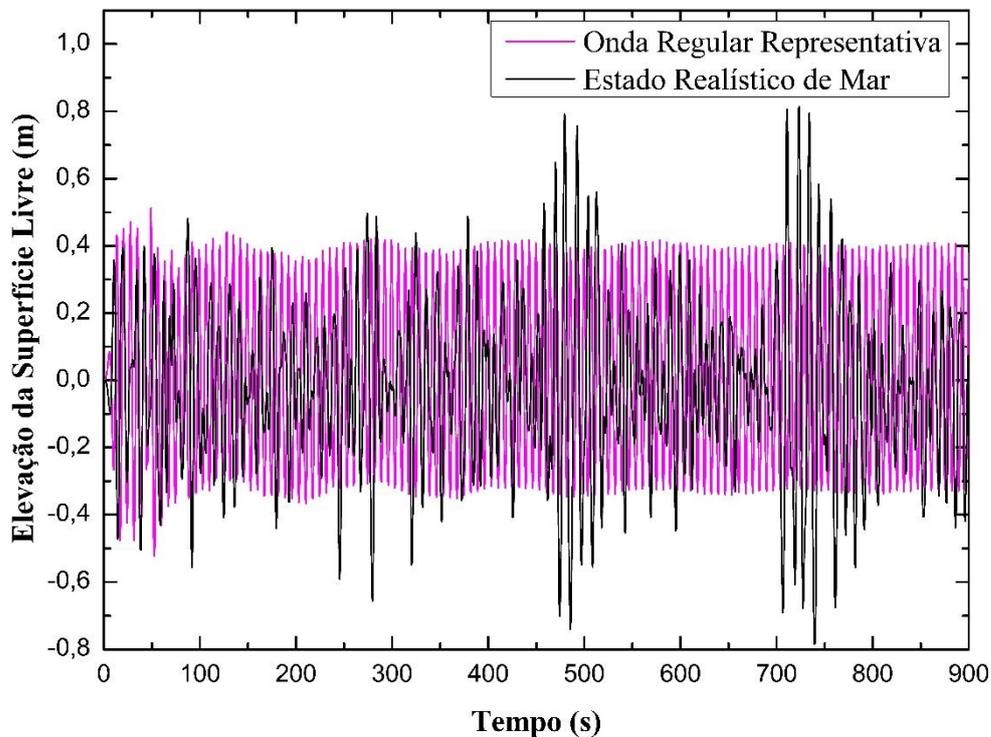


Figura 5.24 - Elevação da superfície livre obtida com as ondas representativa e realística para o ponto P10, na costa de Tavares.

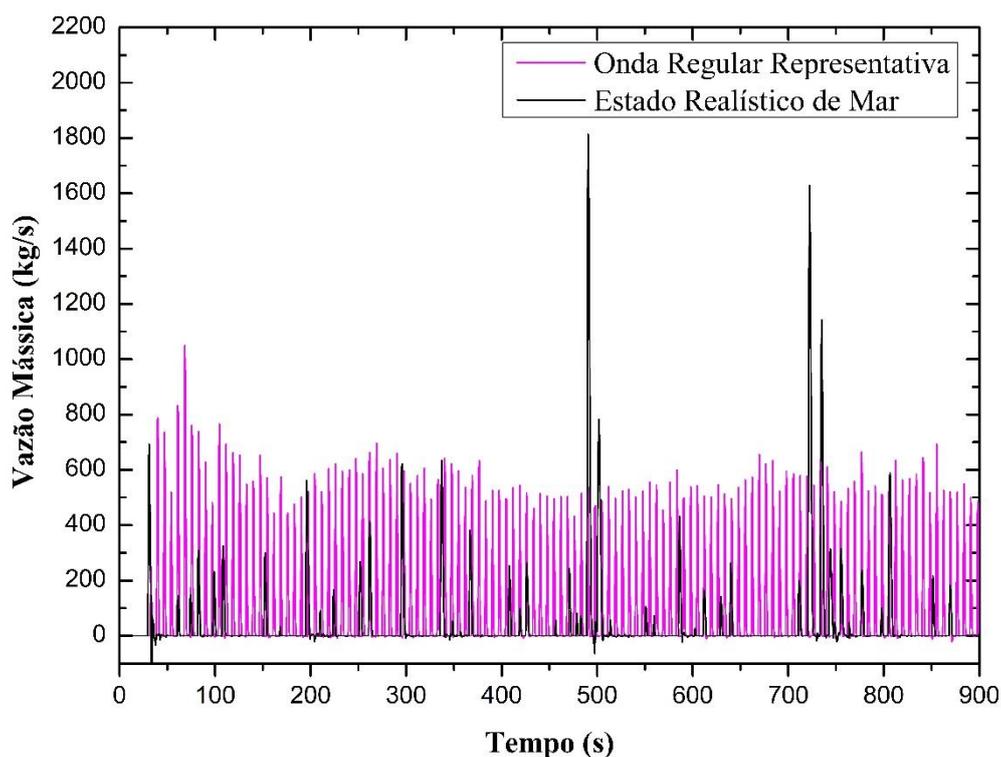


Figura 5.25 - Vazão mássica na entrada do reservatório para as ondas regulares e irregulares para o ponto P10, na costa de Tavares.

Com auxílio das Fig. 5.24 e 5.25 é possível avaliar que tanto a captação de água pelo reservatório do dispositivo como a altura da onda se comportaram de maneira mais estável quando o dispositivo foi submetido a ondas regulares representativas do que sob a incidência de ondas irregulares de um estado de mar realístico.

Além disso, é possível observar na Fig. 5.25 que a captação de água no reservatório apresentou um pico de vazão máximo maior quando o dispositivo foi submetido às ondas irregulares de um estado realístico de mar do que quando submetido a ondas irregulares representativas. A diferença entre os picos de vazão máximo para ambas as abordagens foi de 1,63 vezes.

Devido à regularidade da captação de água na entrada do reservatório o dispositivo captou 2,63 vezes mais água quando submetido a ondas regulares representativas do que quando submetido a ondas irregulares de um estado realístico de mar, apesar das diferenças nos picos de captação.

5.7. Análise dos resultados obtidos para as três localidades estudadas

Analisando os resultados obtidos e apresentados nas seções anteriores (5.4, 5.5 e 5.6) é possível perceber que alguns comportamentos se repetiram para os diferentes locais estudados.

Inicialmente, analisando as Fig. 5.12, 5.17 e 5.19, é possível observar que as ondas irregulares de um estado realístico de mar apresentam um comportamento instável e imprevisível, sem

repetições, em todos locais analisados. Este comportamento causa a captação de água no reservatório do dispositivo igualmente instável, com considerável diferença entre os picos de captação de água pelo reservatório, como pode ser observado nas Figs. 5.13, 5.18 e 5.20.

Para as três localidades avaliadas, foi detectada diferença na quantidade de massa de água captada pelo dispositivo, sempre captando mais água quando submetido a ondas regulares representativas do que quando submetido a ondas irregulares de um estado realístico de mar. Isso acontece porque, apesar dos picos instantâneos de vazão na entrada do reservatório maiores para as ondas irregulares, a maior frequência de ocorrência com picos intermediários para as ondas regulares acaba superestimando a eficiência do dispositivo.

Além disso, observando as Figs. 5.13, 5.18 e 5.20, é possível avaliar que o dispositivo transbordou quando submetido às ondas regulares representativas para os dois primeiros locais avaliados e não transbordou para o último. Este fenômeno aconteceu apesar de que as ondas regulares representativas não apresentarem grandes diferenças, principalmente em relação aos dois últimos casos ambos, com o mesmo período de pico ($T_p = 8,3791$ s) e com diferença de 0,0002 m na altura significativa. Desta forma, é possível inferir que a variável que proporcionou a diferença observada na captação de água do dispositivo foi a altura da linha d'água para cada localidade, com diferença de 2,8860 m de profundidade a mais para o último caso do que para o segundo. Isto concorda com os resultados apresentados em Martins et al. (2017), que apresenta alterações na eficiência do dispositivo devido à profundidade do mesmo.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um comparativo do princípio de funcionamento de um dispositivo conversor de energia das ondas do tipo galgamento quando submetido à incidência de ondas irregulares de um estado realístico de mar e quando submetido a incidência ondas regulares representativas deste estado de mar. A comparação aqui realizada foi feita utilizando procedimentos numéricos e software de dinâmica dos fluidos computacional.

É importante mencionar que foram apresentadas algumas particularidades que tornam o trabalho único na literatura. A primeira dela é o fato de simular numericamente o princípio de funcionamento do dispositivo conversor de energia das ondas do tipo galgamento por 15 min, permitindo fazer avaliações novas sobre o seu funcionamento.

A segunda novidade é analisar numericamente o conversor do tipo galgamento utilizando a metodologia proposta por Machado et al. (2017), que permite a geração de ondas irregulares de um estado realístico de mar; isso também permite avaliações novas sobre o funcionamento do dispositivo, coisa que antes não era possível avaliar.

Além disso, o presente trabalho trouxe avanços no modelo computacional para geração e propagação de ondas através da imposição da condição de contorno de velocidade de entrada por meio de perfis de velocidades. Foi possível determinar que uma malha triangular, no início do tanque de ondas, com comprimento de 30 m e elementos de 0,3 m apresenta boa convergência e resultados acurados para geração e propagação das ondas através desta opção de imposição da condição de contorno de velocidade prescrita.

Comparando os resultados do funcionamento do dispositivo sob a incidência de ondas irregulares de estados de mar realísticos para três diferentes pontos da costa do estado do Rio Grande do Sul e suas respectivas ondas regulares representativas, foi possível concluir que a vazão mássica na entrada do dispositivo é mais estável e previsível quando o dispositivo é submetido por uma onda regular e mais imprevisível quando submetido a um estado de mar real, o que já era esperado.

Ainda é possível avaliar que os picos de vazão são maiores quando o dispositivo é submetido a um estado realístico de mar, porém são menos frequentes. O pico máximo de vazão foi: 2,67 vezes (para o ponto P6), 2,82 vezes (para o ponto P2) e 1,63 vezes (para o ponto P10) maior para as ondas irregulares de um estado de mar realístico quando comparado às ondas regulares representativas de um estado de mar realístico.

Por outro lado, apesar de picos de vazão maiores quando o dispositivo é submetido a um estado realístico de mar, a baixa frequência de ocorrência destes picos faz com que o reservatório do

dispositivo capte 2,29 vezes (para o ponto P6), 3,5 vezes (Para o ponto P2) e 2,63 vezes (Para o ponto P10) mais água quando o dispositivo era submetido a um estado regular de mar.

Uma importante conclusão observada é que a consideração de ondas regulares incidindo sobre o conversor de galgamento, abordagem amplamente utilizada na literatura, conduz a resultados superestimados em relação ao desempenho do dispositivo. Portanto, em estudos que tenham como objetivo avaliar a potência disponível do dispositivo de galgamento recomenda-se o uso de ondas irregulares que representam adequadamente o estado de mar da região onde o conversor será instalado.

Portanto, como demonstrado, o presente trabalho apresentou importantes avanços para futuros trabalho de geração e propagação de ondas computacionalmente e de avaliação de dispositivos conversores de energia das ondas. Através disso existem vários aspectos a avançar nas análises de canais de ondas e de dispositivos de conversão de energia, desta forma ficam algumas sugestões para novos trabalhos:

- utilizar o modelo computacional aqui descrito para determinar a geometria ótima do dispositivo quando submetido a um estado realístico de mar e avaliar se as recomendações combinam com aquelas propostas quando o dispositivo foi otimizado a partir da incidência de ondas regulares representativas;
- comparar a eficiência do dispositivo quando submetido a um estado realístico de mar com a eficiência do equipamento submetido a ondas regulares representativas de um estado realístico de mar;
- aprimorar o modelo computacional de modo que a água que entra no reservatório possa retornar para o oceano, a fim de tornar a simulação ainda mais próxima da realidade e de não restringir o tempo de simulação;
- complementar o estudo de malha do dispositivo e aprimorar o modelo de tal forma que seja possível utilizar uma malha ainda mais estruturada, diminuindo ainda mais o erro obtido nas simulações;
- utilizar a metodologia proposta para simular o comportamento do dispositivo quando submetido a fenômenos naturais atípicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, D. V. E.; SANTOS, A. L. G.; SANTOS, E. D.; SOUZA, J. A. Overtopping device numerical study: Openfoam solution verification and evaluation of curved ramps performances. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v 132, p 411 – 423, 2019.
- CHAKRABARTI, S. K. **Handbook of offshore engineering**. v 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 2005.
- CRUZ, J.; SARMENTO, A., Energia das Ondas – Introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais. **Instituto do Ambiente**, 2004;
- DEAN, R. G., DALRYMPLE, R.A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. Vol. 2, World Scientific, Singapura. 1991;
- DOS SANTOS, E. D. **Análise numérica de escoamentos turbulentos não-reativos com transferência de calor por convecção e radiação**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- EPE. Balanço energético nacional: Ano Base 2018. **Ministério de Minas e Energia**. Brasil, 2019.
- ESPINDOLA, R. L., ARAÚJO, A. M. Wave energy resource of Brazil: An analysis from 35 years of ERA-Interim reanalysis data. **PLoS ONE 12(8): e0183501**, 2017.
- FALCÃO, A. F. O., Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, pp 899-918, 2010.
- FINNEGAN, W., GOGGINS, J., Linear irregular wave generation in a numerical wave tank, **Applied Ocean Research**, v 52, p 188 – 200, 2015.
- FONTANA, R. L. M., COSTA, S. S., SILVA, J. A. B., RODRIGUES, A. J., **Teorias Demográficas e o Crescimento Populacional no Mundo**. Cadernos de Graduação, Ciências Humanas e Sociais Unit, Aracajú, v.2, n.3, pp 113-124, 2015.
- FRIEDLINGSTEIN, P.; JONES, M. J.; O’SULLIVAN, M.; ANDREW, R. M.; HAUCK, J.; (...), Global Carbon Budget. **Earth System Science Data**, 11, p. 1783 – 1838, 2019;
- GOMES, M. N., OLINTO, C. R., ROCHA, L. A. O., SOUZA, J. A., Computational modeling of a regular wave tank. **Engenharia Térmica**, v. 8, n 1, p 44-45, 2009.
- GOMES, M. N., ISOLDI, L. A., DOS SANTOS, E. D., ROCHA, L. A. O., Análise de malhas para geração de ondas em tanques. **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. São Luiz

– Maranhão, 2012.

- GOULART, M. M.; MARTINS, J. C.; GOMES, M. N.; ACUNHA, J. I. C.; SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A.; SANTOS, E. D. Constructal Design de um dispositivo de galgamento OnShore em escala real para uma profundidade fixa. **Scientia Plena**, vol 11, n 8, p 1 – 10, 2015.
- HAN, Z., LIU, Z., SHI, H. Numerical study on overtopping performance of a multi-level breakwater for wave energy conversion. **Ocean Engineering**, 150, 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, n. 1, p. 201–225, 1981.
- HUBNER, R. G.; OLEINIK, P. H.; MARQUES, W. C.; GOMES, M. N.; SANTOS, E. D.; MACHADO, B. N.; ISOLDI, L. A. Numerical study comparing the incidence influence between realistic wave and regular wave over na overtopping device. **Engenharia Termica**, v 18, n 1, p 43 – 49, 2018.
- IAHNKE, L., P. **Energia das Ondas: Estado da arte e desenvolvimento de um modelo de simulação numérica para o princípio de galgamento**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande – RS, 2010.
- KINSMAN, B. **Wind Waves: their generation and propagation on the ocean surface**. Courier Corporation, 1965.
- KISNER, E. V.; MACHADO, B. N.; DOS SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O.; GOMES, M. N.; ISOLDI, L. A. Proposta de solução para a utilização de malha stretched aliada ao método de imposição de dados discretos como condição de contorno de velocidade prescrita na geração numérica de ondas. **VII SEMENGO**, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2018.
- LIANG, X. F., YANG, J., LI, J., XIAO, L., LI, X., Numerical Simulation of irregular wave-simulating irregular wave train. **Journal of Hydrodynamics**. v 22, p 537 – 545, 2010.
- LISBOA, R. C., TEIXEIRA, P. R. F., DIDIER, E., Simulação de ondas regulares e irregulares em canal de ondas bidimensional com praia numérica, **VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**, Rio Grande, RS, 2016.
- LIU, Z., HAN, Z., SHI, H., YANG, W. Experimental study on multi-level overtopping wave energy convertor under regular wave conditions. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v 10, p 651 – 659, 2017a.
- 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, 2017b.
- 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, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande – RS.
- MACHADO, B. N., 2017. **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 em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MACHADO, B. N., KISNER, E. V., PAIVA, M. S., GOMES, M. N., ROCHA, L. A. O., MARQUES, W. C., SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A.. Numerical Generation of Regular Waves Using Discrete Analytical Data as Boundary Condition of Prescribed Velocity. **XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC**, Florianópolis, SC, Brasil, 2017.
- MACHADO, F. M. M., LOPES, A. M. G., FERREIRA, A. D., Numerical simulation of regular waves: Optimization of a numerical wave tank, **Ocean Engineering**, v 170, p 89 – 99, 2018.
- MALISKA, C. R., Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. **LTC – Livros Técnicos e Científicos**, Rio de Janeiro, 2004;
- 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**, 118, 727-741, 2017a.
- MARTINS, J. C.; GOULART, M. M.; GOMES, M. N.; SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A. O.; ISOLDI, L. A.; SANTOS, E. D. Análise Numérica de um dispositivo de galgamento onshore comparando a influência de uma onda monocromática e de um espectro de onda. **Revista brasileira de energias renováveis**, v 6, n 3, p 472 – 488, 2017b.
- MIRANDA, G. B., GOMES, M.N., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D., ROCHA, L. A. O. Análise da influência das condições de contorno no efeito de reflexão na simulação numérica de ondas oceânicas. **Revista científica interdisciplinar interlogos**, v. 3, p. 1, 2018.
- MMA, Acordo de Paris. **Ministério do Meio Ambiente**, 2016. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 12/11/2020.
- MORK, G., BARSTOW, S., KABUTH, A., PONTES, M. T., Assessing the global wave energy potential. **29 International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**. Shangai, China, 2010.
- OLEINIK, P. H. **Desenvolvimento e aplicação de um modelo acoplável de conversão de**

- energia de ondas.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande – RS, 2017.
- PECHER, A., KOFOED, J. P., Handobook of Ocean Wave Energy. **Springer Open**, vol 7, 2017;
- REN21, **Renewables 2019: Global Status Report**, Paris, 2019.
- RODRIGUES, R., AGHENESE, A. P. D., SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O., GOMES, M. N., Análise da discretização temporal para a simulação numérica de um espectro de ondas do tipo Pierson – Moskowitz, **RIPE**, v 5, p 108 – 120, 2019.
- ROMANOWSKI, A.; TEZDOGAN, T.; TURAN, O. Development of a CFD methodology for the numerical simulation of irregular sea-states. **Acta Zoologica Bulgarica**. V 72, p 297-300. 2019;
- SAINCHER, S., BANERJEE, J., Design of a numerical wave tank and wave flume for low steepness waves in deep and intermediate water, **Procedia Engineering**, v 116, p 221 – 228, 2015.
- SEIBT, F. M., COUTO, E. C., DOS SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O., TEIXEIRA, P. R. F., Numerical study on the effect of submerged depth on the horizontal plate wave energy converter. **China Ocean Engineering**, v. 28, n. 5, p. 687-700, 2014.
- SPEC2WAVE. **O programa Spec2Wave: Manual do Usuário**, Phelype Oleinik, 2019.
- SRINIVASAN, V. SALAZAR, A. J., SAITO, K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. **Applied Mathematical Modeling**, vol. 35, n. 8, pp. 3710-3730, 2011.
- WWF. Living Planet Report - 2018: Aiming Higher. Grooten, M. and Almond, R.E.A.(Eds). WWF, Gland, Switzerland, 2018.*
- ZABIHI, M. K., MAZAHERI, S., MAZYAK, A. R., Wave generation in a numerical wave tank, **International Journal of Coastal & Offshore Engineering**, n 5, p 33 – 43, 2015.