

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

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA PROPAGAÇÃO DE
ESPECTRO DE ONDAS EM TANQUES

por

Luciano Rodrigues

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Modelagem Computacional

Orientador: Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes
Co-orientador: Prof. Dr. Liércio André Isoldi

Rio Grande, março, 2018

RESUMO

Em engenharia existem, fundamentalmente, três ferramentas para desenvolvimento de projetos e análises de problemas, métodos analíticos, métodos numéricos e experimentais. Os trabalhos experimentais de Engenharia Oceânica e Naval tem usado tanques de ondas. No entanto, considerando o avanço dos computadores e dos modelos numéricos atualmente, na literatura, há diversos estudos considerando tanque de ondas para a simulação numérica. Desta forma os pesquisadores tem cada vez mais utilizado a modelagem computacional para analisar os processos oceânicos, uma vez que a simulação numérica é uma importante metodologia na execução de um projeto de engenharia, pois o experimental muitas vezes não é possível, seja pelo elevado custo financeiro e até mesmo por segurança. Neste sentido, o presente trabalho apresenta uma metodologia de simulação numérica de espectro de ondas em tanques numérico. O objetivo é obter recomendações sobre a discretização espacial e temporal, influência do número de componentes de ondas no espectro de ondas, a influência da profundidade da superfície livre e a influência do número de pontos considerados para a montagem da curva de densidade de energia através da Transformada Rápida de Fourier. Para tanto é considerado um espectro de ondas do tipo Pierson–Moskowitz, com altura e período significativos definidos. Além disso, uma importante atualização no modelo computacional é a eliminação da reflexão das ondas através de uma região de amortecimento, chamada de praia numérica. Para a solução numérica é empregado um código de dinâmica dos fluidos computacional, FLUENT[®] baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). A geometria e a geração da malha são desenvolvidas no software GAMBIT[®]. O modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) é aplicado no tratamento da interação água-ar. As recomendações obtidas, principalmente para a discretização espacial e temporal, indicam que é possível reproduzir numericamente a propagação de espectro de ondas em tanques com acurácia. Com isto, entende-se que este trabalho poderá ser utilizado como referencial, principalmente no estudo numérico de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, pois com as recomendações obtidas é possível simular computacionalmente espectro de ondas em tanques de ondas, o que representa um modelo mais realístico.

Palavras-chaves: Tanque de ondas, *Volume Of Fluid*, Espectro de Ondas, Praia Numérica.

ABSTRACT

In engineering there are fundamentally three tools for project development and problem analysis, analytical methods, numerical and experimental methods. The experimental works of Oceanic and Naval Engineering have used wave tanks. However, considering the advancement of computers and numerical models currently, in the literature, there are several studies considering a wave tank for numerical simulation. In this way researchers have increasingly used computational modeling to analyze oceanic processes, since numerical simulation is an important methodology in the execution of an engineering project, since the experimental is often not possible, either because of the high financial cost or even for security. In this sense, the present work presents a methodology of numerical simulation of wave spectrum in numerical tanks. The objective is to obtain recommendations on the spatial and temporal discretization, influence of the number of wave components on the wave spectrum, influence of the free surface depth and the influence of the number of points considered for the assembly of the energy density curve through of the Fast Fourier Transform. For this, a Pierson-Moskowitz-type wave spectrum, with defined height and period, is considered. In addition, an important update in the computational model is the elimination of the reflection of the waves through a region of cushioning, called numeric beach. For the numerical solution, a computational fluid dynamics code, FLUENT[®], is used based on the Finite Volume Method (MVF). Geometry and mesh generation are developed in GAMBIT[®] software. The Multiphase Volume of Fluid (VOF) model is applied in the treatment of water-air interaction. The recommendations obtained, mainly for spatial and temporal discretization, indicate that it is possible to reproduce numerically the propagation of wave spectrum in tanks with accuracy. With this, it is understood that this work can be used as a reference, mainly in the numerical study of sea wave energy converters in electric energy, because with the recommendations obtained it is possible to simulate the wave spectrum in tanks of waves, which represents a more realistic model.

Keywords: Waves tank, Volume of fluid, Wave spectrum, Numerical beach.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Motivação.....	11
1.2. Justificativa	12
1.3. Proposta do trabalho e objetivos	14
2. ESTADO DA ARTE	15
2.1. Simulação numérica em tanque de ondas.....	15
2.2. Simulação numérica de espectro de ondas.....	18
3. PROBLEMA FÍSICO	21
3.1. Teoria das ondas oceânicas	21
3.2. Teoria do espectro de ondas do tipo Pierson - Moskowitz.....	25
3.3. Representação computacional do tanque de ondas com a técnica da praia numérica	29
3.4. Monitoramento da elevação da superfície livre	30
4. MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	32
4.1. Método <i>Volume of Fluid</i> (VOF)	32
4.2. Condições de contorno.....	34
4.3. Geração da malha.....	35
4.4. Modelo numérico	36
4.5. Técnica de Pós-processamento	38
5. RESULTADOS	39
5.1. Discretização espacial	40
5.2. Discretização temporal.....	46
5.3. Influência do número de componentes de ondas considerado dentro do espectro	51
5.4. Influência da profundidade da superfície livre na geração da onda.....	55
5.5. Número de pontos na análise por Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform - FFT)	59
6. CONCLUSÕES.....	63
7. REFERÊNCIAS	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Características elementares da onda	21
Figura 3.2 – Aplicabilidade das Teorias das Ondas. Carneiro (2007)	23
Figura 3.3 – Metodologia da análise da geração de ondas irregulares. Adaptado de Elangovan (2011)	26
Figura 3.4(a) – Decomposição do espectro em ondas regulares	29
Figura 3.4(b) – Espectro de ondas	29
Figura 3.5 – Representação do tanque de ondas com a região da praia numérica	30
Figura 3.6 – Representação esquemática das posições das sondas de monitoramento	31
Figura 4.1 – Representação esquemática das condições de contorno	35
Figura 4.2 – Regiões de refinamento na geração da malha	36
Figura 5.1 – Dimensões do domínio computacional para a geração da malha	40
Figura 5.2 – Elevação da superfície livre da discretização espacial na sonda 1	43
Figura 5.3 – Comparação da densidade espectral das soluções na sonda 1	44
Figura 5.4 – Comparação da densidade espectral das soluções na sonda 5	45
Figura 5.5 – Elevação da superfície livre da discretização temporal na sonda 1	48
Figura 5.6 – Elevação da superfície livre da discretização temporal na sonda 2 e na sonda 3	49
Figura 5.7 – Densidade espectral da discretização temporal na sonda 1	50
Figura 5.8 – Densidade espectral da discretização temporal na sonda 2 e na sonda 3	50
Figura 5.9 – Elevação da superfície livre para o número de componentes de ondas na sonda 3	53
Figura 5.10 – Densidade espectral para o número de componentes de na sonda 1	54
Figura 5.11 – Densidade espectral para o número de componentes de na sonda 2	54
Figura 5.12 – Densidade espectral para o número de componentes de na sonda 3	55
Figura 5.13 – Elevação da superfície livre entre as profundidades na sonda 2	56
Figura 5.14 – Elevação da superfície livre entre as profundidades na sonda 4 e na sonda 5	57
Figura 5.15 – Densidade espectral entre as profundidades na sonda 2	58
Figura 5.16 – Densidade espectral entre as profundidades na sonda 3	59
Figura 5.17 – Densidade espectral para a FFT na sonda 1	60
Figura 5.18 – Densidade espectral para a FFT na sonda 2	61
Figura 5.19 – Densidade espectral para a FFT na sonda 3	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características do espectro de ondas	31
Tabela 5.1 – Número de volumes para cada malha analisada	41
Tabela 5.2 – Variáveis quantitativas relativas à discretização espacial	42
Tabela 5.3 – Testes relativos à discretização à discretização temporal	46
Tabela 5.4 – Variáveis quantitativas relativas à discretização temporal	47
Tabela 5.5 – Tempo de processamento	51
Tabela 5.6 – Número de componentes de ondas no espectro	52
Tabela 5.7 – Variáveis quantitativas relativas ao número de componentes de ondas	52
Tabela 5.8 – Testes relativos à profundidade da superfície livre	55
Tabela 5.9 – Variáveis quantitativas relativas à profundidade da superfície livre	56
Tabela 5.10 – Testes relativos ao número de pontos na análise por FFT	60

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras romanas

A	Amplitude da onda [m]
C	Celeridade [m/s]
C_1	Coefficientes de amortecimento linear
C_2	Coefficientes de amortecimento quadrático
C_T	Comprimento total do tanque de ondas [m]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
$\vec{g}$	Vetor aceleração da gravidade [m/s ²]
h	Profundidade de propagação [m]
H	Altura da onda [m]
H_S	Altura significativa da onda [m]
H_T	Altura total do tanque de ondas [m]
K	Número de componentes de ondas
L_1	Região de propagação da onda
L_2	Região da praia numérica
$\dot{m}_{pq}$	Transferência de massa da fase p para a fase q [kg/s]
$\dot{m}_{qp}$	Transferência de massa da fase q para a fase p [kg/s]
P	Pressão (total RMS) [Pa]
p	Pressão estática [Pa]
$R1$	Número de volumes na região acima da superfície livre
$R2$	Número de volumes na região da superfície livre
$R3$	Número de volumes na região abaixo da superfície livre
$R4$	Número de volumes por cada comprimento de onda
$R4A$	Número de volumes por cada comprimento de onda na região de propagação da onda
$R4B$	Número de volumes por cada comprimento de onda na região da praia numérica
S_{PM}	Densidade espectral de Pierson - Moskowitz
T	Período da onda [s]
T_S	Período significativo do espectro de onda [s]
T_{min}	Período mínimo do espectro de onda [s]
T_P	Período de pico do espectro de onda [s]
$T_{máx}$	Período máximo do espectro de onda [s]
t	Tempo [s]

U_R	Número de Ursell
u	Componente da velocidade na direção horizontal [m/s]
V	Vetor velocidade [m/s]
v	Velocidade [m/s]
$\vec{v}$	Vetor velocidade do escoamento [m/s]
x	Posição espacial [m]
x_s	Posição horizontal do início da praia numérica [m]
x_e	Posição horizontal do fim da praia numérica [m]
Z	Posição vertical [m]
Z_b	Posição de fundo [m]
Z_{fs}	Posição vertical da superfície livre [m]
z	Posição vertical [m]
w	Componente da velocidade na direção vertical [m/s]

Letras gregas

α	Fração volumétrica
α_{ar}	Fração volumétrica de ar
$\alpha_{\acute{a}gua}$	Fração volumétrica de água
ε	Frequência da onda [rad]
ε_n	Ângulo de fase randômico da componente [rad]
η	Elevação da superfície livre [m]
λ	Comprimento da onda incidente [m]
λ_S	Comprimento significativo da onda [m]
$\lambda_{mín}$	Comprimento mínimo do espectro de onda [m]
λ_P	Comprimento de pico do espectro de onda [m]
$\lambda_{máx}$	Comprimento máximo do espectro de onda [m]
l_{ana}	Norma analítica
l_{num}	Norma numérica
μ	Viscosidade [kg/ms]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
$\bar{\tau}$	Tensor de tensões [N/m ²]
ϕ	Função potencial
ϕ_1	Função potencial de primeira ordem
ϕ_2	Função potencial de segunda ordem

ϕ_3	Função potencial de terceira ordem
ω	Frequência da onda [rad/s]
ω_n	Frequência da componente do espectro de onda [rad/s]
ω_{min}	Frequência mínima do espectro de onda [rad/s]
ω_p	Frequência de pico do espectro de onda [rad/s]
$\omega_{máx}$	Frequência máxima do espectro de onda [rad/s]
ζ_{a_n}	Amplitude ca componente do espectro de ondas [m]

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAD	Desenho Auxiliado por Computador
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
FVM	Métodos dos Volumes Finitos
JONSWAP	<i>Join North Sea Wave Project</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
UDF	Função Definida pelo Usuário (<i>User Defined Function</i>)
VOF	Método dos Volumes Finitos (<i>Volume Of Fluid</i>)
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Desde longa data trabalhos experimentais de Engenharia Oceânica e Arquitetura Naval tem usado tanques de ondas. Pode-se citar o Dr. William Froude (1810-1879) que realizou ensaios de resistência ao avanço com modelos de embarcações em escala reduzida em tanques de ondas. Com o aumento da demanda do conhecimento da performance de embarcações sob a ação de ondas, gradualmente os tanques foram equipados com geradores de ondas (Carneiro, 2007).

O conhecimento das interações entre ondas e estruturas costeiras e oceânicas é fundamental para o desenvolvimento de projetos seguros e ao mesmo tempo econômicos. Entre as diversas dificuldades na busca desse entendimento, destaca-se a extrema complexidade do fenômeno ondulatório do mar, podendo apresentar tanto um aspecto caótico, durante uma tempestade, quanto um aspecto muito regular, presente na ondulação durante uma calmaria. Mesmo considerando que o processo dispersivo, inerente da propagação de ondas no mar, proporcione uma organização desta propagação em trens de ondas cujos componentes possuem períodos e alturas semelhantes, as ondas reais apresentam um comportamento distante daquele de uma onda monocromática (Lisboa et al., 2016).

A construção de estruturas oceânicas, como embarcações e plataformas de exploração de petróleo, envolve muita responsabilidade devido a aspectos da segurança, confiabilidade e ao seu desempenho na realização das tarefas para as quais foram projetadas. No seu desenvolvimento existem muitos fatores ligados ao ambiente de operação que devem ser levados em consideração, porém, uma boa previsão do seu comportamento em condições naturais combinadas é difícil de se realizar com base apenas em modelos teóricos (Carneiro, 2007).

Em engenharia existem, fundamentalmente, três ferramentas para o desenvolvimento de projetos e análises de problemas: métodos analíticos, métodos numéricos (experimentação numérica) e experimentação em laboratório (Maliska, 2004).

A maioria dos testes em laboratório, de estruturas fixas ou flutuantes, estudo dos perfis das praias e outros fenômenos relacionados tem utilizado um tanque de ondas, que são compartimentos longos e estreitos com um gerador de ondas em uma das extremidades do tanque (Dean e Dalrymple, 1991).

Hoje, na literatura, existem diversos estudos considerando tanque de ondas numérico para as representações computacionais de fenômenos associados, na maioria dos trabalhos é considerado um modelo de propagação de ondas regulares com períodos e altura bem definidos.

Neste sentido, ao simular um fenômeno em que o modelo estiver mais próximo da realidade, mais detalhados e confiáveis serão os valores obtidos e uma forma para que isto ocorra é através da atualização do modelo, que é considerar a propagação de espectro de ondas, o que mais se aproxima do real fenômeno do oceano.

Com isto, a simulação numérica da propagação de ondas em tanques é uma ferramenta essencial para execução de um projeto de engenharia, pois muitas vezes não é possível realizar uma simulação experimental, seja pelo custo elevado e, até mesmo, por motivos de segurança.

1.2. Justificativa

A propagação de ondas de água de gravidade superficial é um fenômeno físico importante no campo da engenharia costeira e oceânica. As ondas podem ser alteradas pelo corte de ar, refração, difração e reflexão à medida que as ondas incidentes se propagam de regiões marinhas para regiões próximas da costa. Além disso, as ondas ao atingir uma zona próxima da costa podem causar erosões, além de comprometer a segurança das estruturas costeiras. Portanto, uma simulação precisa e eficiente da propagação de onda é crucial para uma melhor compreensão de tal fenômeno dependente do tempo (Zhang et al., 2006).

Os tanques de onda ou os fluxos de ondas foram utilizados há décadas para realizar testes e pesquisas. Esses testes forneceram muitos resultados valiosos que ajudaram na concepção de dispositivos, estruturas e até mesmo ajudam os códigos de configuração. Os tamanhos desses tanques de ondas variam de tanques pequenos usados para fins educacionais para tanques de grande escala como usados em instalações avançadas para testes e desenvolvimento de produtos. A necessidade de encontrar uma alternativa sem comprometer a integridade dos resultados levou ao desenvolvimento de tanques de ondas numéricas, que é a representação numérica do tanque de ondas físicas. O desenvolvimento e os avanços no poder de processamento de computadores abriram o caminho para o uso de códigos de Dinâmica dos Fluidos Computacionais (CFD) que são usados para realizar esta tarefa (Prasad et al., 2017).

Diversos modelos numéricos com custo computacional aceitável, que permitem analisar de maneira aproximada a propagação de ondas em tanques numéricos. Estes modelos são baseados em equações simplificadas do escoamento, que contém uma série de parâmetros empíricos, os quais necessitam de aferições para cada região a ser analisada. Muitas ferramentas foram implementadas nestes modelos nos últimos anos com o intuito de reproduzir tanques de ondas numéricos, análogos aos tanques de ondas de laboratórios físicos. Geralmente, as ondas incidentes impostas no domínio são monocromáticas e, recentemente, alguns poucos modelos permitem a imposição de ondas irregulares, obtendo-se, desta forma, resultados mais próximos da realidade (Lisboa et al., 2016).

Em função dessa disponibilidade computacional, o desenvolvimento de algoritmos para a solução dos mais diversos problemas tem recebido maior atenção dos analistas numéricos e engenheiros, fazendo aumentar o número de pesquisadores e usuários da simulação numérica. Além disso, a versatilidade e generalidade dos métodos numéricos para simulação de problemas de engenharia e a relativa simplicidade de aplicação dessas técnicas são outros fatores motivadores para seu uso (Maliska, 2004).

Hoje, no Brasil, possui vários tanques de ondas para ensaios e testes experimentais, por exemplo o Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo (IPT) que conta com um canal de ondas, o Laboratório de Hidráulica Experimental (Lahe), uma unidade de Furnas, que constitui-se de um espaço para simulação em modelos reduzidos, na Universidade Federal do Rio Grande (FURG) que conta com um canal de ondas, Laboratório de Interação Fluido Estrutura (LIFE).

Além destes, há mais dois que merecem destaques, o LabOceano, unidade da Coordenação dos Programas de Pós-graduação em Engenharia (Coppe-UFRJ), que se dedica ao aperfeiçoamento de estruturas navais por meio da simulação das condições oceânicas. Dispondo de um enorme tanque de água doce, de 15 metros de profundidade, 30 metros de largura e com 40 metros de comprimento, o laboratório está equipado para submeter modelos de embarcações a condições semelhantes às encontradas em alto mar (Buys, 2005). E o outro, do Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da USP, o Tanque de Provas Numérico (TPN), um laboratório que congrega as maiores vantagens experimentais integrado com processos computacionais de alto desempenho visando os melhores projetos de sistemas oceânicos e outros sistemas flutuantes offshore, portuários e fluviais. Para isso foi desenvolvido um simulador numérico capaz de representar matematicamente condições idênticas às geradas em um tanque físico, sem restrições dimensionais.

Diante disso, e com o passar dos anos, a capacidade dos computadores vem se destacando significativamente, tornando a realização de simulações numérica quase imprescindível ao realizar estudos com fenômenos oceânicos e costeiros. Até mesmo, abre caminhos para várias outras pesquisas, como, por exemplo, na aplicação dispositivos conversores de energia das ondas em energia elétrica, assim possibilitando ser corretamente construídos, testados e utilizados de maneira otimizada e racionalizada durante o processo de conversão.

Inserido nesse contexto, entende-se que este trabalho pode contribuir significativamente em projetos futuros nessa área, pois com uma atualização do modelo computacional é possível simular computacionalmente em tanques de ondas um modelo muito próximo do fenômeno real, através da simulação da propagação de espectro de ondas com uma técnica da praia numérica no final do canal, com o objetivo de amortecimento da onda, evitando assim, a reflexão da onda.

1.3. Proposta do trabalho e Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal, através da simulação numérica em tanque de ondas, obter recomendações teóricas que possibilitem resultados computacionais mais precisos e com menor esforço computacional para a simulação da propagação de espectro de ondas em tanques, neste caso, é considerado o espectro de ondas do tipo Pierson – Moskowitz. Além disto, é considerada também, uma técnica de amortecimento da onda chamada de praia numérica, que permite eliminar as interferências da reflexão das ondas no final do tanque de ondas numérico.

Através do objetivo geral, têm-se assim os seguintes objetivos específicos:

- a) Obter recomendações sobre a discretização espacial do tanque numérico de ondas para a simulação do espectro de ondas;
- b) Obter recomendações sobre a discretização temporal para a simulação do espectro de ondas;
- c) Analisar a influência do número de ondas consideradas dentro do espectro;
- d) Analisar a influência da profundidade da superfície livre na geração a onda;
- e) Analisar a influência do número de pontos a serem considerados na análise por FFT (*Fast Fourier Transform* – Transformada Rápida de Fourier).

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Simulação numérica em tanque de ondas

Nos últimos anos com o aumento contínuo da capacidade dos computadores, avanço da tecnologia e metodologias de simulações mais sofisticadas, tem propiciado simulações cada vez mais realísticas, fazendo com que mais pesquisadores sigam nesta área da pesquisa. Na literatura há muitos estudos considerando tanque de ondas para a simulação numérica, entre vários estudos encontrados, podem-se citar alguns.

Em Boo (2002), foi utilizado um tanque de ondas para simular ondas irregulares lineares e não lineares e as difrações sobre uma estrutura, para isto foi implementado um esquema numérico de domínio do tempo. Nas ondas irregulares foi utilizado equações de segunda ordem com quatro componentes de ondas de Airy, sendo alimentados através do limite de influxo, o problema do limite totalmente não linear foi resolvido em um esquema de avanço no tempo. O limite aberto foi modelado pela combinação de uma praia absorvente e a técnica de alongamento. O esquema numérico proposto foi verificado simulando as ondas regulares e irregulares. O esquema foi aplicado adicionalmente para calcular as forças de difração de ondas irregulares lineares e não lineares que atuam sobre um cilindro circular truncado vertical.

Em Park et al. (2004), foram reproduzidas ondas multidirecionais através do uso de uma técnica de simulação numérica em tanques de onda numérica 3D. As ondas incidentes direcionadas são geradas por um gerador de ondas multi-segmentado, e as ondas de saída são dissipadas numericamente dentro de uma zona de amortecimento artificial localizada no lado oposto do gerador. Foram apresentados os resultados para a geração de ondas regulares, incluindo testes de convergência numérica, ondas irregulares e ondas aleatórias multidirecionais. Além disso, a geração das ondas, que são um tipo de ondas direcionais, foi examinada usando um gerador de ondas numéricas prescrevendo as velocidades de entrada com base nas velocidades da partícula de água da onda linear (segunda ordem de Stokes) e as forças hidrodinâmicas que atuam sobre um navio avançando em uma condição de onda. Com isto, o tanque de ondas numérico pode gerar de forma confiável várias ondas multidirecionais não lineares e ter algumas possíveis aplicações em suas interações com estruturas marinhas.

Em Anbarsooz et al. (2013), foi apresentado um método numérico que simula o real fenômeno da geração de onda. O modelo numérico empregado é o desenvolvido por Mirzaii e Passandideh-Fard (2012) para modelar fluxos de fluidos contendo uma superfície livre na presença de um objeto em movimento arbitrário. O método foi implementado em um programa numérico baseado no VOF (*Volume of Fluid*) para modelar com precisão a geração de ondas realizada pelo

gerador de ondas do tipo pistão e flap. O modelo apresentado é capaz de produzir ondas lineares a fortemente não lineares tanto em águas intermediárias quanto profundas. A precisão do modelo numérico apresentado é verificada pela comparação dos resultados das simulações com os dados analíticos e experimentais. No caso do fabricante de ondas tipo pistão, são utilizados os resultados experimentais de trabalhos existentes na literatura, enquanto que no caso do gerador de ondas tipo flap foram empregados os resultados dos experimentos realizados no próprio estudo.

Em Gomes et al. (2013), foi apresentado um estudo numérico bidimensional com a aplicação do *Design Construtal* sobre a otimização geométrica de um dispositivo conversor de energia das ondas em energia elétrica. O domínio computacional foi representado por um dispositivo coluna de água oscilante (OWC) acoplado ao tanque de ondas. Cujo objetivo principal foi buscar a geometria ideal que maximiza o poder absorvido (PTO) quando é submetido a um clima de onda definido. Para o estudo foi adotado uma onda regular com dimensões de escala real. Para a solução numérica foi utilizado o código comercial da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) FLUENT, com base no Método de Volumes Finitos (FVM) e o modelo multifásico de volume volumétrico (VOF) foi usado para a interação entre a água e ar.

Em Kim et al. (2014), foi realizado uma análise numérica com cinco esquemas de amortecimento artificial em um tanque de onda numérico tridimensional, aplicados no final de um domínio computacional e suas capacidades de amortecimento foram comparadas para encontrar um ótimo esquema de amortecimento. Para garantir um desempenho de amortecimento eficiente na zona de amortecimento artificial, foram introduzidas quatro funções de rampa diferentes aplicadas aos coeficientes de amortecimento e suas influências sobre a capacidade de amortecimento são avaliadas para encontrar uma forma de magnitude de amortecimento ideal.

Em Kamath et al. (2015), um tanque de onda numérica bidimensional foi utilizado para simular a interação de um dispositivo conversor de energia com ondas de diferentes comprimentos e declividades. A pressão da câmara foi simulada usando a teoria do fluxo de meios porosos no modelo numérico. A pressão na câmara e a velocidade da superfície livre são calculadas para avaliar a eficiência do dispositivo e o modelo é validado pela comparação dos resultados numéricos com dados experimentais.

Em Finnegan e Goggins (2015), foi desenvolvido um modelo de tanque de ondas numérico para a geração de ondas irregulares, através do pacote comercial de método de volume finito, ANSYS CFX, foi representado para replicação de ondas oceânicas reais medidas em grande escala. Três registros de ondas diferentes foram simulados e comparados com a onda medida no domínio do tempo, bem como a onda correspondente. Além disso, o perfil de velocidade das partículas de

água absoluta abaixo da onda do modelo é comparado com a aproximação analítica da onda medida.

Em Vyzikas et al. (2017), foi realizado uma investigação da aplicabilidade de um modelo numérico multifásico 3D em um tanque de ondas, para simular a interação entre uma coluna de água oscilante com ondas regulares e irregulares, com e sem PTO (*Power Take Off*), utilizando a ferramenta waves2FOAM para geração e absorção de ondas. Para a validação do modelo, foram utilizados os resultados experimentais obtidos no laboratório COAST da Universidade de Plymouth.

Em Rezanejad et al. (2017), foi proposta uma investigação numérica e experimental do desempenho hidrodinâmico de um dispositivo coluna de água oscilante. Onde um modelo linear 2D é desenvolvido na abordagem numérica a fim de estimar a eficiência do dispositivo. Foi submetido a um conjunto abrangente de experimentos realizados com ondas regulares e irregulares, a fim de investigar a influência dos seguintes parâmetros: amortecimento da turbina, período e a altura de onda. Na validação do modelo numérico foram utilizados os resultados obtidos pelos testes experimentais, realizados no canal de ondas da Universidade de Santiago de Compostela. Tanto nos resultados numéricos quanto nos experimentais, o período de onda e o amortecimento da turbina possuem influência significativa no desempenho do dispositivo, e que o mesmo diminui consideravelmente em altos períodos de ondas.

Em Prasad et al. (2017), foi realizado simulações numéricas em um tanque de ondas, o código comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacionais (CFD) ANSYS foi usado para gerar ondas em um tanque de ondas numérico usando um gerador de ondas do tipo pistão. Além disto, foi utilizado o método *Volume of Fluid* (VOF). Os resultados do código numérico para a geração da onda foram validados comparando com os dados experimentais e verificados com soluções analíticas.

A utilização de tanque de ondas para a simulação numérica é uma realidade, possuindo uma vasta aplicabilidade para diferentes trabalhos e diversos objetivos, principalmente para problemas de Engenharia costeira e oceânica.

2.2. Simulação numérica da propagação de espectro de ondas

Nos últimos anos muitas técnicas foram implementadas nos modelos numéricos com o intuito de reproduzir tanques de ondas numéricos, análogos aos tanques de ondas de laboratórios físicos. Geralmente, as ondas incidentes impostas no domínio são monocromáticas e, recentemente, alguns poucos modelos permitem a imposição de ondas irregulares, obtendo-se, desta forma, resultados mais próximos da realidade (Lisboa et al., 2016).

O conceito de onda irregular pode ser representado através de um espectro das ondas. Um registro de onda pode ser decomposto por meio de análise harmônica (ou Fourier) em um grande número de ondas sinusoidais de diferentes frequências, direções, amplitudes e fases. Cada frequência e direção descrevem uma componente de onda, e cada componente possui uma amplitude e fase associadas. A análise harmônica (Fourier) fornece assim uma aproximação à forma irregular, mas quase periódica, de um registro de onda como a soma das curvas sinusoidais. Para uma elevação de superfície variando no tempo em uma única direção (WMO, 1998).

Considerando um espectro de ondas, o que mais se aproxima do fenômeno real, uma maneira de representar é submeter a um tipo de espectro de onda, neste trabalho é considerado o de Pierson-Moskowitz. Cabe destacar que a partir da versão 16.0 do Fluent, além do espectro de Pierson - Moskowitz, possui mais dois tipos de espectro implementados, o espectro de JONSWAP (*Join North Sea Wave Project*) e o espectro de TMA. Neste contexto é possível encontrar na literatura trabalhos que tem como objetivo a simulação numérica considerando espectro de ondas.

Em Elangovan e Sahoo (2010), foi analisada a geração de ondas irregulares através de um gerador de ondas do tipo pistão para análises experimentais marinhas. O tanque de onda numérica foi modelado com o gerador de ondas, onde esta metodologia foi desenvolvida para a geração de onda irregular pelo código dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para o espectro de ondas do tipo Bretschneider. Análise de FFT também foi discutida para o intervalo de frequência, período de tempo e número de pontos para a análise de FFT e o espectro de onda foi validado com o espectro de onda original.

Em Liang et al. (2010) foi realizada a simulação de um trem de ondas irregulares em um tanque de ondas numérico. Primeiramente, foi investigada a simulação de uma única onda predeterminada, mostrando um bom acordo em termos de parâmetros locais como altura da onda, altura da crista e período da onda. Em seguida, o método é aplicado para simular um trem de onda irregular predeterminado e mais complicado, decomposto em certo número de pequenas ondas de amplitude. A expansão da série de Fourier é realizada para determinar a amplitude e o ângulo de fase inicial de cada componente de onda. As características principais são reproduzidas em comparação com resultados experimentais.

Em Elangovan (2011), a geração de onda irregular numérica foi desenvolvida e simulada através de um código dinâmica dos fluidos computacional (CFD). A onda irregular gerada numericamente foi submetida a um espectro de ondas e, após, comparada com uma onda analítica. A curva do espectro da onda numérica foi montada através da análise da Transformada Rápida de Fourier (FFT), por fim, o espectro de onda foi validado com o espectro de onda original.

Em Cho et al. (2015), foi realizado um estudo sobre a equação ideal de um espectro de ondas. Para isto, os dados utilizados foram obtidos pelo Instituto Coreano de Ciência e Tecnologia usando o Waverider da Datawell (WD) em uma estação de monitoramento. A partir dos dados brutos foram calculados os parâmetros principais, como altura da onda, frequência e direção da onda. Após, foi realizado uma comparação com as funções espectrais de JONSWAP, Pierson-Moskowitz, Bretschneider e a função de Valor Extremo Generalizado (GEV).

Costa et al. (2016), apresentou uma metodologia, disponível no software ANSYS FLUENT[®] (v. 16.0), para a geração numérica de um espectro de ondas do tipo Pierson - Moskowitz. Com domínio computacional bidimensional representando um tanque de ondas numérico e com a técnica de amortecimento da onda através de uma rampa, sendo que esta técnica não obteve bons resultados, não eliminou a reflexão da onda por completo. O espectro de ondas de Pierson - Moskowitz utilizado no estudo possui período e altura significativos da onda. Para a solução numérica foi empregado um código de dinâmica dos fluidos computacional, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF) e, também, o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF).

Em Lisboa et al. (2016), foi realizado análises da propagação de ondas regulares e irregulares em um canal bidimensional com praia numérica através do modelo FLUENT[®] (v. 16.0). A praia numérica é baseada na adição de um termo de sumidouro na equação da quantidade de movimento que contém os coeficientes de amortecimento linear e quadrático. Nesta condição, séries temporais de elevação da superfície livre para as três ondas incidentes foram comparadas com séries temporais teóricas, mostrando uma excelente concordância entre elas. Após, adotando o coeficiente de amortecimento linear obtido pela análise de aferição da praia numérica, foi realizada a simulação com incidência de onda irregular definida pelo espectro do tipo JONSWAP (*Join North Sea Wave Project*).

Em Gomes et al. (2016), foi apresentado um estudo computacional e geométrico sobre um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO). O objetivo é maximizar a potência hidropneumática absorvida pelo dispositivo quando submetido a um espectro de onda com período e altura significativa da onda. É empregado o Design Construtal para a análise geométrica. Para a solução numérica foi empregado um código de dinâmica dos fluidos computacional, baseado no Método de Volumes Finitos (MVF). O modelo

multifásico *Volume of Fluid* (VOF) foi aplicado no tratamento da interação água-ar.

Em Gatin et al. (2017), foi realizado simulações de ondas irregulares eficientes que utilizam o método Espectro de Ordem Superior (HOS), juntamente com o modelo viscoso totalmente dinâmico não linear, dinâmica dos fluidos computacionais (CFD), que baseia-se na decomposição da solução através do método de Equação Navier-Stokes explícito *Spectral Wave*. A validação é realizada comparando o espectro de energia da onda obtido de HOS com o espectro obtido em CFD medido no mesmo local. A simulação HOS é inicializada usando o espectro JONSWAP. A validação do método do HOS é realizada em três casos de teste, incluindo campos de ondas monocromáticas e irregulares. Além disso, o acoplamento entre o Espectro de Ordem Superior e CFD é validado em propagação de ondas irregulares de três horas.

De acordo com o que foi apresentado, é possível observar que diversos estudos relativos à propagação de ondas já estão sendo estudados, principalmente para a propagação de ondas regulares. Entretanto, poucos trabalhos consideram a propagação de espectro de ondas, que é a proposta do presente trabalho.

3. PROBLEMA FÍSICO

3.1. Teoria das Ondas Oceânicas

As ondas podem ser classificadas em três tipos, ondas materiais, ondas eletromagnéticas e ondas mecânicas. O objetivo aqui são as ondas mecânicas, em especial as ondas oceânicas, que são mais frequentes no dia a dia. Onda é o fenômeno pela qual uma perturbação de energia se propaga. São ondas que necessitam de um meio físico para se propagarem (Carneiro, 2007).

O conceito de onda pode ser definido como uma colisão entre as moléculas, iniciando um processo de transferência de energia entre o ar e o mar oscilante de alguma grandeza física no tempo e no espaço, ou seja, por oscilações de pressão na superfície da água. As ondas crescem conforme o aumento da velocidade, da duração e da distância de atuação do vento na mesma direção. Quanto maior for a velocidade do vento, maiores serão as ondas que compõe o espectro e mais tempo será necessário para atingir o estágio estável e, após formada as ondas, elas se propagam por quilômetros.

Conforme o modelo do comportamento das ondas, elas podem ser classificadas, de acordo com a teoria das ondas, em regulares e irregulares, ou também, como ondas determinísticas e aleatórias. A teoria de ondas regulares admite ondas com comportamento bem definido e constante (como período, altura e comprimento) em cada período de tempo ou espaço. As ondas irregulares são formadas pela soma de pequenas ondas regulares, com período e altura diferentes. As ondas irregulares são as que representam o real estado do mar no ambiente oceânico (Gomes, 2010).

De uma forma geral, as teorias de ondas são descritas relacionando-se três parâmetros básicos: a altura da onda, o comprimento de onda e a profundidade da água. Os demais parâmetros, como os campos de pressão, de velocidades e de acelerações das partículas do fluido são obtidos analiticamente em função destas quantidades básicas (Oliveira, 2012).

Na Figura 3.1 podem ser observadas as principais características de ondas regulares.

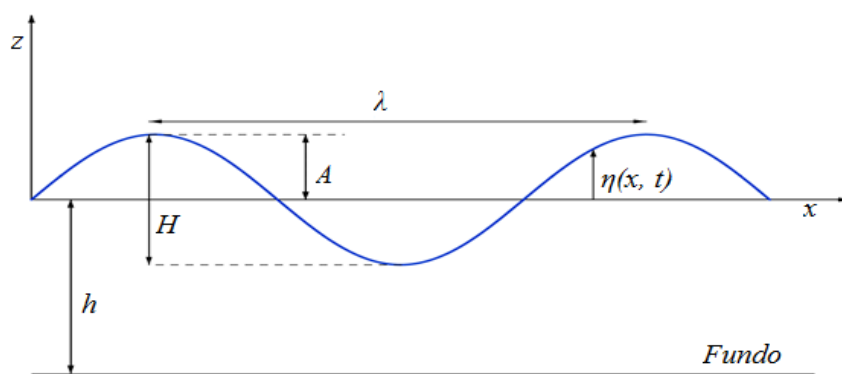


Figura 3.1 – Características elementares da onda.

- ❖ **Profundidade (h):** é a distância do fundo do mar até o nível médio da água (superfície livre).
- ❖ **Crista ou pico:** é o ponto mais alto atingido pela superfície livre da água (elevação) comparado com o plano do nível médio da água.
- ❖ **Cava ou cavado:** o ponto mais baixo atingido pela superfície livre da água comparado com o plano do nível médio da água.
- ❖ **Amplitude (A):** é a distância entre a crista e a superfície livre da água ou a distância entre a cava e a superfície livre da água.
- ❖ **Altura (H):** é a distância entre uma crista e a sua cava sucessiva.
- ❖ **Elevação da superfície livre (η):** representa a distância instantânea da superfície livre ao plano médio do nível da água. Usualmente a curva gerada pela elevação da onda ao longo do comprimento é chamada superfície de elevação.
- ❖ **Comprimento da onda (λ):** é a distância entre duas cristas ou duas cavas sucessivas e pode ser calculado pela seguinte equação:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (3.1)$$

- ❖ **Período (T):** é o tempo necessário para a forma da onda percorrer um ciclo completo, no caso um comprimento de onda.
- ❖ **Celeridade (C):** representação a velocidade de propagação da crista da onda, e pode ser calculada por:

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad (3.2)$$

Diversas teorias de ondas foram desenvolvidas e podem ser aplicadas conforme as condições ambientais. Ao selecionar uma teoria para ser aplicada, deve-se levar em consideração os principais fatores como a altura da onda H , o comprimento da onda λ e a profundidade da água h . Esses fatores são comumente compostos nos seguintes parâmetros adimensionais:

- ❖ Declividade (H/λ)
- ❖ Profundidade relativa (h/λ)
- ❖ Altura da onda relativa (H/h)
- ❖ Número de Ursell ($U_R = \lambda^2 H/h^3$)

Quando a declividade, a profundidade relativa e a altura da onda relativa são pequenas, tem-se a teoria de ondas mais simples, a teoria linear, conhecida também como a teoria de Airy. A teoria

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

A solução de Stokes é formalmente válida para $kh < 1$ e $H/\lambda \leq 1$, sendo $k = 2\pi/\lambda$ o número de onda (CEM, 2002). Em termos do número de Ursell o limite de aplicação é $U_R < 26$ (Dean e Dalrymple, 1991).

Conhecendo-se os parâmetros h , H e T e com a ajuda do gráfico apresentado na Fig. 3.2 pode-se selecionar qual teoria de ondas deve ser aplicada.

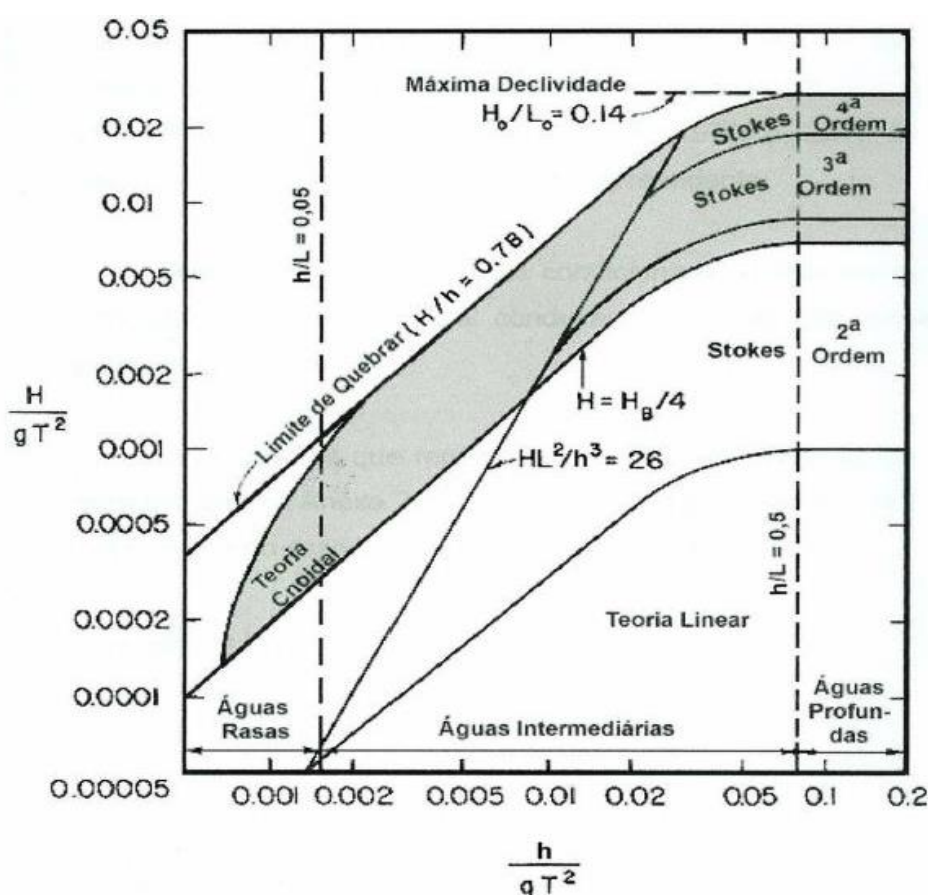


Figura 3.2 – Aplicabilidade da teoria de ondas (Carneiro, 2007).

Em geral, a equação da onda e as condições de contorno podem ser lineares ou não lineares. Sabendo que a água é incompressível e assumindo um escoamento irrotacional, uma onda de superfície deve satisfazer a forma linear especial da equação da onda, conhecida como Equação de

Laplace. A solução da equação de Laplace é obtida quando submetida a condições de contorno lineares (McCORMICK, 1973).

Como o trabalho é com um fluido contínuo dentro da onda, a equação da continuidade é satisfeita. Se o escoamento for irrotacional, a velocidade pode ser representada por uma função potencial, assim é possível escrever a equação da continuidade da seguinte forma:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (3.3)$$

Onde uma solução para a Eq. (3.3) e que satisfaça as condições de contorno apresentadas, fornece o seguinte potencial de velocidades:

$$\phi = \frac{Ag}{\omega} \frac{\cosh(kz + kh)}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (3.4)$$

E, conseqüentemente, a partir da Eq. (3.4), são obtidas as seguintes componentes para a velocidade:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{Agk}{\omega} \frac{\cosh(kz + kh)}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (3.5)$$

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{Agk}{\omega} \frac{\sinh(kz + kh)}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (3.6)$$

onde, de u é a componente na direção x da velocidade e w é a componente na direção z da velocidade.

Ao considerar a teoria de onda linear é aplicada a equação que descreve o movimento da superfície livre:

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) \quad (3.7)$$

Por outro lado, uma teoria de ondas não linear é a Teoria de Stokes. As teorias não lineares são as que mais representam as ondas reais. A Teoria de Stokes, que consiste em assumir que as propriedades do movimento das ondas, como o potencial de velocidades, pode ser representada por uma série de pequenas perturbações. A mesma se aplica para alturas de onda maiores em águas relativamente profundas. Nesta teoria, de Stokes de 2ª ordem, o potencial de velocidades é obtido através de uma série de potências com expansão até o segundo termo (ϕ_2), e que a solução da primeira parcela desse somatório representa a teoria linear, conforme o tipo:

$$\phi = \varepsilon \phi_1 + \varepsilon^2 \phi_2 + \varepsilon^3 \phi_3 + \dots \quad (3.8)$$

Apresenta-se a equação que descreve o movimento da variação na superfície livre com a teoria de Stokes de 2ª Ordem, na forma analítica, é dada pela seguinte equação:

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) + \frac{A^2 k \cosh(kh)}{4 \sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos 2(kx - \omega t) \quad (3.9)$$

Temos as seguintes componentes de velocidades para a Teoria de Stokes de 2ª ordem:

$$u = \frac{Agk}{\omega} \frac{\cosh(kz + kh)}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + A^2 \omega k \frac{\cosh 2k(k + z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (3.10)$$

$$w = \frac{Agk}{\omega} \frac{\sinh(kz + kh)}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) + A^2 \omega k \frac{\sinh 2k(k + z)}{\cosh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (3.11)$$

onde z é a variação da posição da superfície livre da água até o fundo do mar.

3.2. Teoria do Espectro de ondas do tipo Pierson - Moskowitz

As ondas podem ser classificadas em dois tipos: ondas regulares (lineares e não lineares) e ondas irregulares (um espectro de ondas - composto por diversas ondas regulares sobrepostas) que são caracterizadas por várias componentes de ondas regulares, com frequências, alturas e períodos diferentes.

O espectro de Pierson – Moskowitz é válido para um mar totalmente desenvolvido, ou seja, é o estado do mar em que se desenvolveram as ondas máximas correspondentes à força do vento atuante, e assume que as ondas estão em equilíbrio com o vento (Chakrabarti, 2005).

Ao representar um espectro de ondas é necessário o conhecimento de algumas características do espectro, como período significativo (T_S), altura significativa (H_S), e profundidade de propagação (h).

Um fluxograma do processo da análise e geração de ondas irregulares, representada pelo espectro de Pierson – Moskowitz é apresentado na Fig. 3.3.

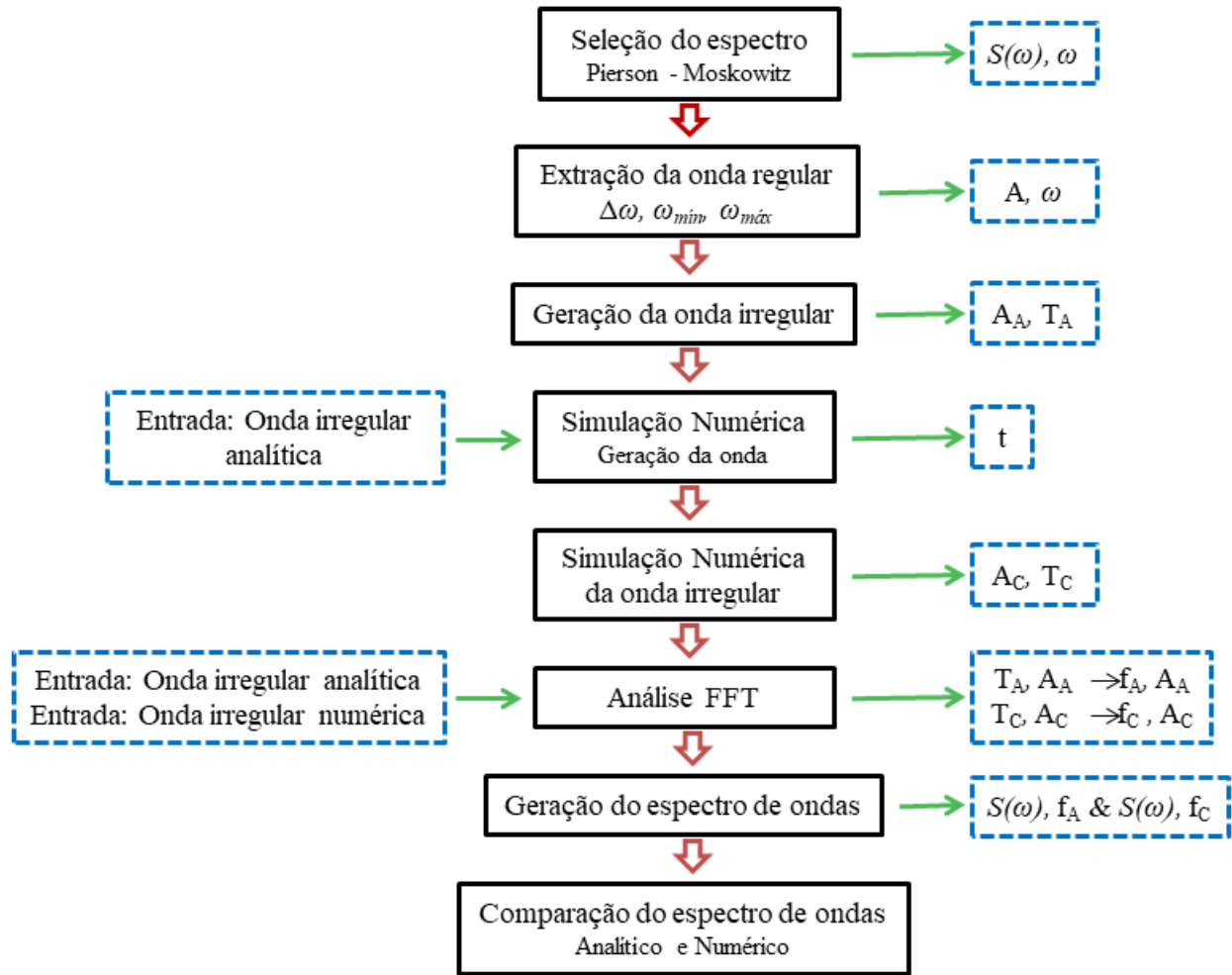


Figura 3.3 – Metodologia de análise da geração de ondas irregulares.
Adaptado de Elangovan (2011).

Neste caso, assumindo um mar totalmente desenvolvido (um mar produzido por ventos soprando constantemente durante centenas de milhas por vários dias) submetido a um espectro de onda, Pierson – Moskowitz, a densidade espectral ($S(\omega)$) é dada por (Elangovan, 2011):

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \frac{H_S \omega_p^4}{\omega^5} e^{-\left(\frac{5\omega_p^4}{4\omega^4}\right)} \quad (3.12)$$

onde: H_S é a altura significativa (m), neste trabalho $H_S = 1,5$ m, ω é a frequência da onda (rad/s), e ω_p é a frequência de pico da onda (rad/s) e pode ser determinada por:

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_S} \quad (3.13)$$

onde: T_S é o período significativo do espectro (s), neste trabalho $T_S = 7,5$ s.

De acordo com ANSYS (2016) é possível determinar o intervalo de frequências de modo que o mesmo compreenda a região de maior energia da onda, sendo o recomendável dado por:

$$\omega_{min} = 0,5\omega_P \quad (3.14)$$

$$\omega_{máx} = 3,0\omega_P \quad (3.15)$$

Neste estudo o espectro é formado por n_0 componentes de ondas, com diferentes frequências dentro do intervalo determinado pelas Eqs. (3.14) e (3.15). Assim, é possível distribuir de forma igual as frequências a serem consideradas através da seguinte relação:

$$d\omega = \frac{(\omega_{máx} - \omega_{min})}{n_0} \quad (3.16)$$

onde: n_0 é o número de ondas consideradas no espectro.

É possível extrair cada uma das n ondas regulares que compõem o espectro de ondas. Para tanto deve ser considerada a seguinte relação entre densidade espectral e amplitude (Elangovan, 2011):

$$S(\omega_n)d\omega = \frac{1}{2}\zeta_{a_n}^2 \quad (3.17)$$

onde: ζ_{a_n} é a amplitude da componente do espectro (m), ou seja, a amplitude de uma das ondas que formam o espectro deste estudo.

O espectro de ondas é uma composição de diferentes ondas regulares atuando em conjunto. Com isso, mantendo o ângulo de fase diferente para cada onda regular, a onda irregular pode ser gerada analiticamente conforme apresentado a seguir (Elangovan, 2011):

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{n_0} \zeta_{a_n} \cos(k_n x - \omega_n t + \varepsilon_n) \quad (3.18)$$

onde: k_n é o número de onda da componente (rad/m), x a posição espacial (m), ω_n a frequência da componente (rad/s), t o tempo (s) e ε_n o ângulo de fase randômico da componente (rad). O número de onda pode ser determinado pela relação de dispersão, dada por (Dean e Dalrymple, 1991):

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (3.19)$$

onde: g é a aceleração da gravidade (m/s^2) e h é a profundidade (m).

A geração numérica do espectro Pierson-Moskowitz leva em conta as componentes do espectro extraídas a partir da Eq. (3.18). Posteriormente, a onda irregular gerada numericamente passa por uma análise através da Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) para mudar o espaço da análise, ou seja, é utilizada para remontar o espectro da densidade numérica, elevando os dados de um campo (elevação por tempo) para o campo da frequência (densidade por frequência) e assim realizar uma comparação com a densidade espectral analítica.

Para a geração do espectro de ondas é considerada a Eq. (3.18) e suas respectivas componentes, horizontal (u) e vertical (w), da velocidade da onda como condição de contorno (velocidade de entrada prescrita). Essas componentes da velocidade variam em função do espaço e do tempo e são impostas na superfície de entrada e dadas por:

$$u = \zeta_{a_n} g k_n \frac{\cosh(k_n z - k_n h)}{\omega_n \cosh(k_n h)} \cos(k_n x - \omega t) \quad (3.20)$$

$$w = \zeta_{a_n} g k_n \frac{\sinh(k_n z - k_n h)}{\omega_n \sinh(k_n h)} \sin(k_n x - \omega t) \quad (3.21)$$

onde: g a aceleração da gravidade (m/s^2); ω_n é a frequência da componente, e z é a variação da posição entre a superfície livre da água e o fundo do mar (m).

Na Figura 3.4(a) é realizada a decomposição do espectro de ondas apresentando algumas ondas regulares representativas do espectro de ondas em consideração, ainda na Fig. 3.4(a), são apresentadas cinco ondas regulares com diferentes frequências: Onda 1 com $\omega = 0,583333$ rad/s, Onda 3 com $\omega = 0,916667$ rad/s, Onda 5 com $\omega = 1,25$ rad/s, Onda 10 $\omega = 2,083333$ rad/s e Onda 15 com $\omega = 2,916667$ rad/s. Sendo a frequência de pico do espectro é $\omega = 0,837758$ rad/s (conforme a Eq. (3.12)), ainda considerando a Fig. 3.4(a) é possível observar que quando a frequência de uma componente de onda estiver mais próximo da frequência de pico, maior é a predominância da onda no espectro.

Na Figura 3.4(b) é apresentado o espectro de ondas formado pelo somatório das quinze ondas regulares, com o objetivo de evidenciar o efeito do somatório de diversas ondas com diferentes frequências, de acordo com a Eq. (3.18).

Cabe destacar que, para este exemplo, foram consideradas 15 componentes de ondas e um avanço no tempo de 0,01 s. Além disso, a profundidade (h) de 10 m, com comprimento significativo

do espectro de ondas de 119 m e a sonda de monitoramento em $x = 0,266.\lambda_s$ m, ou seja, na posição de 31,7 m.

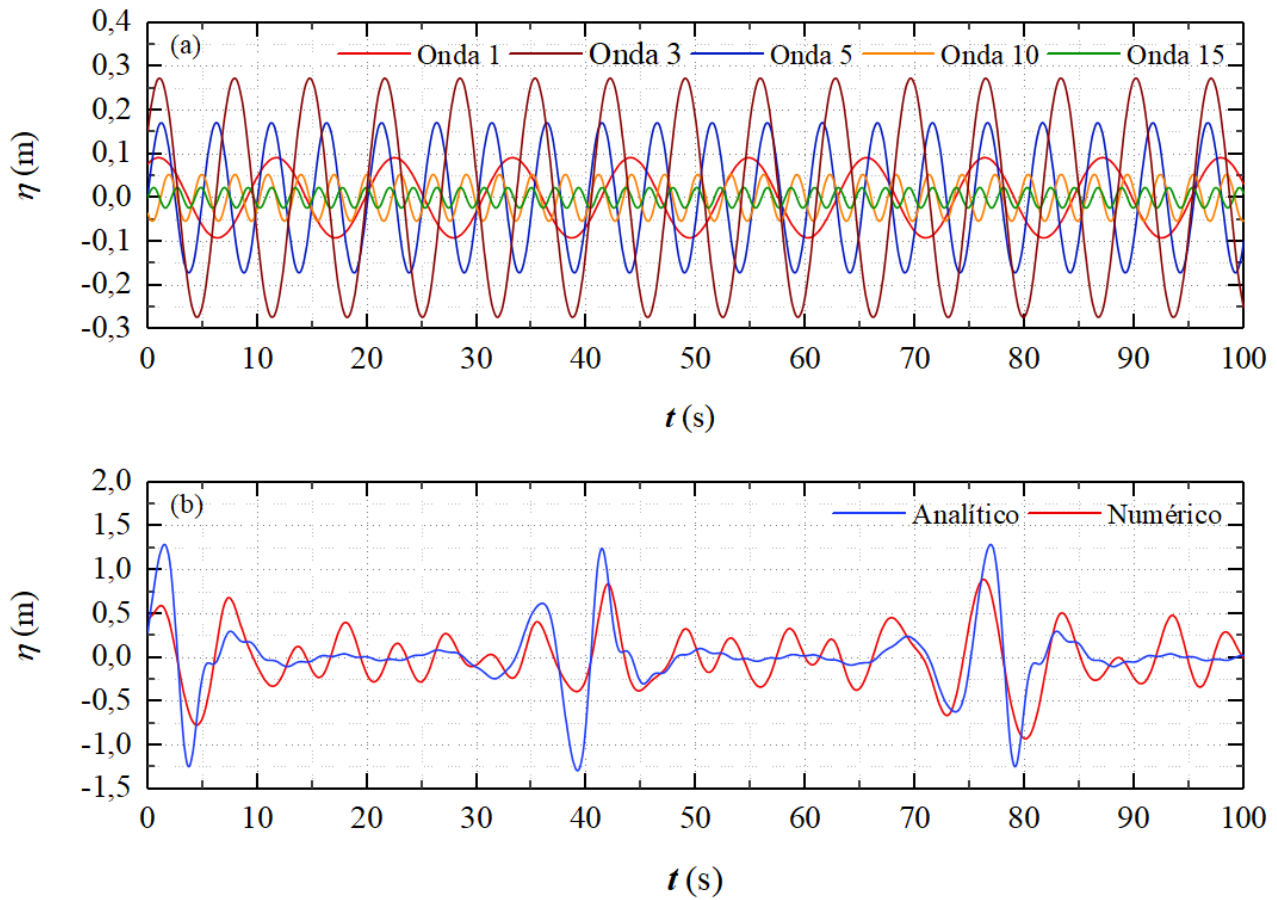


Figura 3.4 – (a) Decomposição do espectro em ondas regulares (Onda 1: $\omega=0,583333$ rad/s, Onda 3: $\omega=0,916667$ rad/s Onda 5: $\omega=1,25$ rad/s, Onda 10: $\omega=2,083333$ rad/s e Onda 15: $\omega=2,916667$ rad/s) e (b) espectro de ondas.

3.3. Representação computacional do tanque de ondas

Ao representar o problema da propagação de espectro de ondas em tanques em uma escala adequada no domínio computacional, o período significativo (T_S), a altura significativa (H_S) e a profundidade de propagação (h) são as características que se deve ter conhecimento. Pois com estas características definidas é possível determinar o comprimento total (C_T) e a altura (H_T) total do tanque de ondas e, assim, com a aplicação de condições de contorno, resolver as equações de conservação do modelo numérico.

Até então uma forma de atenuar o efeito da reflexão da onda consistia em inserir uma rampa no final do tanque de ondas, conforme apresentado em Costa et al. (2016), representando assim o fenômeno físico de inclinação das praias, como de fato ocorre no problema real.

Uma importante atualização no modelo computacional foi realizada no que diz respeito à

eliminação da reflexão das ondas através da técnica da praia numérica, semelhante ao desenvolvido em Lisboa et al. (2016). A eliminação da reflexão da onda ocorre devido a uma região de amortecimento, chamada de praia numérica. Essa estratégia se assemelha ao efeito de amortecimento proporcionado pelos manguezais em regiões costeiras. Também é importante destacar que a onda gerada numericamente já se inicia estabilizada, através da utilização do método *wavy*, sendo que a opção da praia numérica está implementada no FLUENT 16.0.

O domínio computacional foi dividido em duas partes, conforme Fig. 3.5: i) região de interesse da propagação da onda e ii) região de absorção da onda (praia numérica).

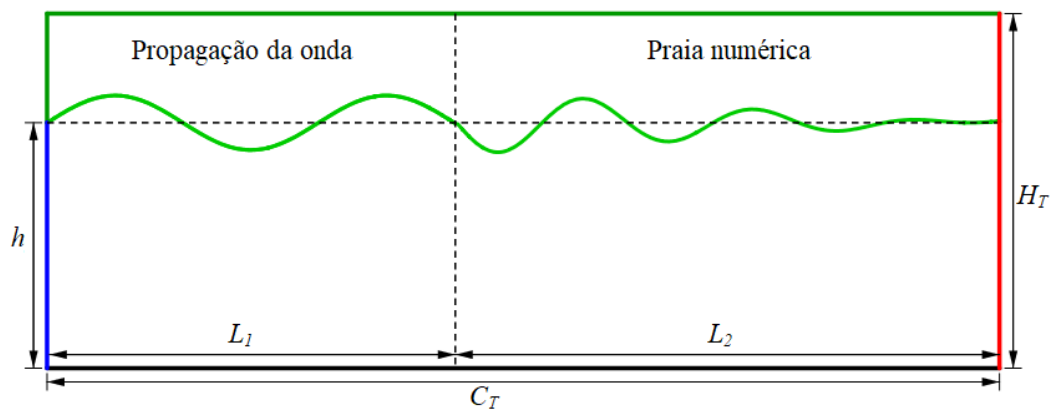


Figura 3.5 – Representação do tanque de ondas com a região da praia numérica.

O comprimento total do tanque de ondas é de $C_T = 3,5 \cdot \lambda_s$, que se dá através da soma das regiões L_1 e L_2 , onde $L_1 = 1,5 \cdot \lambda_s$ e $L_2 = 2,0 \cdot \lambda_s$, sendo que λ_s é o comprimento significativo do espectro de ondas (m) referente ao período significativo, semelhante o que foi realizado em Lisboa et al. (2016). Em relação à altura total do tanque, foi considerada a profundidade mais três vezes a altura significativa do espectro. Neste caso para as simulações iniciais foram considerado $h = 10$ m o que resulta em $H_T = 14,5$ m, onde h é a profundidade de propagação e H_T a altura total do tanque de ondas.

Cabe destacar que a linha pontilhada horizontalmente na Fig. 3.5 é o nível médio da superfície livre, onde, acima da linha é a região da superfície livre e abaixo é a região da profundidade de propagação. E a linha pontilhada verticalmente é o limite entre as regiões de propagação da onda (à esquerda) e a região da praia numérica (à direita).

3.4. Monitoramento da elevação da superfície livre

Para o estudo e comparação da evolução do espectro de ondas foram distribuídas cinco sondas de monitoramento da elevação da superfície livre em diferentes posições localizadas ao

longo do canal do tanque, conforme a Fig. 3.6.

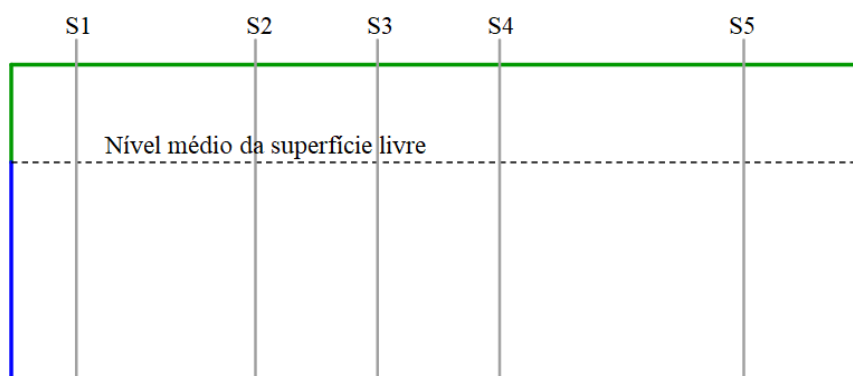


Figura 3.6 – Representação esquemática das posições das sondas de monitoramento.

Na Figura 3.6 está disposta uma representação das sondas verticais de medição da elevação da superfície livre nas seguintes posições ao longo do tanque: S1 ($x = 0,266 \cdot \lambda_s$), S2 ($x = 1,0 \cdot \lambda_s$), S3 ($x = 1,5 \cdot \lambda_s$), S4 ($x = 2,0 \cdot \lambda_s$) e S5 ($x = 3,0 \cdot \lambda_s$). Lembrando que λ_s representa o comprimento significativo do espectro de ondas, conforme o comprimento de mínimo, de pico e de máximo.

O comprimento do espectro adotado é referente ao período das componentes do espectro. Na Tab. 3.1, têm-se as características do espectro de ondas, onde é possível observar que tanto o comprimento significativo quanto o período significativo do espectro são inversamente proporcionais em relação à frequência significativa, pois está se tratando de frequências no âmbito do espectro. Portanto o que ocorre de fato é que a frequência mínima vai conduzir a um período maior e uma frequência maior a um período menor, que é calculado pela Eq. (3.13).

Tabela 3.1 – Características do espectro de ondas.

Características	Mínimo	Pico	Máximo
Frequência (rad/s)	ω_{min}	ω_P	$\omega_{máx}$
	0,50	0,84	3,00
Período (s)	T_{min}	T_P	$T_{máx}$
	12,57	7,50	2,09
Comprimento (m)	λ_{min}	λ_P	$\lambda_{máx}$
	119,10	65,35	6,84

4. MODELAGEM COMPUTACIONAL

4.1. Método *Volume of Fluid* (VOF)

O método *Volume of Fluid* (Hirt e Nichols, 1981) é um modelo multifásico usado para as soluções de escoamentos compostos de no mínimo dois fluidos (ou fases) imiscíveis. Sendo que todas as fases são definidas e o volume ocupado por uma fase não pode ser ocupado por outra, a fim de observar a interação entre estes fluidos no interior do tanque numérico, para isso o modelo mais apropriado é o modelo VOF. Para cada fase adicionada no modelo, uma nova variável é introduzida, resultando numa fração volumétrica destes fluidos na célula computacional. Para representar as fases contidas em cada volume de controle é necessário o conceito da fração de volume, representado pela letra grega alfa (α).

Neste trabalho, o modelo é utilizado para representar a interação entre duas fases, água e ar, portanto, um determinado volume pode ser representado com apenas uma destas fases ou uma mistura delas, assim são obtidas três condições para a fração de volume do fluido: quando $\alpha_{\text{água}} = 0$ o volume está sem água, ou seja, completo de ar; quando $\alpha_{\text{água}} = 1$ o volume está completo de água e, por fim, quando $0 < \alpha_{\text{água}} < 1$ o volume possui as duas fases, água e ar, neste caso $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$.

Portanto, a soma em cada célula de todas as fases deve ser sempre igual a um. Ao empregar o modelo VOF, está se resolvendo um conjunto de equações, as equações de quantidade de movimento e de continuidade, que são aplicadas a cada fluido ao longo do volume. Então, a fração de volume de cada fluido em cada célula é considerada em todo o domínio computacional através da equação de transporte para a fração volumétrica. Assim, o modelo é composto pela equação de continuidade (FLUENT, 2006):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v} \right) = 0 \quad (4.1)$$

Pela equação da fração volumétrica:

$$\frac{\partial (\rho \alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \alpha \vec{v} \right) = 0 \quad (4.2)$$

Reescrevendo a equação acima para duas fases, tem-se:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \left(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \right) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n \left(\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp} \right) \quad (4.3)$$

onde, $\dot{m}_{pq}$ é a transferência de massa da fase p para a fase q e $\dot{m}_{qp}$ é a transferência da massa da fase q para a fase p. Segundo FLUENT 6.3 (2006), o termo fonte no lado direito da equação, S_{α_q} , é nulo (zero), porém, este termo pode ser empregado uma fonte de massa constante ou definida pelo usuário para cada fase. Na fase primária, a equação da fração volumétrica não será resolvida e a fração de volume será computada através da seguinte restrição:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (4.4)$$

Ao longo do domínio computacional, uma única equação da quantidade de movimento é resolvida, e o campo de velocidades é compartilhado entre as fases. A equação da quantidade do movimento depende da fração de volume de todas as fases e de suas propriedades ρ e μ , massa específica do fluido (kg/m^3) e viscosidade (kg/ms) respectivamente, como a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \vec{v} \right) + \nabla \left(\rho \vec{v} \vec{v} \right) = -\nabla p + \nabla (\mu \vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (4.5)$$

onde, $\vec{v}$ é o vetor velocidade de escoamento (m/s), $\vec{g}$ é a aceleração da gravidade (m/s^2), $\vec{\tau}$ é o tensor de tensões (N/m^2), p é a pressão estática (Pa), e t é o tempo (s),

Assim, ao resolver as equações de conservação de massa e de continuidade de movimento, para a mistura entre ar e água, os valores médios para a massa específica e viscosidade são necessários, respectivamente são dados por:

$$\rho = \alpha_{\text{água}} \rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \rho_{\text{ar}} \quad (4.6)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}} \mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}} \mu_{\text{ar}} \quad (4.7)$$

Uma das limitações de se compartilhar campos ocorre em casos onde grandes diferenças de velocidade existem entre as fases, a precisão das velocidades computadas perto das interfaces pode ser afetada adversamente.

4.2. Técnica da praia numérica

A praia numérica é assumida como um domínio retangular, onde seu plano final (superfície

externa) é um limite de saída de pressão de canal aberto e o plano de partida é um plano paralelo a uma saída de pressão. A direção da praia é assumida como a direção normal para uma saída de pressão. O comprimento de amortecimento é a distância normal entre o fim e o plano inicial (Fluent, 17.0).

Para evitar a reflexão da onda, na região de amortecimento é adicionado um termo sumidouro (S) na equação da conservação da quantidade de movimento para a realização do amortecimento da onda incidente próximo ao limite da saída de pressão. Conforme (Lisboa et al., 2016; Fluent, 2017)

$$S = - \left[C_1 \rho V + \frac{1}{2} C_2 \rho |V|V \right] \left(1 - \frac{Z - Z_{fs}}{Z_b - Z_{fs}} \right) \left(\frac{x - x_s}{x_e - x_s} \right)^2 \quad (4.8)$$

onde C_1 e C_2 são, respectivamente, coeficiente de amortecimento linear (1/s, resistência por unidade de tempo) e coeficiente de amortecimento quadrático (1/m, resistência por unidade de comprimento), ρ é a massa específica, V é a velocidade, Z é a posição vertical, Z_{fs} e Z_b são as posições verticais da superfície livre e do fundo, x é a posição horizontal, x_s e x_e são as posições horizontais do início e do fim da praia numérica, respectivamente. Os coeficientes de amortecimento, linear e quadrático, padrão é de 10 resistências por unidade, porém, neste trabalho, foi adotado como $C_1 = 20$ e $C_2 = 0$ para todas as simulações realizadas.

A resistência ao amortecimento linear e quadrático deve ser escolhida com cuidado, pois o amortecimento muito grande ou muito pequeno pode afetar os perfis das ondas em uma zona sem amortecimento, um amortecimento muito pequeno pode causar interferências de reflexão no final do tanque de ondas, e um amortecimento maior pode causar reflexão no início da praia numérica (Fluent, 17.0).

4.2. Condições de contorno

Ao modelar computacionalmente um tanque de ondas é necessário levar em consideração alguns aspectos do espectro, como comprimento significativo e a altura significativa do espectro de onda a ser gerado, pois são através dessas características que será definido as dimensões do tanque de ondas.

Na Figura 4.1, o gerador de ondas é posicionado no início do canal, mais precisamente no lado esquerdo na parte inferior do tanque de ondas (em azul), onde é imposta uma condição de contorno de velocidade de entrada, neste caso o modelo usa as características da onda incidente como condição de entrada, conforme as características do espectro de onda. Assim, a geração numérica de espectro de ondas do tipo Pierson – Moskowitz consiste aplicar no gerador de ondas

uma variação da velocidade de entrada através da imposição das características do espectro, como a altura significativa, as frequências (pico, mínimo e máximo) e o número de componentes de ondas que formam o espectro.

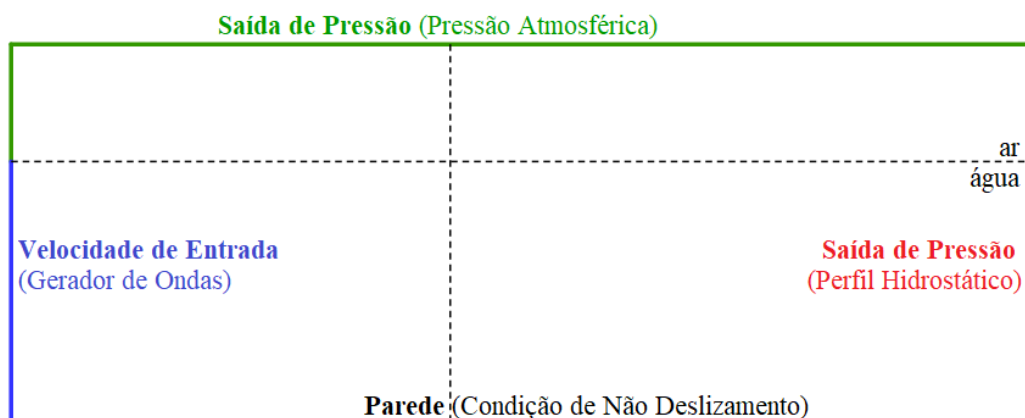


Figura 4.1 – Representação esquemática das condições de contorno.

Com relação às demais condições de contorno, na parte superior e na lateral esquerda superior (em verde) do tanque de ondas, são denominadas como pressão de saída, onde é aplicada a condição de contorno de pressão atmosférica. Na superfície lateral direita (em vermelho) é imposta a condição de perfil hidrostático. Na parte inferior (em preto) a condição de contorno é denominada parede, uma condição de não deslizamento e impermeabilidade com velocidade nula.

4.3. Geração da malha

A geração da malha, além de ser uma etapa inicial, é uma parte fundamental do trabalho. Neste estudo a estratégia adotada tem, inicialmente, após a simulação de várias malhas com diferentes refinamentos em determinadas regiões de interesse, obter a malha que mais se aproxima da solução analítica, além disto, levando em consideração o tempo de processamento e, principalmente o erro de discretização. Para isto, foram utilizadas malhas estruturadas formadas por quadriláteros quando em 2D.

O refinamento da malha é uma característica que influencia diretamente a qualidade do modelo. Por um lado, o aumento de número de elementos traduz-se numa maior precisão dos resultados, por outro implica maior tempo de cálculo. Assim é necessário encontrar um equilíbrio entre estes dois parâmetros (Ramalhais, 2011).

Para a geração da malha neste estudo, foi utilizada uma estratégia em que é dividido o tanque de ondas em várias regiões de interesse, ou seja, na vertical é dividida em três regiões e na horizontal em duas regiões, cada uma com um refinamento específico conforme o interesse. Esta

estratégia é baseada na técnica de malhas *stretched*, em Barreiro (2009) e em Gomes et al. (2012) foram apresentados um estudo detalhado a respeito da geração de malhas do tipo para a simulação numérica da propagação de ondas regulares em tanques. No entanto, para a propagação de espectro de ondas não havia sido realizado. Na Fig. 4.2 é possível observar o refinamento em determinada regiões.

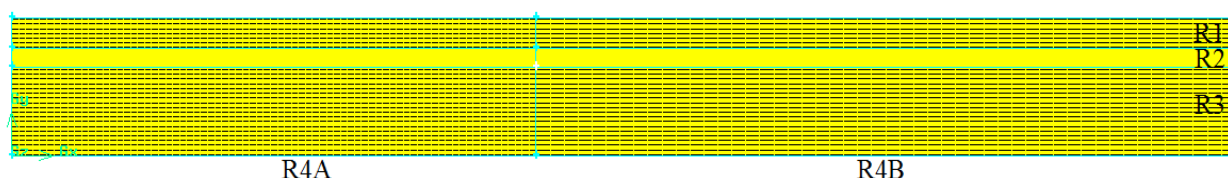


Figura 4.2 – Regiões de refinamento na geração da malha.

Ao utilizar essa estratégia de geração de malha, é possível estabelecer o número de volumes por região, conforme a Fig. 4.2, R1 corresponde ao número de volumes da região acima da superfície livre, ou seja, a região que contém apenas ar. Na região da superfície livre, onde possui água e ar, o número de volumes é representado por R2. Na região abaixo da superfície livre, que contém somente água, representado por R3. Para a região horizontal o número de volumes depende do número de volumes considerado para cada comprimento de onda (R4), assim, o número de volumes da região R4A corresponde a 1,5 comprimento de onda. Já na região R4B é adotada a metade do número de volumes em relação ao comprimento de onda (R4), como nesta região possui dois comprimentos de ondas, o número de volumes na horizontal é igual ao número de volumes do comprimento de onda. Com esse esquema é possível definir o número de volumes e as dimensões de cada volume da malha, dividindo a dimensão da região pelo número de volumes.

Na geração da malha foi utilizado um programa computacional para a construção e discretização de modelos para CFD e outras aplicações, o software GAMBIT. GAMBIT um gerador tridimensional de malhas com um mecanismo CAD embutido e pós-processador, seu objetivo é fornecer uma ferramenta de malha rápida, leve e fácil de usar com entrada paramétrica e recursos avançados de visualização. Além disso, é construído em torno de quatro módulos, da geometria, da malha, do solver e do pós-processamento. Todas as instruções geométricas, de malha, de solver e pós-processamento são prescritas interativamente usando a interface gráfica do usuário GAMBIT.

4.4. Modelo Numérico

O presente trabalho descreve um estudo teórico aplicando a conservação das equações de movimento, massa, energia e condições de contorno, uma vez que a resolução proposta aplica a

Modelagem Matemática e Métodos Numéricos. Para a solução das equações de conservação da massa e quantidade de movimento, foi empregado um código comercial baseado no Método de Volumes Finitos - MVF (FLUENT, 2006). Para todas as simulações será considerado o esquema de advecção *upwind* de segunda ordem para tratamento dos termos advectivos, enquanto a discretização espacial para a pressão foi realizada através do método PRESTO e o método GEO-RECONSTRUCTION para a fração volumétrica. Quanto ao acoplamento pressão-velocidade foi empregado o método PISO e o método de inicialização de entrada é aplicado o método *wavy*.

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

Para Versteeg e Malalasekera (1999), a análise de sistemas, através de simulações computacionais, envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, é conhecida como Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), e apresenta as seguintes vantagens: redução substancial de tempo e custo em novos projetos, capacidade em estudar sistemas onde análises experimentais são complexas ou impossíveis e nível praticamente ilimitado de detalhamento de resultados.

- De uma maneira geral, os pacotes comerciais de CFD apresentam sofisticadas interfaces aos usuários, facilitando a definição do problema e a análise dos resultados. Para isso, estes códigos são divididos em três etapas: pré-processamento, a solução e o pós-processamento. A etapa inicial consiste na introdução do problema no programa de CFD e na subsequente transformação destas informações em uma forma adequada para a solução do problema. Então, o pré-processamento é responsável pelos seguintes procedimentos: definir a geometria da região de interesse (domínio computacional), dividir o domínio em um número finito de subdomínios (geração da malha), selecionar o fenômeno físico e/ou químico que será modelado, definir as propriedades do fluido e aplicar condições de contorno e iniciais apropriadas.

Neste trabalho os softwares GAMBIT (pré-processamento) e FLUENT (pré-processamento, solução e pós-processamento) são utilizados na modelagem matemática e na solução das equações

governantes da simulação numérica de dispositivos para a conversão da energia de ondas oceânicas em energia elétrica do tipo CAO.

O GAMBIT é um programa computacional que auxilia na construção e discretização de modelos para CFD e outras aplicações científicas. É capaz de tornar mais simples e intuitivas as etapas de construção, discretização (geração da malha) e definição dos tipos de regiões do modelo, sendo suficientemente versátil para tratar uma ampla variedade de modelos (Fluent 6.3, 2006).

O FLUENT[®] é um programa computacional, baseado no MVF, para a modelagem de escoamento de fluidos e de transferência de calor em geometrias complexas. Apresenta flexibilidade de malha, incluindo a capacidade de resolver problemas de escoamento usando malhas não estruturadas, geradas em geometrias complexas com relativa facilidade. É compatível com malhas do tipo bidimensional (triângulo/quadrilátero) e tridimensional (tetraedro/hexaedro/pirâmide/híbridas) (Fluent 6.3, 2006).

4.5. Técnica de Pós-processamento

Após as simulações foi realizado o pós-processamento com as informações obtidas, através de planilhas eletrônicas foi realizado uma análise dos dados, comparando as soluções, analítica e numérica, de forma quantitativa, em seguida foi gerado os gráficos para uma comparação qualitativa das soluções.

A geração numérica da onda irregular leva em conta as componentes do espectro extraídas a partir da Eq. (3.9), a onda irregular gerada numericamente pode ser comparada com a onda analítica, obtida através da soma das amplitudes instantânea das componentes do espectro, conforme a Eq. (3.17). Além da comparação da onda irregular, a análise através da Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) foi empregada para remontar o espectro da densidade numérica e assim realizar uma comparação com a densidade espectral analítica.

5. RESULTADOS

As análises do presente trabalho consistem em comparar a solução numérica com a solução analítica da elevação da superfície livre, em diferentes regiões (sondas) do tanque de ondas. Inclusive, por este motivo, não se discute a verificação do modelo em separado, pois de certo modo todo o trabalho é de verificação do modelo. Para quantificar o erro gerado nestas comparações são empregadas as normas definidas pelas Eqs. (5.1)-(5.3).

A Eq. (5.1) corresponde à norma l_∞ , que pode ser utilizada para comparar as alturas significativas da elevação da superfície livre da solução analítica e da solução numérica, dada por (Kreyszig, 2011):

$$\|l_\infty\| = \max_j |x_j| \quad (5.1)$$

onde, x_j representa a variável em consideração instantânea.

O emprego da norma dada pela Eq. (5.1) possibilita analisar a diferença da elevação da superfície livre nos picos de elevação das alturas significativas.

Além disso, são empregadas mais duas médias para quantificar os erros gerados nas comparações. Para comparar a elevação das superfícies livre entre as soluções numérica e analítica, a média do erro absoluto (MAE - *Mean Absolute Error*), dada por:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{num,i} - x_{ana,i}| \quad (5.2)$$

onde, n é o número de amostras analisadas, i é o número da amostra analisada, $x_{num,i}$ representa a elevação da superfície livre instantânea obtida numericamente e $x_{ana,i}$ representa a elevação da superfície livre instantânea obtida analiticamente.

Ainda foi utilizada a média do desvio padrão (RMSE - *Root Mean Square Error*), dada por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{num,i} - x_{ana,i})^2}{n}} \quad (5.3)$$

As posições (sondas) onde a elevação da superfície livre foi analisada podem ser observadas na Fig. 3.7.

5.1. Análise da Discretização espacial

Em Barreiro (2009) e em Gomes et al. (2012) foram apresentados estudos a respeito da geração de malhas do tipo *stretched* para a simulação numérica da propagação de ondas regulares em tanques e a recomendação indica que, na região da superfície livre da água (região R2) deve ser adotado um refinamento com 40 volumes na direção y (o tamanho desse intervalo é equivalente a $H/20$) e com 50 volumes por comprimento de onda, na direção x (o tamanho do intervalo nesse caso é equivalente a $\lambda/50$). Além disso, 20 e 60 volumes devem ser usados na direção y para a discretização espacial das regiões R1 e R3, respectivamente. Com isto, a contribuição deste estudo é realizar este tipo de análise na discretização do domínio espacial para um espectro de ondas, visto que um espectro possui várias ondas com frequências e amplitudes diferentes, sendo necessário, assim, estabelecer uma recomendação para a discretização espacial.

Para a discretização vertical o parâmetro é a altura significativa e na discretização horizontal é o comprimento da onda em três situações: a) comprimento da onda referente à frequência mínima do espectro de ondas, b) comprimento da onda referente à frequência de pico do espectro de ondas e c) comprimento da onda referente à frequência máxima do espectro de ondas. Os valores testados para a discretização espacial são apresentados na Tab. 5.1. Na região da praia numérica é aplicado um estiramento progressivo onde o tamanho dos volumes aumenta o dobro em relação à região de propagação do espectro de ondas, vide Fig. 5.1.

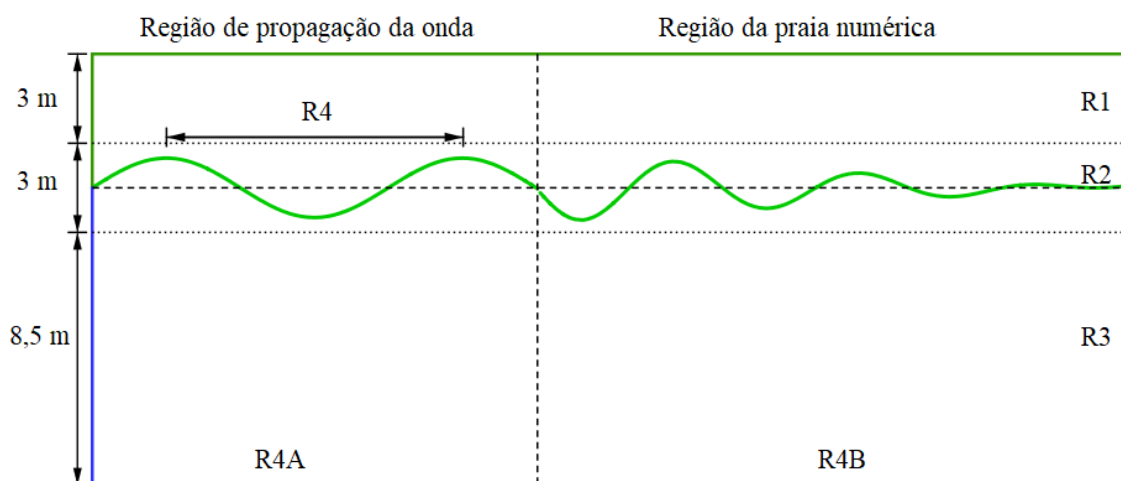


Figura 5.1 – Dimensões do domínio computacional para a geração da malha.

Acima da região da superfície livre, região R1, que possui apenas ar, foi considerada uma altura de 3,0 m que é o equivalente a duas vezes a altura significativa do espectro de ondas. E, a partir do nível da superfície livre, para garantir que a elevação da onda ocorra numa região com um refinamento maior, foi considerada uma altura de 3,0 m, que corresponde ao dobro da altura

significativa que é de 1,5 m, estabelecendo assim, 1,5 m acima e 1,5 m abaixo do nível da superfície livre.

Na Tabela 5.1 são apresentados os diferentes refinamentos testados neste trabalho, e principalmente o número de volumes por regiões. É importante destacar que cada simulação corresponde a uma malha com um refinamento diferente, ou seja, simulação 1 corresponde a malha 1, simulação 2 com a malha 2, e assim sucessivamente.

Tabela 5.1 – Número de volumes para cada malha analisada.

Simulação		Nº de volumes						Total de volumes
		R1	R2	R3	R4	R4A	R4B	
1	Mínimo $1,5 * \lambda_{min}$	20	20	60	40	60	40	10.000
2		20	40	60	50	75	50	15.000
3		20	60	60	75	113	75	26.320
4		20	80	60	100	150	100	40.000
5	Pico $1,5 * \lambda_p$	20	20	60	40	60	40	10.000
6		20	40	60	50	75	50	15.000
7		20	60	60	75	113	75	26.320
8		20	80	60	100	150	100	40.000
9	Máximo $1,5 * \lambda_{max}$	20	20	60	40	60	40	10.000
10		20	40	60	50	75	50	15.000
11		20	60	60	75	113	75	26.320
12		20	80	60	100	150	100	40.000

Para a montagem da Tab. 5.1 foram considerados valores fixos para as regiões verticais R1 e R3, que correspondem às regiões acima e abaixo da superfície livre, com 20 e 60 volumes, respectivamente. E R2 e R4 são as regiões de maior interesse, que correspondem à região vertical de superfície livre e o comprimento significativo do espectro de ondas, sendo estas dimensões que sofreram variações no número de volumes, sendo que o número de volumes para R2 sofre um acréscimo de 20 volumes a cada simulação, num conjunto de 4 simulações.

Para uma análise quantitativa, foram consideradas as Eqs. (5.1) - (5.3) a fim de calcular a diferença entre as soluções, analítica e numérica, de cada simulação realizada neste trabalho, totalizando doze simulações neste tópico. Além disto, foram calculadas também, para todas as posições das sondas consideradas, sendo as posições apresentadas na Fig. 3.6.

Na Tabela 5.2 é apresentado o cálculo das normas e médias através das Eqs. (5.1)-(5.3) considerando a elevação da superfície livre nas 5 sondas de medição apresentadas na Fig. 3.6. De uma maneira geral a média do erro absoluto (MAE) é menor para as oito primeiras simulações, que correspondem, respectivamente, ao comprimento de onda relativo à frequência mínima e à frequência de pico do espectro de ondas.

Com isto, consequentemente, a média do desvio (RMSE) torna-se menor nestas primeiras simulações. Além dos erros, a diferença entre as normas ($l_{ana} - l_{num}$) indica menores diferenças para as quatro primeiras simulações, correspondendo ao comprimento de onda referente à frequência mínima do espectro de ondas, como pode ser observado na Tab. 5.2.

Tabela 5.2 – Análise quantitativa do erro relativo à discretização espacial.

Sonda	MAE	RMSE	$l_{ana} - l_{num}$	Sonda	MAE	RMSE	$l_{ana} - l_{num}$
1	0,219922	0,276718	0,364830	7	0,245340	0,316369	0,701475
	0,245428	0,295183	0,119852		0,311830	0,382370	-0,078750
	0,250644	0,307010	0,029357		0,279125	0,346637	-0,247621
	0,285333	0,367448	0,124067		0,247725	0,318289	-0,326995
	0,326257	0,421965	0,254502		0,341121	0,408963	0,055305
2	0,233963	0,293349	0,305435	8	0,250397	0,322603	0,686837
	0,247760	0,301219	0,130935		0,312700	0,384140	-0,103140
	0,252114	0,317738	-0,008209		0,278460	0,346216	-0,251281
	0,277049	0,352892	0,047837		0,253884	0,325930	-0,292037
	0,337852	0,426936	0,185158		0,341346	0,409793	0,043544
3	0,250396	0,313000	0,283513	9	0,691290	0,827205	-0,674878
	0,257272	0,316082	0,101605		0,661090	0,791043	-0,691372
	0,255621	0,333135	-0,088175		0,609638	0,737000	-0,806481
	0,287620	0,363274	0,083394		0,555451	0,661954	-0,300109
	0,343817	0,437940	0,069683		0,355161	0,454591	0,612065
4	0,253591	0,315797	0,299248	10	0,515884	0,619858	-0,101698
	0,258919	0,319127	0,129537		0,525690	0,638283	-0,242666
	0,257135	0,339667	-0,120683		0,478832	0,580290	-0,128970
	0,287320	0,373337	-0,015616		0,430517	0,511449	0,115319
	0,346755	0,444702	0,026291		0,217826	0,314872	0,904834
5	0,242177	0,317884	0,742854	11	0,514192	0,618707	-0,092752
	0,303030	0,371280	0,050610		0,526240	0,638973	-0,246323
	0,273386	0,338600	-0,200565		0,478922	0,580999	-0,132336
	0,250113	0,314772	-0,133296		0,431180	0,511938	0,116530
	0,325102	0,390207	0,200479		0,217486	0,315446	0,905544
6	0,241223	0,313810	0,728422	12	0,514488	0,618677	-0,093712
	0,307200	0,376880	-0,008930		0,525943	0,638534	-0,246203
	0,276094	0,342013	-0,223779		0,479182	0,581424	-0,137553
	0,244688	0,312185	-0,251356		0,429539	0,510097	0,121667
	0,341391	0,407024	0,083265		0,217221	0,315482	0,906173

Na Figura 5.2 é apresentada uma comparação qualitativa da elevação da superfície livre obtida analiticamente e numericamente ao longo do tempo. Para esta comparação foi considerada somente a posição da primeira sonda, que é a sonda mais próxima ao gerador de ondas.

Ainda na Figura 5.2, o critério de escolha das simulações foi considerar duas simulações para cada comprimento da onda, duas referente à frequência mínima do espectro, duas referente à frequência de pico do espectro e duas referente à frequência máxima do espectro de ondas.

Para todas as simulações realizadas foram analisados 100 segundos de propagação com um avanço de tempo igual a 0,01 s (*time-step*). E a solução analítica é obtida a partir da Eq. (3.17), que considera a soma das amplitudes instantâneas para as 15 componentes de ondas do espectro em consideração.

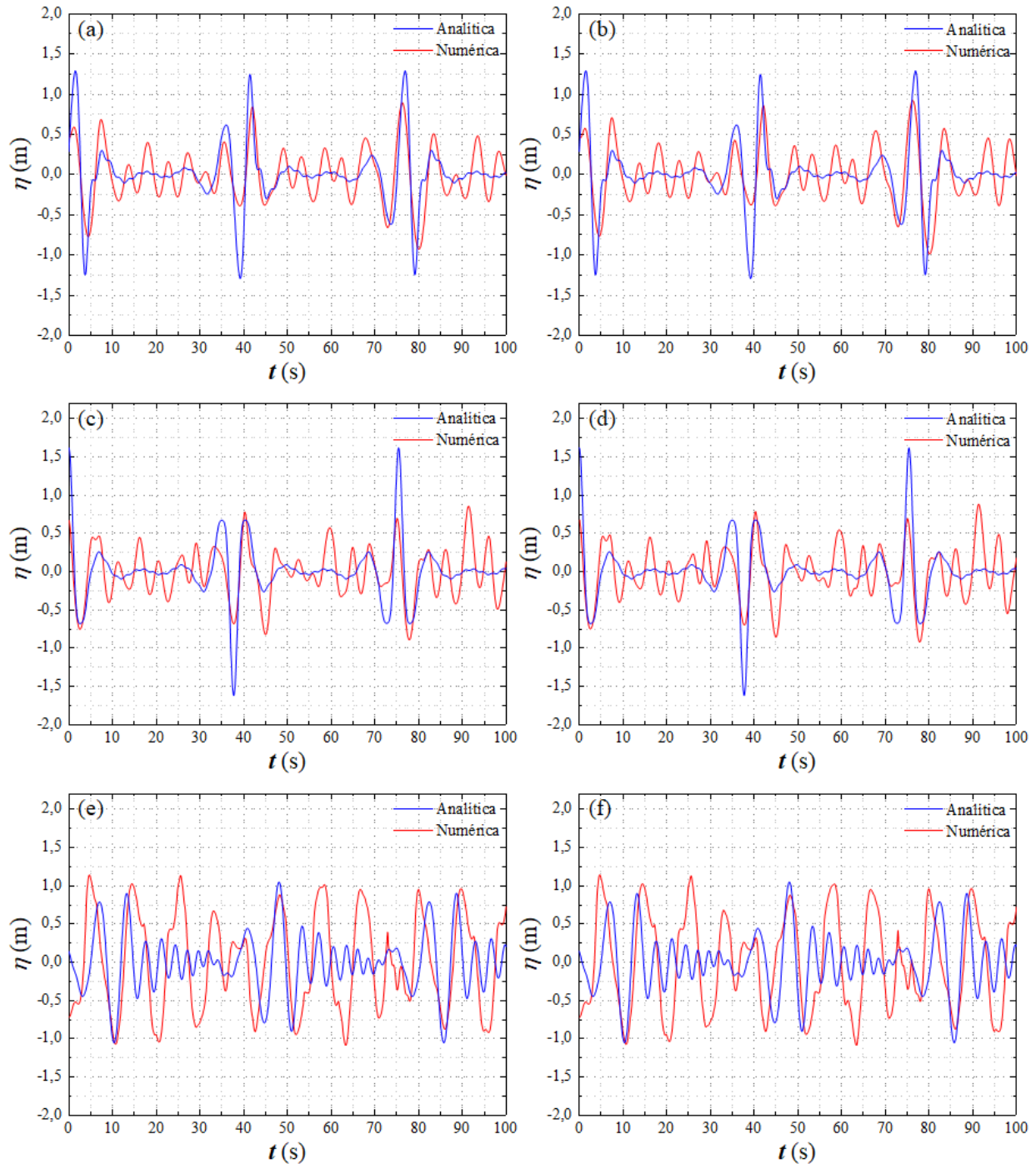


Figura 5.2 – Elevação da superfície livre da discretização espacial na sonda 1 em:

(a) Simulação 1, (b) Simulação 2, (c) Simulação 7,
(d) Simulação 8, (e) Simulação 11 e (f) Simulação 12.

De uma maneira qualitativa é possível notar uma concordância entre as duas soluções apresentadas, analítica e numérica, principalmente para as Figs. 5.2 (a, b, c, d), onde os picos de elevação da superfície livre das soluções coincidem. Além disso, também é possível notar esta concordância analisando a Fig. 5.2 com o erro médio correspondente na Tab. 5.2, quanto mais as curvas se coincidem, menor é o erro entre as soluções. O que não acontece se forem analisadas as Figs. 5.2 (e, f), onde há uma diferença elevada em relação à elevação da superfície livre, acarretando um erro maior chegando próximo a 51,4 %, devido ao comprimento de onda imposto.

Um aspecto significativo a ser analisado em espectro de ondas é a densidade espectral em relação a frequência. Assim, na Fig. 5.3 e na Fig. 5.4, são apresentadas as comparações da densidade espectral analítica, imposta no gerador de ondas, com a densidade espectral obtida numericamente, através de uma análise por Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform – FFT*). Para a análise com FFT, devem ser considerados um número de pontos múltiplos de potências de 2, semelhante com o que foi utilizado em Elangovan (2011). Portanto, foi realizada uma análise por FFT considerando 1024 pontos iniciais para a montagem do espectro numérico de ondas, conforme a sequência indicada na Fig. 3.3.

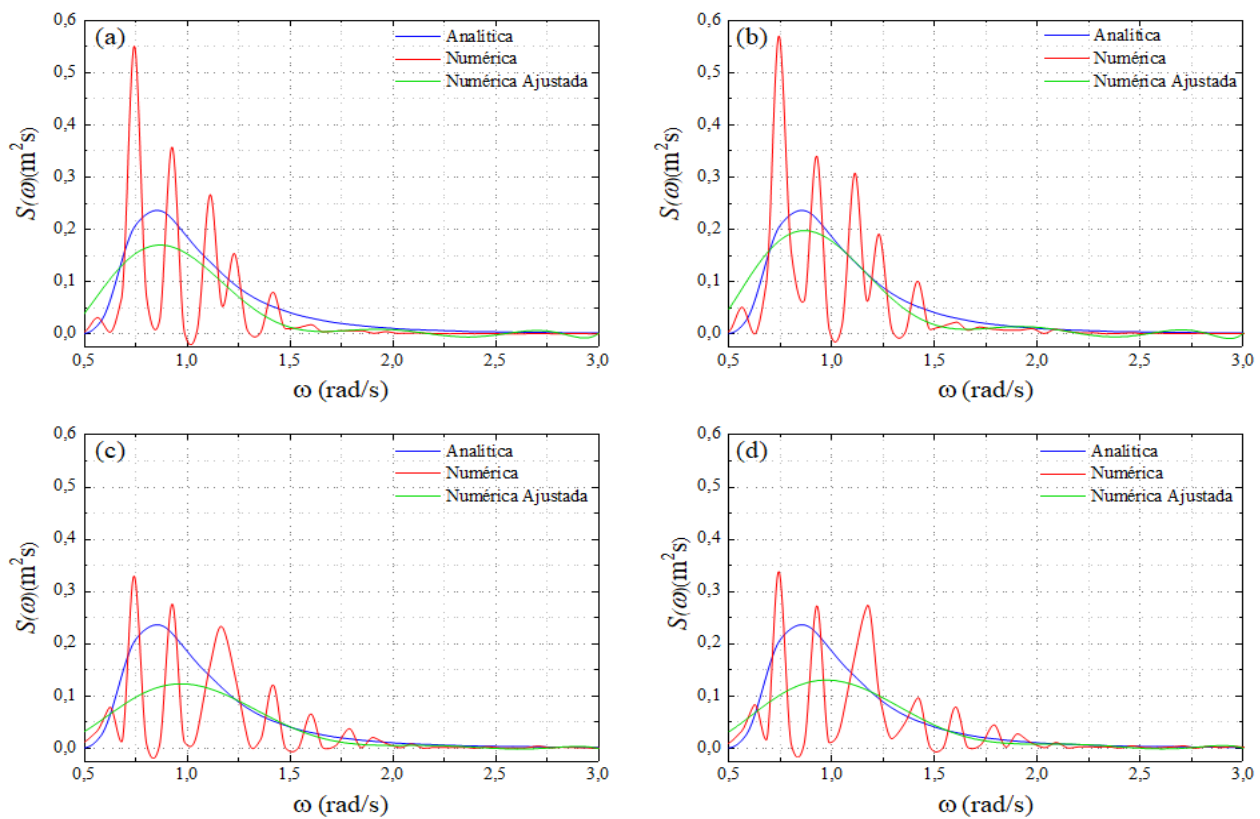


Figura 5.3 – Comparação da densidade espectral das soluções na sonda 1 em:

- (a) Simulação 1 em $x = 31,70$ m, (b) Simulação 4 em $x = 31,70$ m,
(c) Simulação 5 em $x = 17,43$ m e (d) Simulação 8 em $x = 17,43$ m.

Na Figura 5.3 e na Figura 5.4, é possível observar algumas oscilações para a densidade espectral numérica, isso ocorre devido ao número de componentes de ondas (que será discutido mais adiante), que é uma discretização do espectro real. Portanto, para obter um comportamento médio da densidade espectral obtida numericamente, sem as oscilações, é ajustada uma curva numérica, chamada de “numérica ajustada”, através de um polinômio de grau 9.

É possível notar, ainda na Fig. 5.3 e na Fig. 5.4 que ao ajustar a curva numérica, as oscilações são eliminadas na curva numérica ajustada e na média a densidade espectral analítica e numérica ajustada se aproximam. Essa aproximação ocorre principalmente nos dois primeiros casos da Fig. 5.3, pois correspondem às malhas que apresentam resultados com maior acurácia.

Nas simulações 9 a 12, da tab. 5.1, que se referem ao comprimento máximo de onda do espectro (o equivalente a frequência máxima), os erros médios e desvios são significativos se comparados com os demais casos analisados até aqui. Assim, não é recomendável adotar como padrão para discretização espacial o comprimento máximo de onda do espectro.

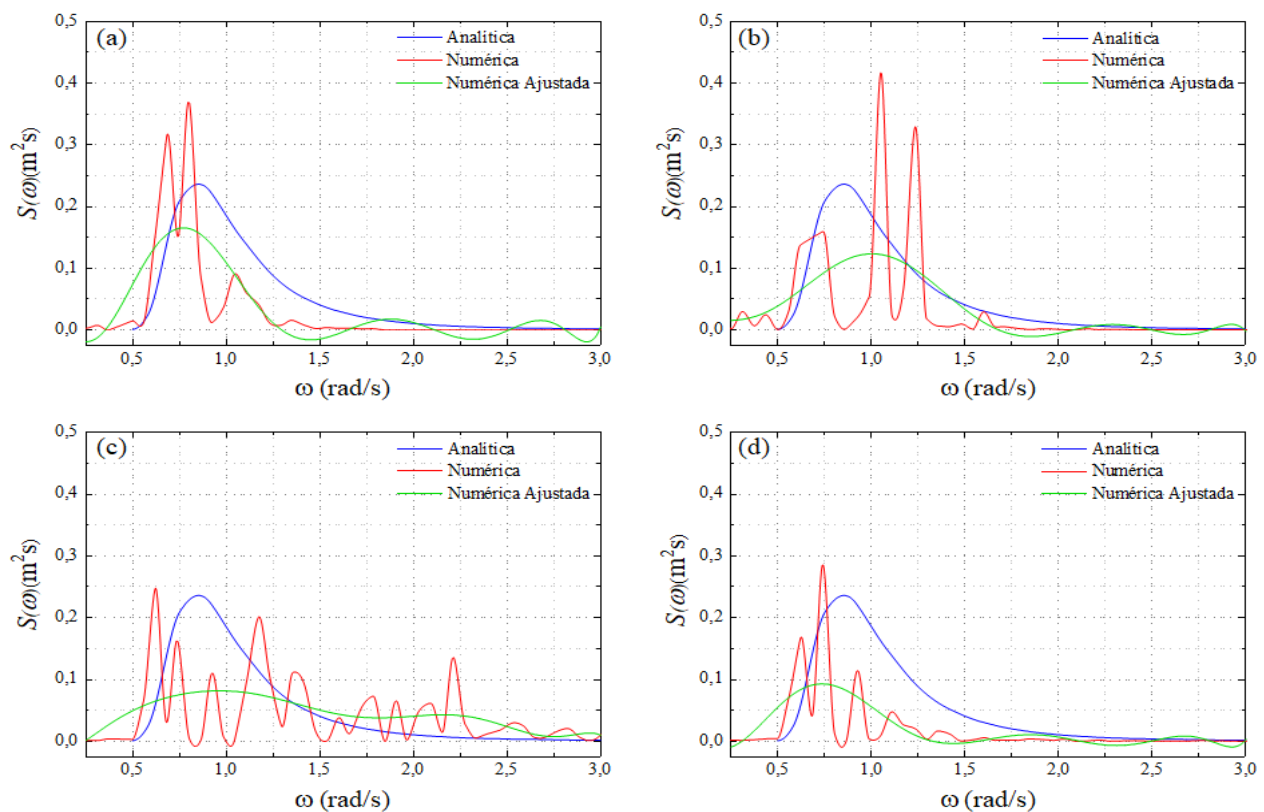


Figura 5.4 – Comparação da densidade espectral das soluções na sonda 5 em:

- (a) Simulação 1 em $x = 357$ m, (b) Simulação 5 em $x = 196,05$ m,
(c) Simulação 9 em $x = 20,52$ m e (d) Simulação 12 em $x = 20,52$ m.

Outro aspecto importante é em relação ao tempo de processamento, em que para as malhas mais grosseiras, com 10.000 volumes, o tempo aproximado de processamento foi de 3 h. Já para as malhas um pouco menos grosseira, com 15.000 volumes, o tempo de processamento foi de 4,5 h.

Para as malhas com 26.320 volumes o tempo foi de 6 h e para a malha mais refinada, com 40.000 volumes, o tempo de processamento foi de, aproximadamente, 8 h. Como era de se esperar, quanto mais refinada a malha, mais tempo de processamento e esforço computacional.

Em geral, analisando a Fig. 5.3, a Fig. 5.4 e a Tab. 5.2, é possível observar que os melhores resultados em relação às normas e médias, dados pelas Eqs. (5.1)-(5.3), estão concentrados nas oito primeiras simulações, referentes ao comprimento mínimo da onda do espectro (o equivalente a frequência mínima do espectro de ondas) e ao comprimento de pico da onda (o equivalente a frequência de pico do espectro de ondas), em que os erros médios e desvios são razoáveis.

Além disto, a simulação 3, da Tab. 5.1, onde é considerada uma malha não muito refinada e nem tão grosseira, é a mais adequada a ser empregada ainda que as diferenças de erros estejam levemente superiores as demais simulações do conjunto, em compensação, é onde possui as menores diferenças de pico.

5.2. Análise da Discretização temporal

Outro parâmetro de investigação é a discretização temporal, o avanço no tempo (*time-step*). O avanço no tempo é mais um parâmetro importante na precisão da simulação numérica e no tempo de processamento da simulação numérica, pois o uso de valores inadequados pode provocar perda de informação bem como a não convergência residual da velocidade, da fração de volume e da conservação da massa (Carneiro, 2009).

Nesse sentido foram analisados diferentes passos de tempo, conforme exposto na Tab. 5.3.

Tabela 5.3 – Testes relativos à discretização temporal.

Simulação	Avanço no tempo
13	$T_{min} / 100$
14	$T_{min} / 400$
15	$T_{min} / 500$
16	$T_{min} / 1000$
17	$T_P / 100$
18	$T_P / 400$
19	$T_P / 500$
20	$T_P / 1000$
21	$T_{max} / 100$
22	$T_{max} / 400$
23	$T_{max} / 500$
24	$T_{max} / 1000$

Para os testes em relação à discretização temporal foi utilizada a recomendação de malha obtida através da análise da discretização espacial, onde foi classificado como a melhor recomendação a simulação 3 (três) da Tab. 5.1, que corresponde ao comprimento mínimo da onda (o equivalente a frequência mínima do espectro de ondas) com um total de 26.320 volumes.

Ainda na Tabela 5.3, os valores em relação aos períodos de mínimo T_{min} (referente à frequência mínima do espectro de ondas), de pico T_P (referente à frequência de pico do espectro de ondas) e de máximo T_{max} (referente à frequência máxima do espectro de ondas) são levados em conta.

Na Tabela 5.4 é apresentado o cálculo das normas e médias através das Eqs. (5.1)-(5.3), considerando a elevação da superfície livre nas 5 sondas de medição apresentadas na Fig. 3.6.

Tabela 5.4 – Análise quantitativa do erro relativo à discretização temporal.

Sonda	MAE	RMSE	$l_{ana} - l_{num}$	Sonda	MAE	RMSE	$l_{ana} - l_{num}$		
13	1	0,347651	0,446497	0,464653	19	1	0,403444	0,517214	0,166875
	2	0,315938	0,401192	0,603350		2	0,353696	0,443504	0,253328
	3	0,301880	0,369225	0,615339		3	0,327366	0,413083	0,217476
	4	0,310236	0,369161	0,422366		4	0,330647	0,402280	0,072923
	5	0,312499	0,379124	0,178869		5	0,312356	0,376736	0,403863
14	1	0,380659	0,480173	0,210010	20	1	0,394152	0,509195	0,147711
	2	0,352573	0,442860	0,320057		2	0,396089	0,509153	0,214356
	3	0,321055	0,396755	0,347312		3	0,378558	0,461741	0,194579
	4	0,316611	0,379959	0,077809		4	0,325683	0,391734	0,072342
	5	0,306729	0,372863	0,406383		5	0,31635	0,381109	0,403884
15	1	0,360140	0,473973	0,203155	21	1	0,438770	0,551062	0,088578
	2	0,361874	0,450723	0,291179		2	0,384791	0,460282	0,151573
	3	0,344752	0,421128	0,301666		3	0,385966	0,478650	0,085874
	4	0,315971	0,376417	0,077809		4	0,278742	0,362048	0,065805
	5	0,306727	0,375234	0,40459		5	0,425256	0,529220	-0,109974
16	1	0,328528	0,418983	0,161198	22	1	0,413171	0,523501	0,143818
	2	0,319849	0,406994	0,239473		2	0,391742	0,478138	0,199482
	3	0,299731	0,372392	0,196585		3	0,363564	0,435656	0,176137
	4	0,292378	0,364009	0,072304		4	0,326598	0,409090	0,071876
	5	0,310065	0,377392	0,403805		5	0,316032	0,381353	0,404120
17	1	0,352877	0,456501	0,312468	23	1	0,395414	0,522314	0,250615
	2	0,320464	0,406456	0,440307		2	0,397763	0,484044	0,193715
	3	0,316616	0,385656	0,464193		3	0,350108	0,445895	0,168422
	4	0,321472	0,382195	0,235829		4	0,357069	0,435005	0,071705
	5	0,317228	0,385314	0,097088		5	0,317091	0,385529	0,404424
18	1	0,403936	0,506168	0,180091	24	1	0,441795	0,554060	0,338464
	2	0,355802	0,445708	0,255215		2	0,379333	0,464302	0,394259
	3	0,307301	0,390155	0,249198		3	0,326277	0,400374	0,484085
	4	0,327474	0,387646	0,074861		4	0,345772	0,440694	0,071555
	5	0,308229	0,374796	0,404073		5	0,338863	0,399287	0,409776

Com os resultados apresentados na Tab. 5.4 é possível concluir que as diferenças entre as médias e normas do erro são mínimas. No entanto, ao considerar a diferença de picos através da Eq. (5.1) estas diferenças são significativas nos casos analisados da Tab. 5.3.

Na Figura 5.5 são apresentados os gráficos da elevação da superfície livre na sonda 1 para a discretização temporal em relação ao período mínimo da onda, $T_{min} = 12,57$ s, para as simulações 13 à 16 da Tab. 5.3. Na Fig. 5.5(a), tem-se o avanço no tempo igual a $0,1257$ s, onde é possível perceber que quanto maior é o intervalo do avanço no tempo ocorrem mais oscilações numéricas da elevação da superfície livre. Além disto, quanto menor o avanço no tempo, mais tempo é necessário para a simulação numérica começar a repetir o ciclo.

Ao fazer uma comparação da Tab. 5.4 com a Fig. 5.5 é possível observar a diferença entre as simulações, em que uma pequena mudança no avanço do tempo (*Time-step*), pode resultar em consideráveis diferenças entre as simulações, principalmente na diferença entre as normas.

Ainda na Figura 5.5, a única mudança entre os gráficos é em relação ao avanço no tempo para a simulação numérica, e a elevação da superfície livre analítica não se altera.

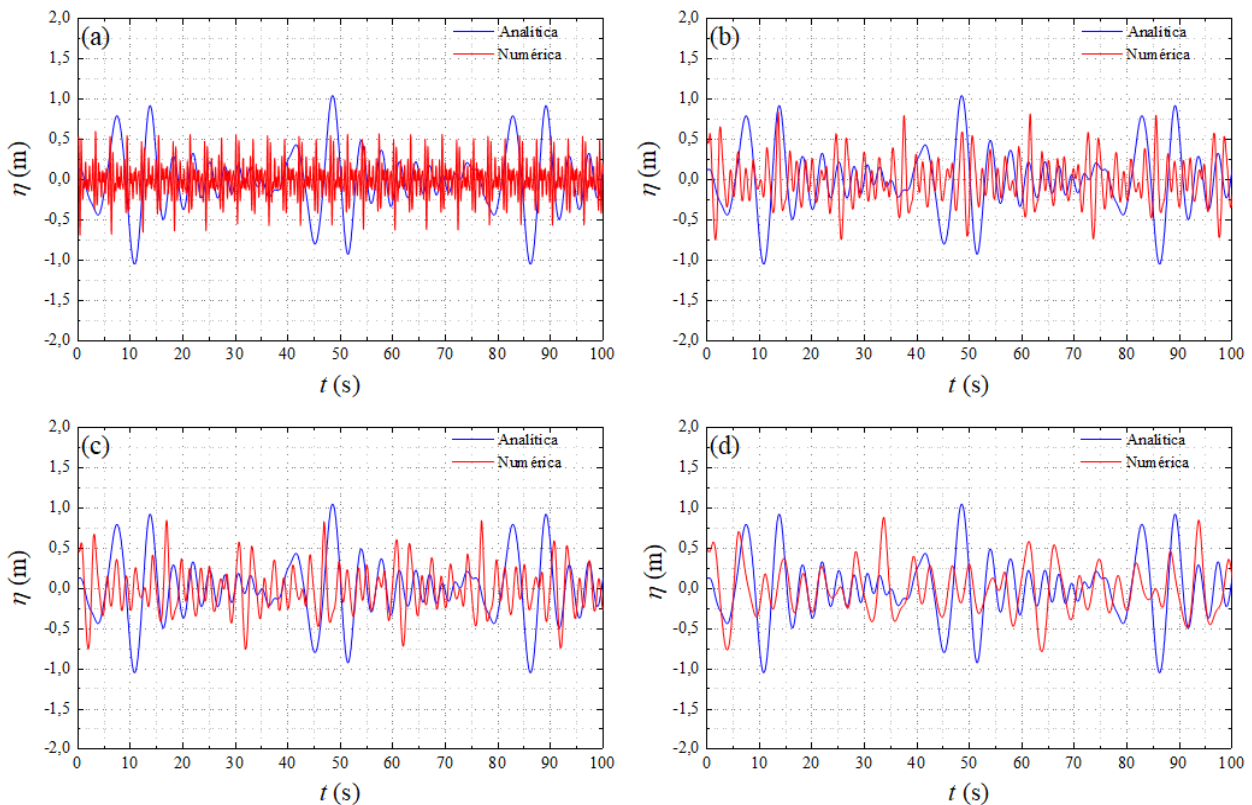


Figura 5.5 – Elevação da superfície livre da discretização temporal na sonda 1 em:

(a) $T_{min} / 100$, (b) $T_{min} / 400$, (c) $T_{min} / 500$, (d) $T_{min} / 1000$.

Na Fig. 5.5(a), tem-se o *time step* de $T_{min} / 100$, é possível observar que a elevação da superfície livre numérica se repete com mais frequência e as oscilações estão bem próximas.

Conforme diminui o avanço no tempo, mais tempo a elevação numérica leva para completar o ciclo e as oscilações mais distantes.

Comparando a Tab. 5.4 com a Fig. 5.6(a)-(b), que corresponde ao período de pico (simulações 19 e 20 na sonda 2), a diferença entre as normas são razoavelmente baixos, mas as médias dos erros são maiores. O mesmo acontece na Fig. 5.6(c)-(d), que correspondem ao período de máximo (simulações 21 e 22 na sonda 3). Com isto, o recomendado é definir o período mínimo (referente à frequência mínima) como padrão para a discretização temporal.

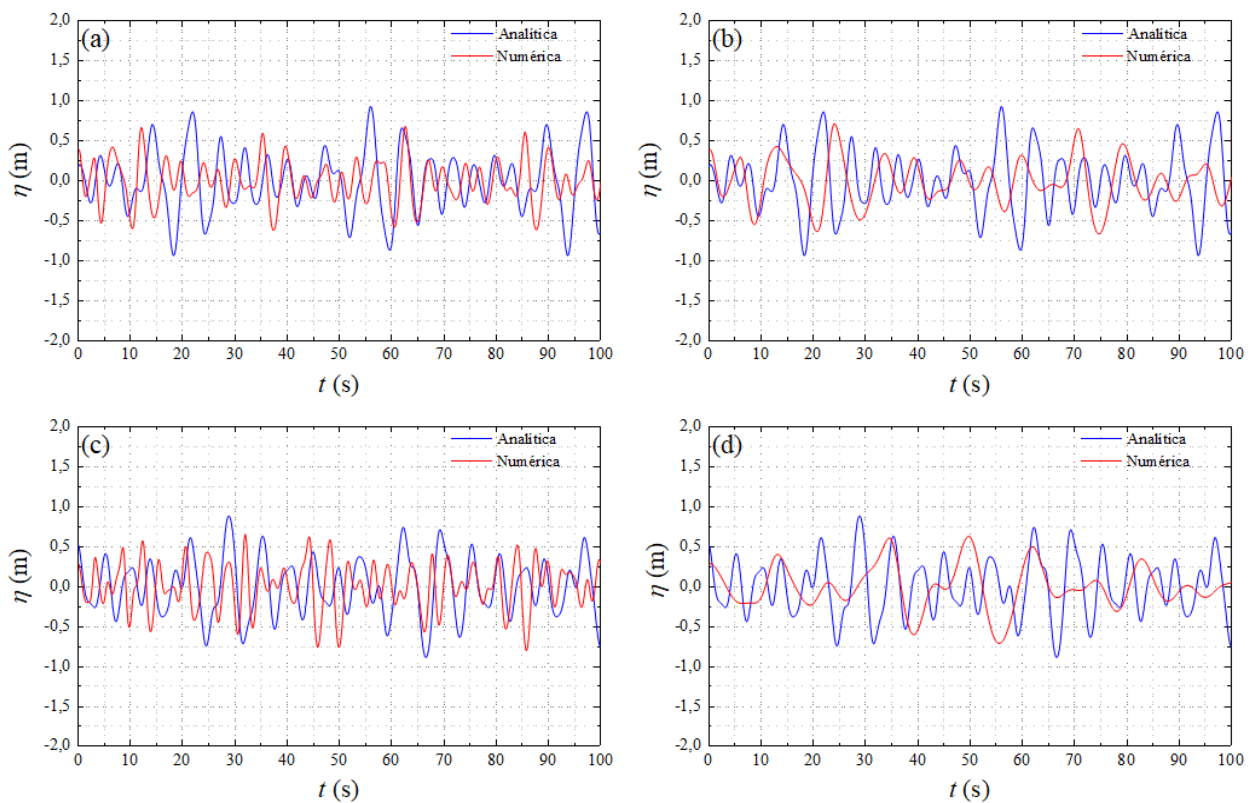


Figura 5.6 – Elevação da superfície livre da discretização temporal: na sonda 2 em (a) $T_p / 500$ e (b) $T_p / 1000$, sonda 3 em (c) $T_{máx} / 100$ e (d) $T_{máx} / 400$.

Na Figura 5.7 são apresentados os gráficos da densidade espectral na sonda 1 para as simulações 13 á 16 da Tab. 5.3, que corresponde a discretização temporal ao período de onda mínimo do espectro de ondas (o equivalente a frequência mínima do espectro de ondas), nesta figura fica evidente o efeito do avanço no tempo na simulação deste tipo de espectro de ondas, pois nota-se que quanto maior o avanço no tempo, mais deslocado para a direita as oscilações numéricas estão em relação à densidade espectral analítica.

Na Figura 5.8(a)-(b) é apresentada a comparação da densidade espectral, analítica e numérica, em relação à $T_p/500$ e $T_p/1000$, na sonda 2, onde o período de pico corresponde a 7,5 s. Nesses casos as densidades espectrais, numérica e analítica, não estão em concordância.

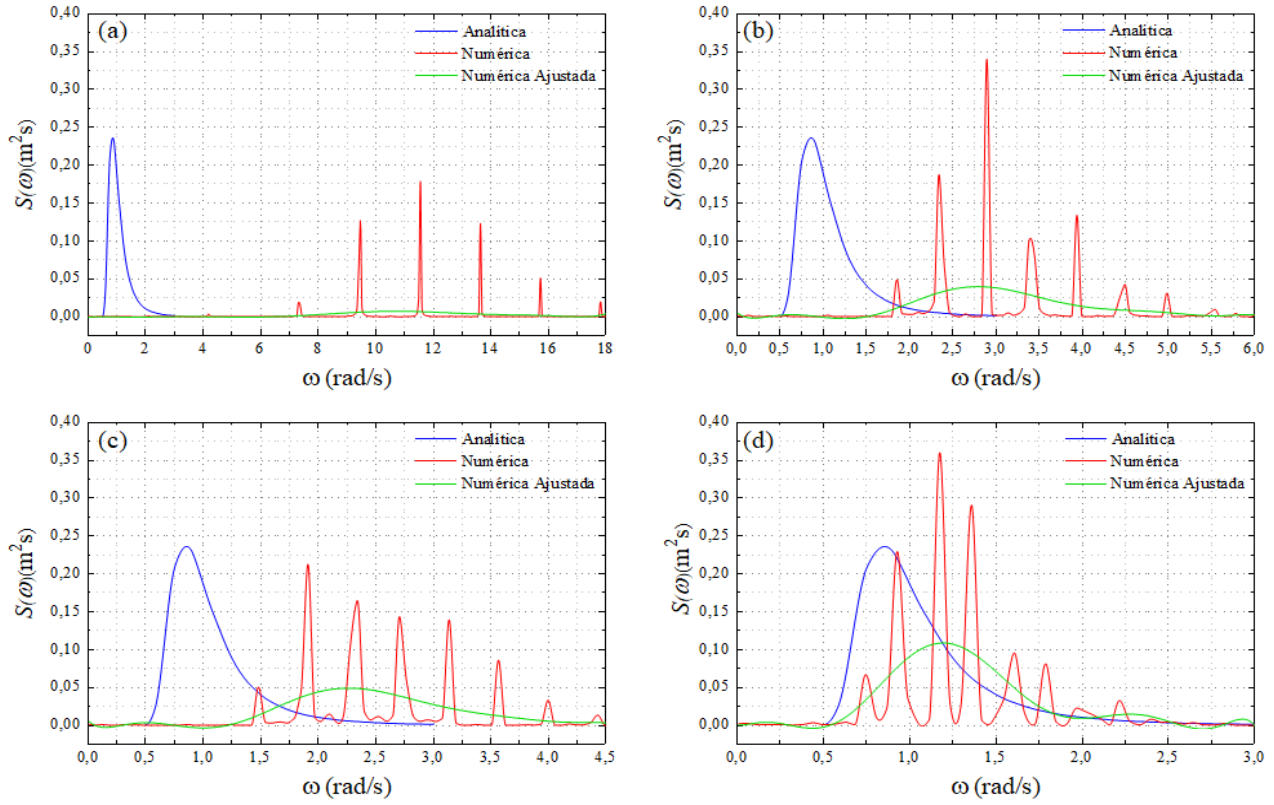


Figura 5.7 – Densidade espectral da discretização temporal na sonda 1 em:
 (a) $T_{min} / 100$, (b) $T_{min} / 400$, (c) $T_{min} / 500$, (d) $T_{min} / 1000$.

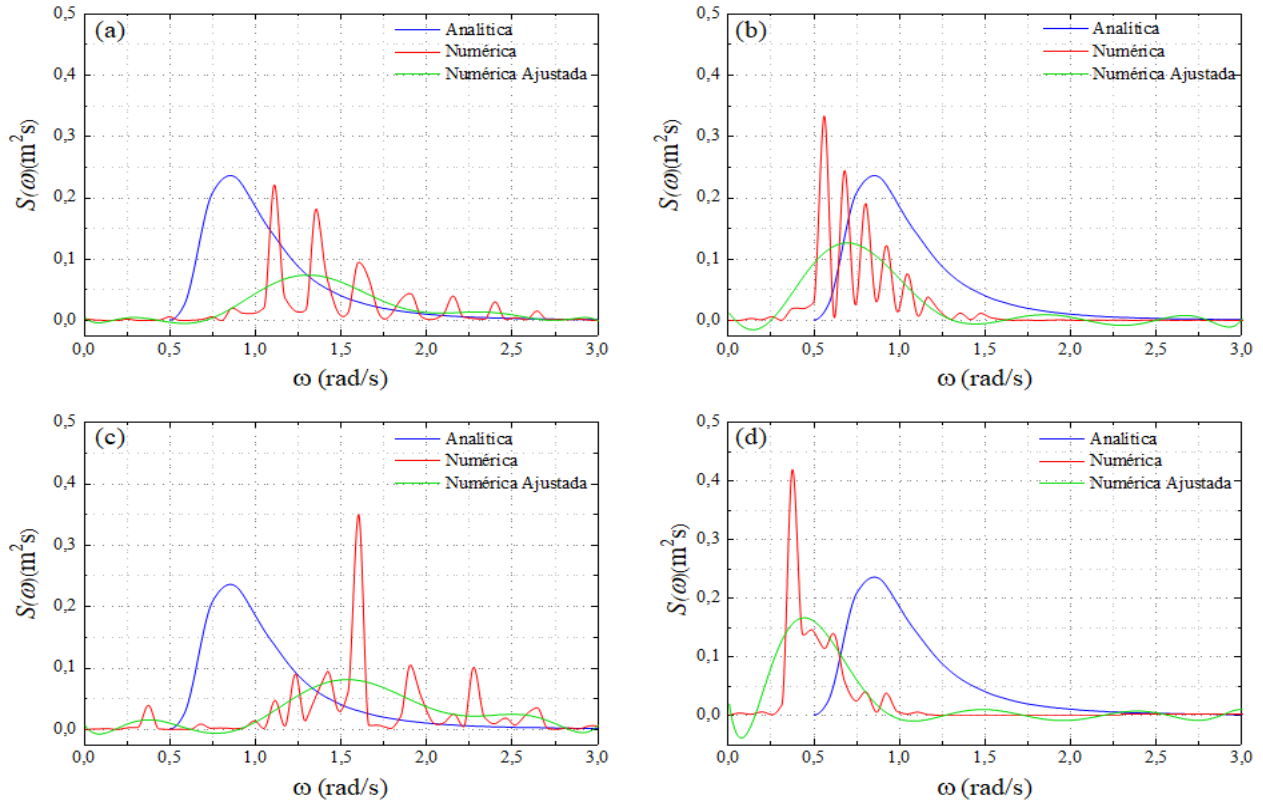


Figura 5.8 – Densidade espectral da discretização temporal: sonda 2 em
 (a) $T_p / 500$ e (b) $T_p / 1000$, sonda 3 em (c) $T_{max} / 100$ e (d) $T_{max} / 400$.

De forma semelhante acontecem para a Fig. 5.8(c)-(d), que correspondem, respectivamente, a $T_{máx}/100$ e $T_{máx}/400$, quanto menor for o intervalo de avanço no tempo, mais para a esquerda a densidade espectral numérica se desloca.

Ainda sobre a discretização temporal, além da análise das normas e médias dos erros, também foi realizada uma análise quanto ao tempo de processamento em relação às simulações realizadas de acordo com a Tab. 5.3. Na Tab. 5.5 é possível verificar a duração aproximada de cada simulação, em horas.

Tabela 5.5 – Tempo de processamento

Avanço no tempo	Duração da simulação (h)
$T_{min} / 100$	12,00
$T_{min} / 400$	6,67
$T_{min} / 500$	6,33
$T_{min} / 1000$	5,00
$T_P / 100$	8,67
$T_P / 400$	5,75
$T_P / 500$	5,33
$T_P / 1000$	4,07
$T_{máx} / 100$	7,17
$T_{máx} / 400$	3,25
$T_{máx} / 500$	2,88
$T_{máx} / 1000$	1,25

Levando em consideração os resultados da Tab. 5.4, com a Tab.5.5 e analisando a Fig. 5.7 e a Fig. 5.8 observa-se que os resultados com maior acurácia são para a discretização temporal para $T_{min} / 1000$, com menores erros, menores diferenças entre as normas e tempo de processamento.

5.3. Análise do número de componentes de ondas consideradas dentro do espectro

Nestes primeiros testes (referentes à discretização espacial e temporal) foi utilizado um espectro de ondas composto por 15 componentes de ondas dentro de um intervalo de frequências definido. Com o objetivo de analisar o efeito do número de componentes de ondas considerado no espectro de ondas foi considerada uma configuração e espectro semelhante aos demais casos, no entanto com outros números de componentes, conforme apresentado na Tab. 5.6.

Tabela 5.6 – Número de componentes de ondas no espectro.

Simulação	Número de componentes
25	5
26	20
27	40
28	60

Considerando a recomendação para a discretização temporal, discutida no capítulo 5.2, o avanço temporal considerado como adequado foi de $T_{min}/1000$, e através das Eqs. (5.1) - (5.3) foram obtidos os valores quantitativos em relação às simulações da Tab. 5.6. Sendo estes valores estão na especificados na Tab. 5.7.

Tabela 5.7 – Análise quantitativa do erro relativo ao número de componentes de ondas.

N. de ondas	Sonda	MAE	RMSE	$l_{ana} - l_{num}$
5	1	0,436772	0,541083	-0,116505
	2	0,421293	0,529811	-0,071437
	3	0,409032	0,519259	0,013538
	4	0,376983	0,470803	0,277176
	5	0,332804	0,397136	0,441876
20	1	0,365819	0,466100	0,449232
	2	0,375294	0,477718	0,065151
	3	0,366991	0,471242	0,174377
	4	0,318204	0,399608	0,404005
	5	0,296461	0,363706	0,197425
40	1	0,371935	0,512517	0,946992
	2	0,341714	0,426781	0,600131
	3	0,323910	0,409675	0,427459
	4	0,303386	0,378240	0,499480
	5	0,295444	0,374538	0,693992
60	1	0,381125	0,524657	1,497842
	2	0,401565	0,504665	0,635194
	3	0,397632	0,492082	0,727375
	4	0,337502	0,435961	0,887590
	5	0,322837	0,43463	0,927822

Na Figura 5.9, é possível perceber a diferença das soluções entre os gráficos para a solução analítica. Conforme aumenta o número de componentes de ondas, o valor mais alto da elevação da superfície livre analítica também aumenta, resultando uma diferença maior entre as normas. Por exemplo, a diferença entre as normas com 5 componentes de ondas se aproxima de 1,35%, a 17,44% para 20 componentes, 42,75% e 72,74% para 40 e 60 componentes de ondas, respectivamente.

Quanto à média dos erros MAE e RMSE, na Tab. 5.7 têm-se os menores valores para 20 e 40 componentes de ondas. Comparando a média absoluta do erro entre 20 e 40 componentes, a diferença entre os erros é pequena, sendo que para 40 componentes o erro é menor.

Ao analisar a diferença entre as normas, há uma diferença significativa entre o número de componentes de ondas, sendo os menores valores estão para 20 componentes.

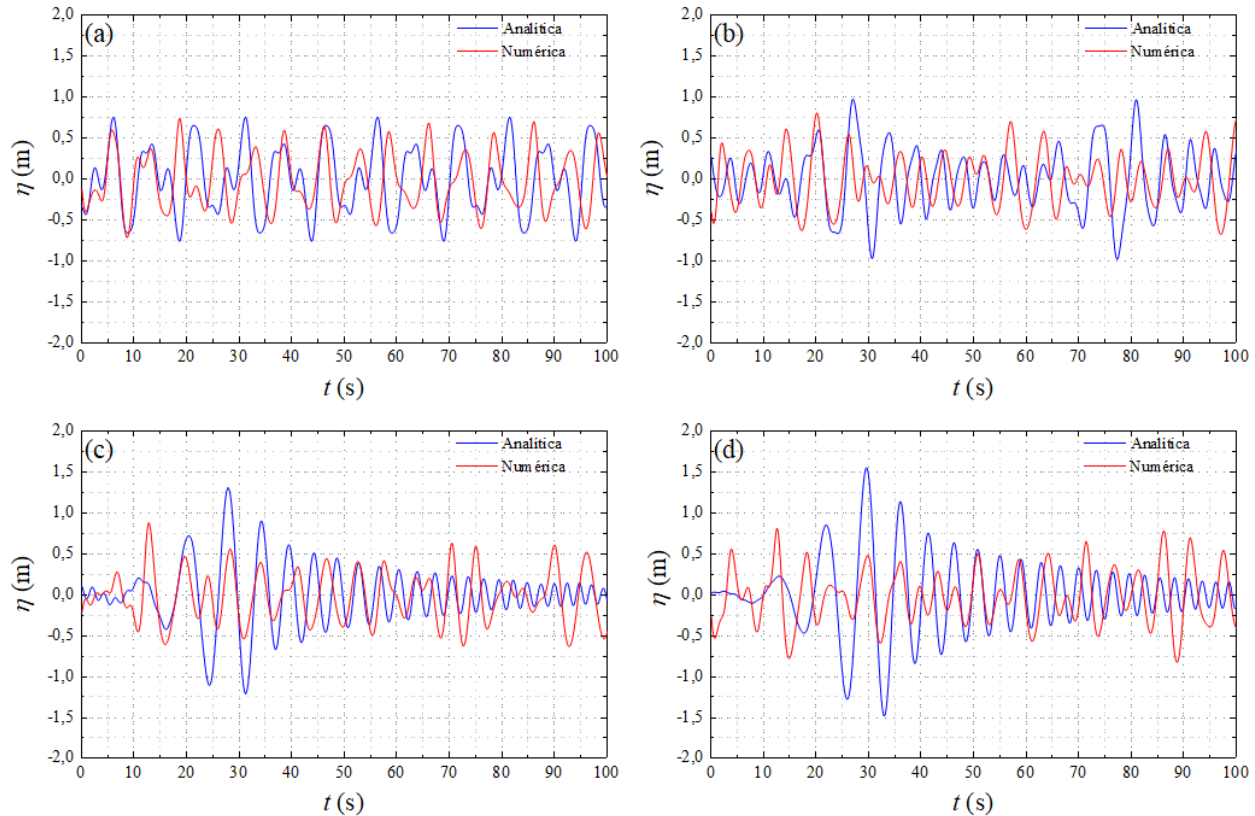


Figura 5.9 – Elevação da superfície livre para o número de componentes de ondas na sonda 3 em: (a) 5 ondas, (b) 20 ondas, (c) 40 ondas e (d) 60 ondas.

Nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 tem-se a densidade espectral para as sondas 1, 2 e 3, respectivamente. E para cada figura há quatro gráficos (a, b, c, d) o que corresponde à densidade espectral para 5, 20, 40 e 60 componentes de ondas.

Nestas três figuras é possível observar a diferença entre as densidades espectrais, analítica e numérica. Principalmente nas Fig. 5.10(a)-(d) que correspondem, respectivamente, a 5 e 60 componentes de ondas. Diferentemente para os resultados apresentados nas Fig. 5.10(b)-(c) para 20 e 40 componentes de ondas, em que a densidade espectral numérica se aproxima da densidade analítica. Em relação às oscilações do espectro numérico, quanto mais componentes de ondas, mais oscilações.

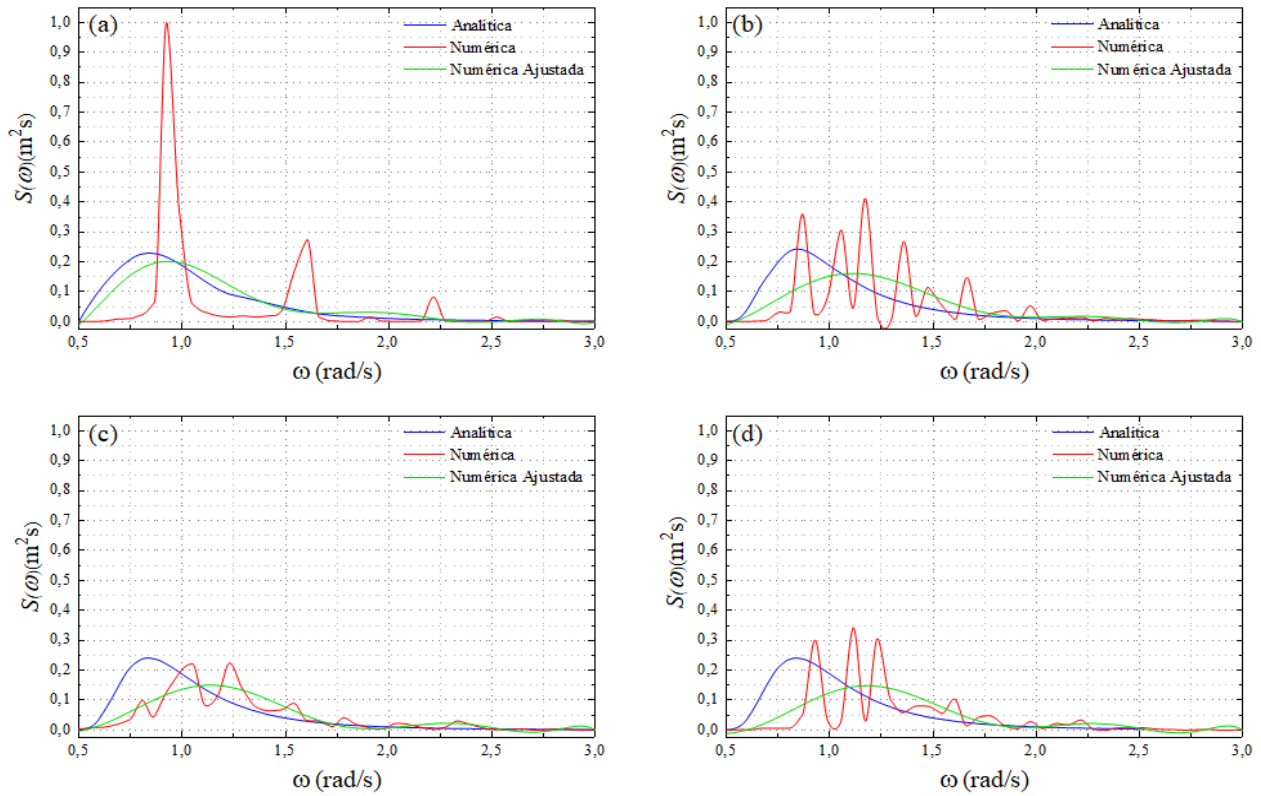


Figura 5.10 – Densidade espectral para o número de componentes de na sonda 1 em: (a) 5 ondas, (b) 20 ondas, (c) 40 ondas e (d) 60 ondas.

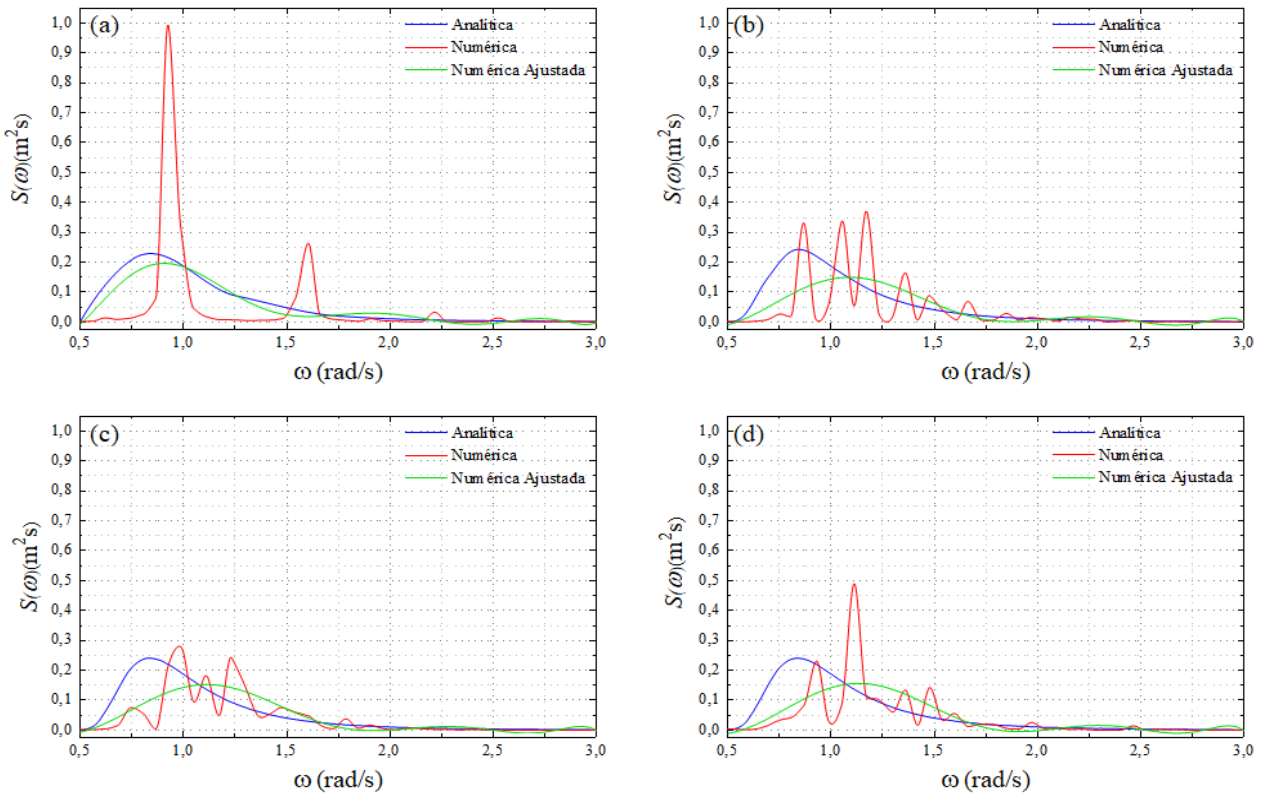


Figura 5.11 – Densidade espectral para o número de componentes de na sonda 2 em: (a) 5 ondas, (b) 20 ondas, (c) 40 ondas e (d) 60 ondas.

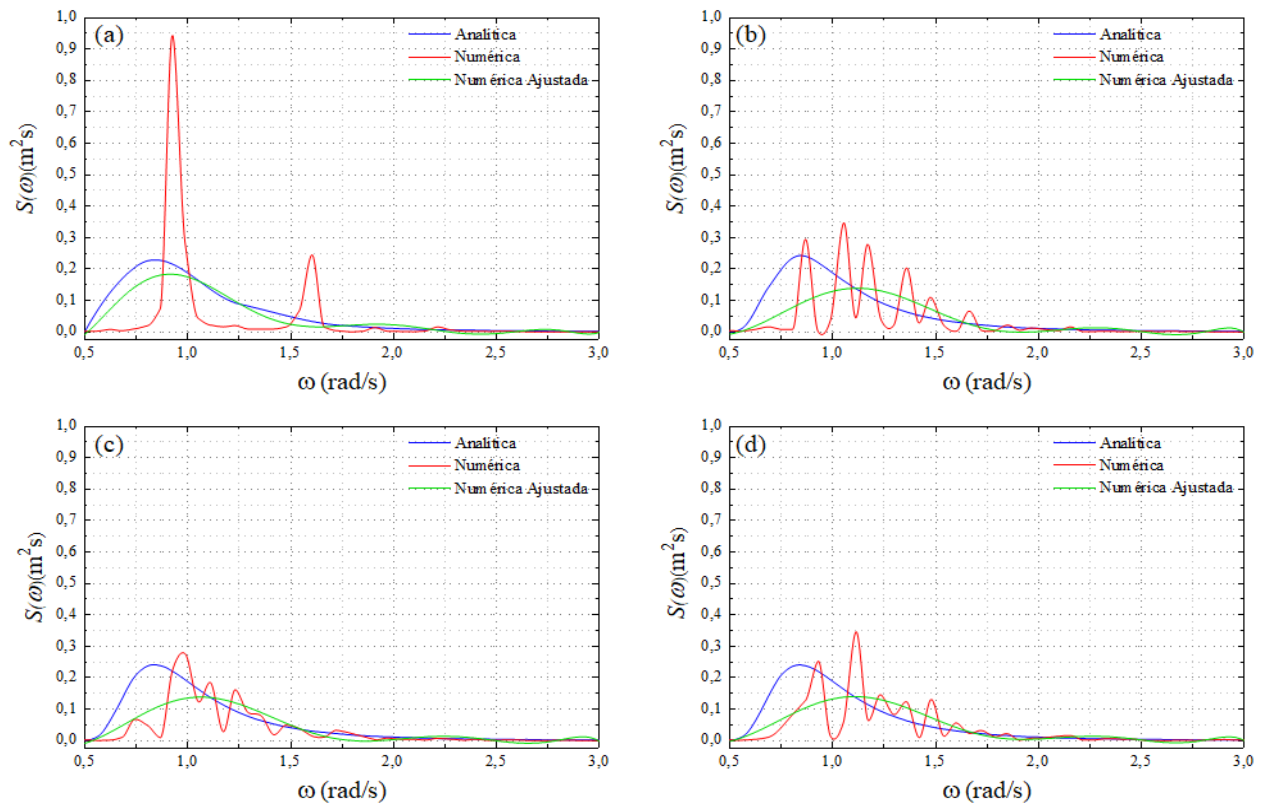


Figura 5.12 – Densidade espectral para o número de componentes de na sonda 3 em:
(a) 5 ondas, (b) 20 ondas, (c) 40 ondas e (d) 60 ondas.

5.4. Análise da influência da profundidade da superfície livre na geração da onda

Para todos os casos analisados a profundidade da superfície livre considerada foi de $h = 10$ m, e conforme apresentado na Tab. 5.8 foram testadas outras profundidades, a fim de avaliar o quanto a profundidade afeta a propagação da onda.

Tabela 5.8 – Testes relativos à profundidade da superfície livre.

Simulação	Profundidade (h)
29	20
30	30
31	50
32	100

Então, aplicando as Eqs. (5.1) - (5.3) às simulações indicadas na Tab. 5.8 foram obtidos os resultados apresentados na Tab. 5.9.

Tabela 5.9 – Análise quantitativa do erro relativo à profundidade da superfície livre.

Profundidade	Sonda	MAE	RMSE	$l_{ana} - l_{num}$
20	1	0,366674	0,451111	-0,033948
	2	0,347534	0,435006	0,024460
	3	0,326618	0,398339	0,039847
	4	0,281018	0,339457	0,103390
	5	0,299083	0,371241	0,529008
30	1	0,370399	0,456946	0,037251
	2	0,340813	0,426910	-0,066046
	3	0,340812	0,413047	0,041835
	4	0,306864	0,367892	-0,207177
	5	0,312080	0,375368	0,490752
50	1	0,371316	0,459367	0,044666
	2	0,337238	0,418990	-0,084222
	3	0,350044	0,425472	0,075546
	4	0,324792	0,388220	0,021901
	5	0,315146	0,378033	0,445610
100	1	0,371276	0,459467	0,050346
	2	0,332920	0,412081	-0,101917
	3	0,350300	0,426655	0,060498
	4	0,327683	0,390877	0,145866
	5	0,315644	0,375295	0,418203

Através dos resultados apresentados da Tab. 5.9, nota-se que as diferentes profundidades da superfície livre, indicam diferenças pequenas entre as médias e normas dos erros na mesma sonda.

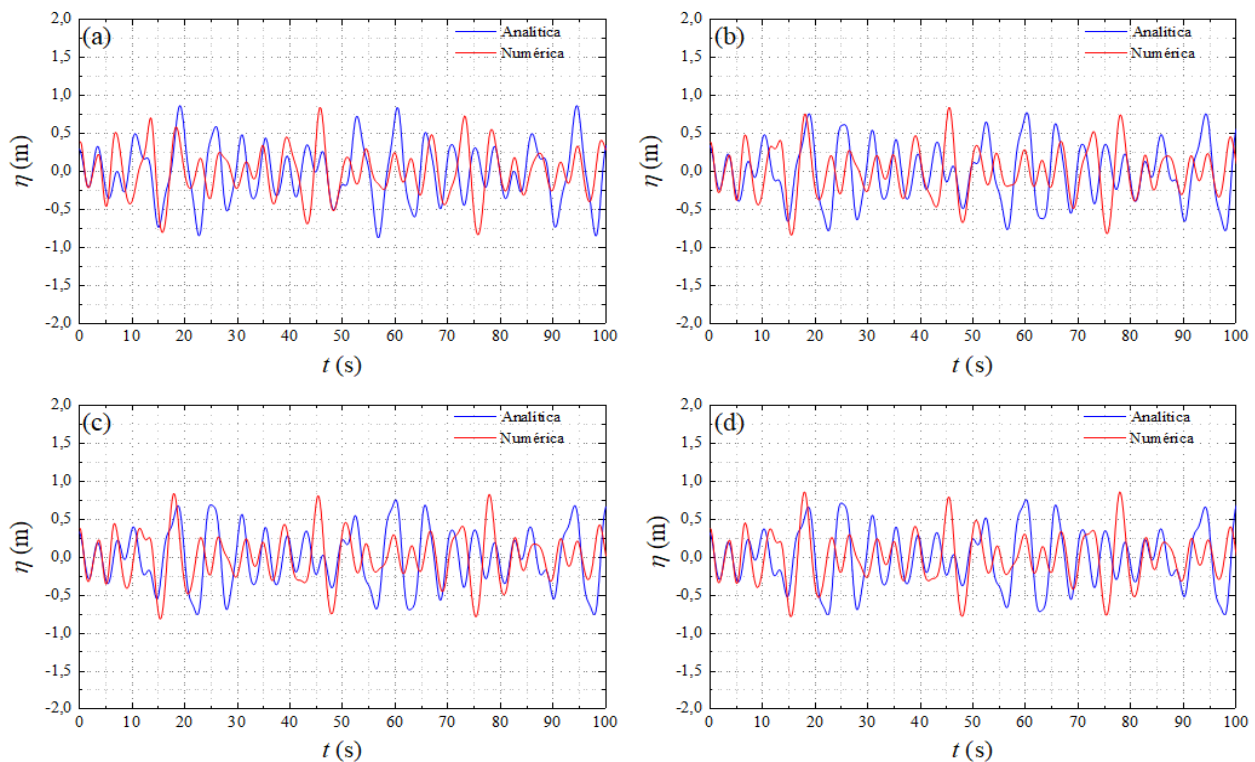


Figura 5.13 – Elevação da superfície livre entre as profundidades na sonda 2 em: (a) 20 m, (b) 30 m, (c) 50 m e (d) 100 m.

Na Figura 5.13 tem-se a comparação da elevação da superfície livre na sonda 2 para todas as profundidades da Tab. 5.8, durante 100 segundos. É possível notar um comportamento semelhante em todos os casos, existindo uma concordância entre as soluções analítica e numérica.

Outra observação é em relação aos pontos de maior elevação da superfície livre. Analisando a coluna da diferença entre as normas na Tab. 5.9, a diferença entre os picos são significativamente pequenas principalmente para as três primeiras sondas, que corresponde à região de propagação da onda, onde não há o amortecimento da onda.

Continuando a análise da Tab. 5.9 e comparando com os gráficos da Fig. 5.14(a)-(b), que correspondem à sonda 4 para 20 e 50 m de profundidade, respectivamente, a elevação da superfície livre numérica é relativamente pequena ao comparar com a analítica, o que resulta em uma diferença entre os picos um pouco maior, atingindo até 14,59% para uma profundidade de 100 m.

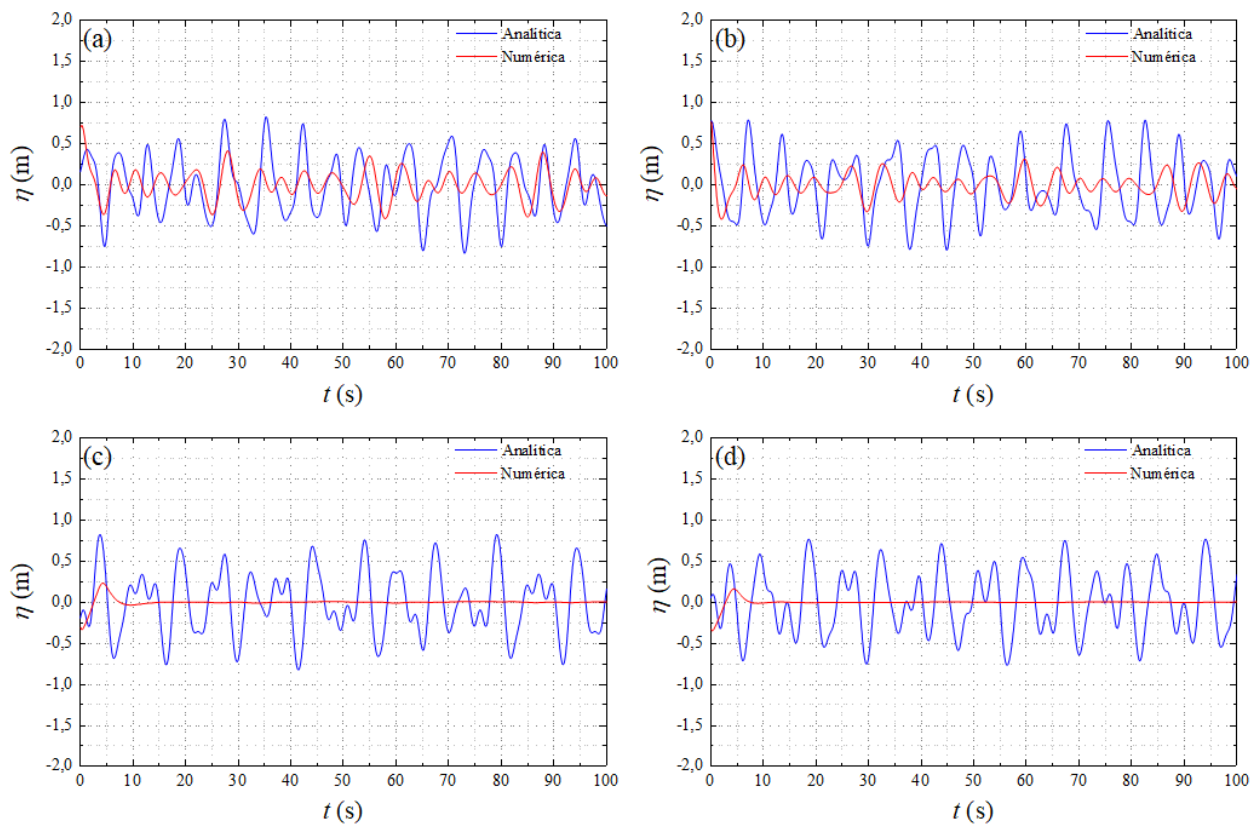


Figura 5.14 – Elevação da superfície livre entre as profundidades na: sonda 4 para (a) 20 m e (b) 50 m, sonda 5 para (c) 30 m e (d) 100 m.

Na Figura 5.14(c)-(d) tem-se a comparação entre a elevação da superfície livre analítica e numérica, que correspondem à profundidade de 30 e 100 m na sonda 5. A diferença entre as normas são maiores quando comparada com as demais diferenças da Tab. 5.9. Esta diferença se dá pelo fato

de estar usando a técnica da praia numérica, e como as sondas 4 e 5 estão localizadas na região da praia numérica, o amortecimento da onda numérica fica mais visível.

Com isso, mais para o fim do tanque a sonda de medição estiver localizada, menor é a amplitude da onda evitando a reflexão da onda numérica.

Para as Figs. 5.15 e 5.16, de forma qualitativa, são apresentados os gráficos comparativos das densidades espectrais para as sondas 2 e 3, respectivamente, com todas as diferentes profundidades simuladas, conforme a Tab. 5.8.

Analisando os gráficos da Fig. 5.15 é possível perceber que para todas as profundidades a densidade espectral se manteve constante, praticamente inalterável, apenas com uma leve alteração no ponto mais alto das oscilações, sendo esta diferença muito pequena e mantendo o mesmo aspecto espectral nos gráficos.

De uma maneira geral, a profundidade pouco influenciou a simulação, tanto em relação à elevação da superfície livre quanto em relação à densidade espectral.

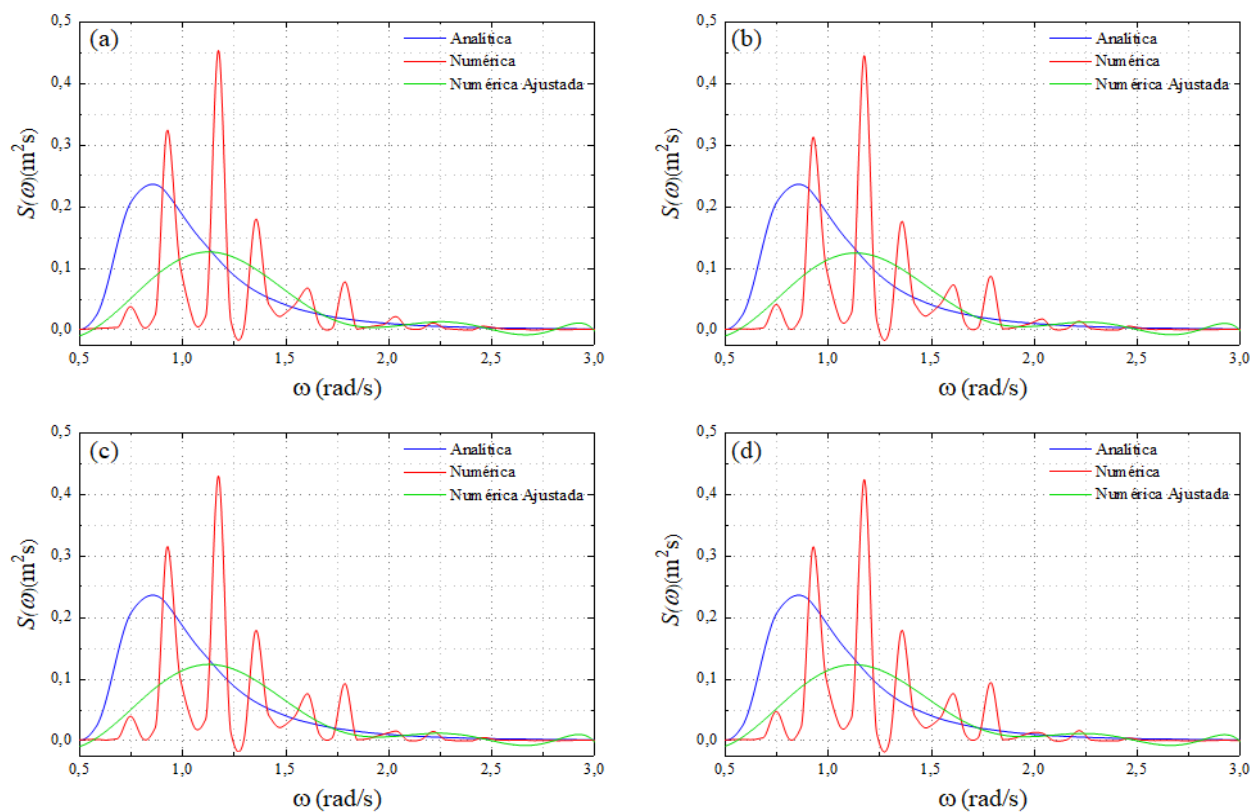


Figura 5.15 – Densidade espectral entre as profundidades na sonda 2 em:
(a) 20 m, (b) 30 m, (c) 50 m e (d) 100 m.

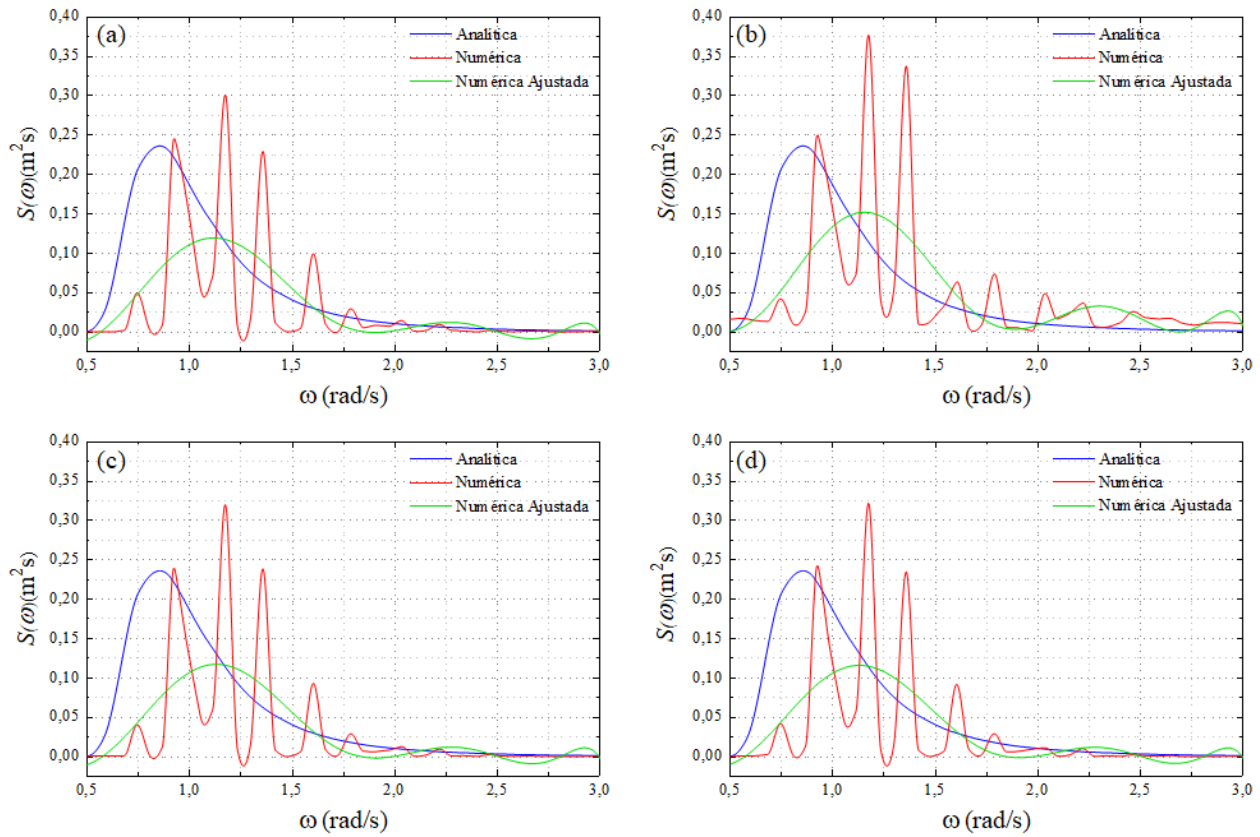


Figura 5.16 – Densidade espectral entre as profundidades na sonda 3 em:
(a) 20 m, (b) 30 m, (c) 50 m e (d) 100 m.

5.5. Análise do número de pontos na análise por Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform – FFT*)

Uma questão importante na análise de espectro de ondas é que para a montagem do espectro de ondas numérico é empregada a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform – FFT*). Em Elangovan e Sahoo (2010) e em Elangovan (2011) foram realizados estudos com a aplicação da FFT. Como dito anteriormente, a FFT é usada para montar a curva da densidade em função da frequência, uma troca de espaços, do campo da amplitude por tempo para o espaço de densidade por frequência.

Na análise da influência do número de pontos para a FFT não foram realizadas novas simulações, porém foram realizados outros pós-processamentos considerando, apenas, diferentes números de pontos para a FFT, sendo que foi utilizada a malha da simulação 29, do Capítulo 5.4, que corresponde à profundidade da superfície livre de 20 m (ver Tab. 5.8).

Com isso, para a montagem da densidade espectral numérica foram considerados 4 (quatro) valores para o número de pontos na análise FFT, conforme a Tab. 5.10.

Tabela 5.10 – Testes relativos ao número de pontos na análise por FFT.

Caso	Número de pontos
1	512
2	1024
3	2048
4	4096

Na Figura 5.18, como pode ser observado, foi obtida a comparação entre as soluções analítica e numérica da densidade espectral para a sonda 1. É observado que o número de pontos para a análise da FFT influencia significativamente na montagem do espectro de ondas numérico.

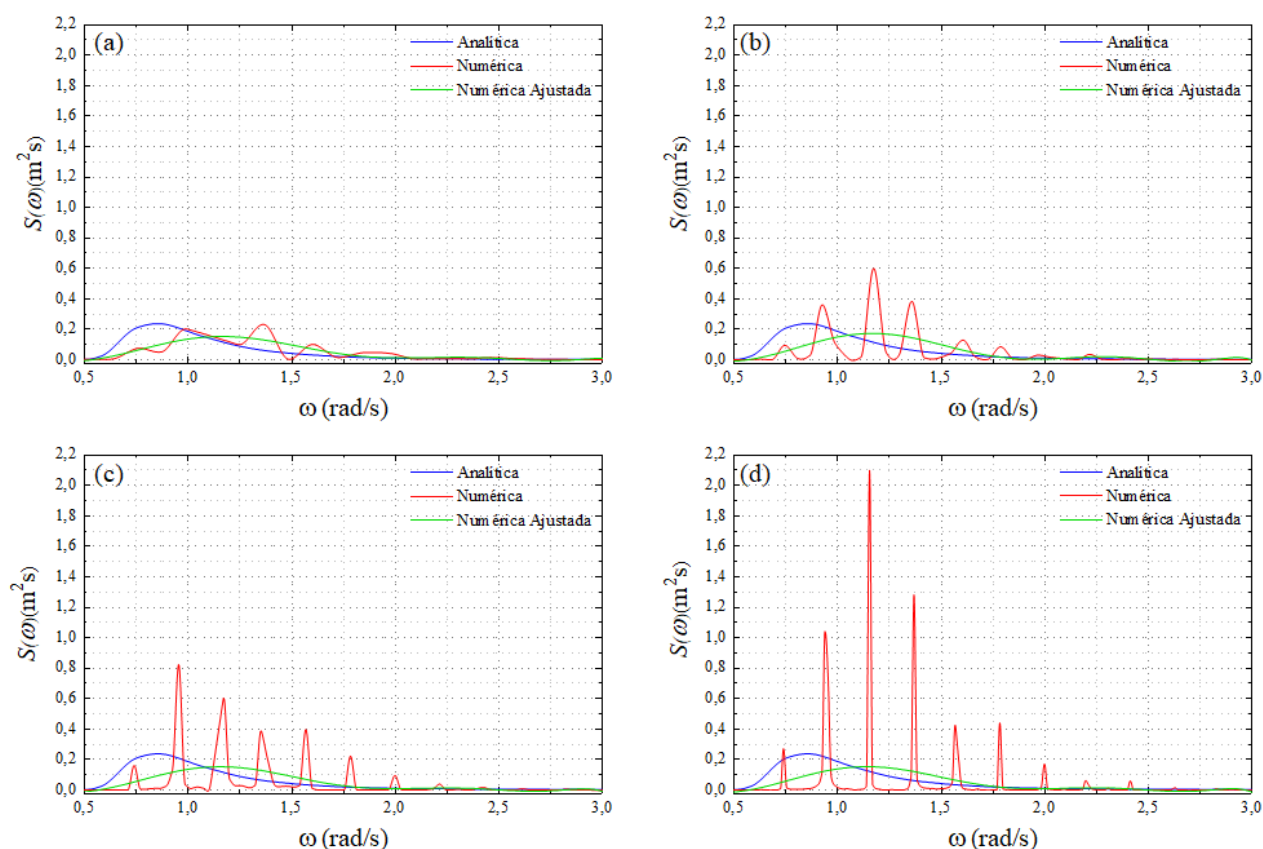


Figura 5.17 – Densidade espectral para a FFT na sonda 1 em:
(a) 512 pontos, (b) 1024 pontos, (c) 2048 pontos e (d) 4096 pontos.

Nas Figuras 5.17 a 5.19 é possível observar várias oscilações para a densidade espectral numérica, pois isso ocorre devido ao número de componentes de ondas, que é uma discretização do espectro real.

Analisando as Figuras 5.17, quanto maior o número de pontos considerados, maior o número de oscilações no espectro chegando a uma densidade espectral significativa.

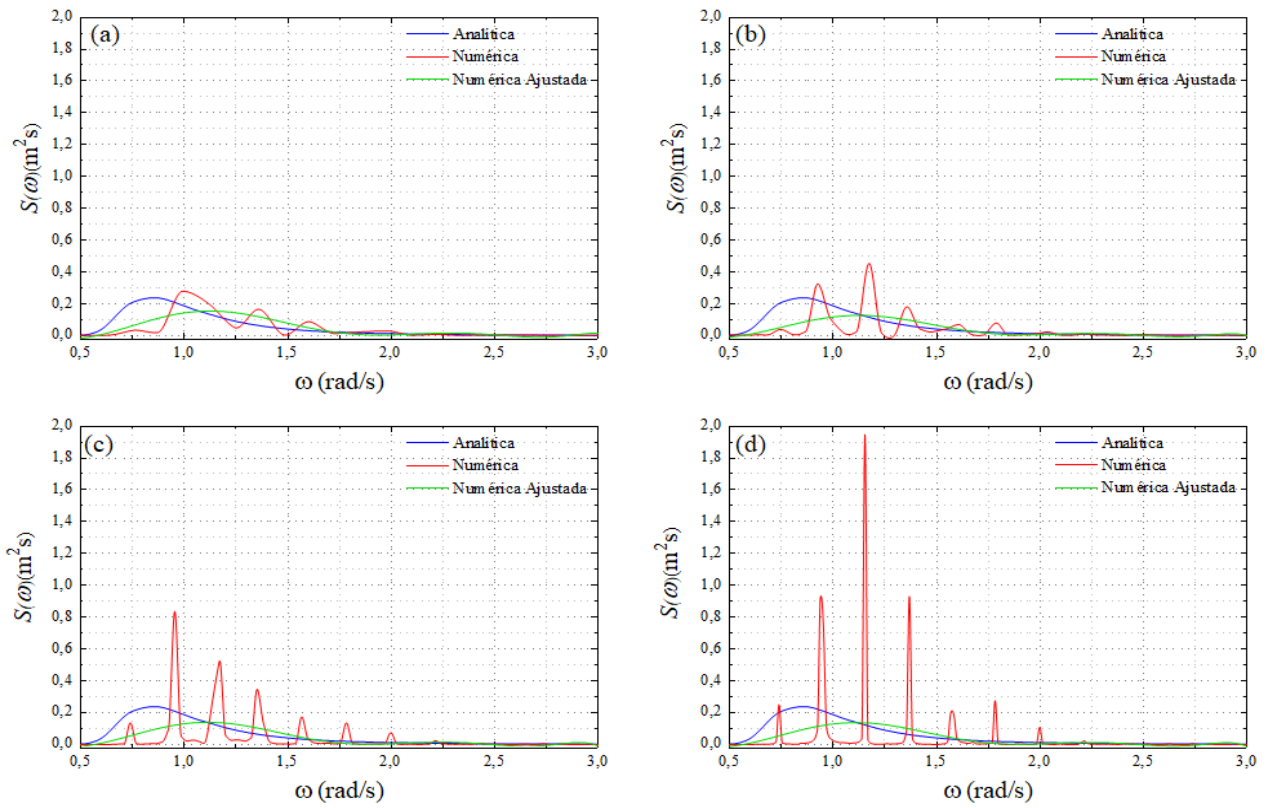


Figura 5.18 – Densidade espectral para a FFT na sonda 2 em:
(a) 512 pontos, (b) 1024 pontos, (c) 2048 pontos e (d) 4096 pontos.

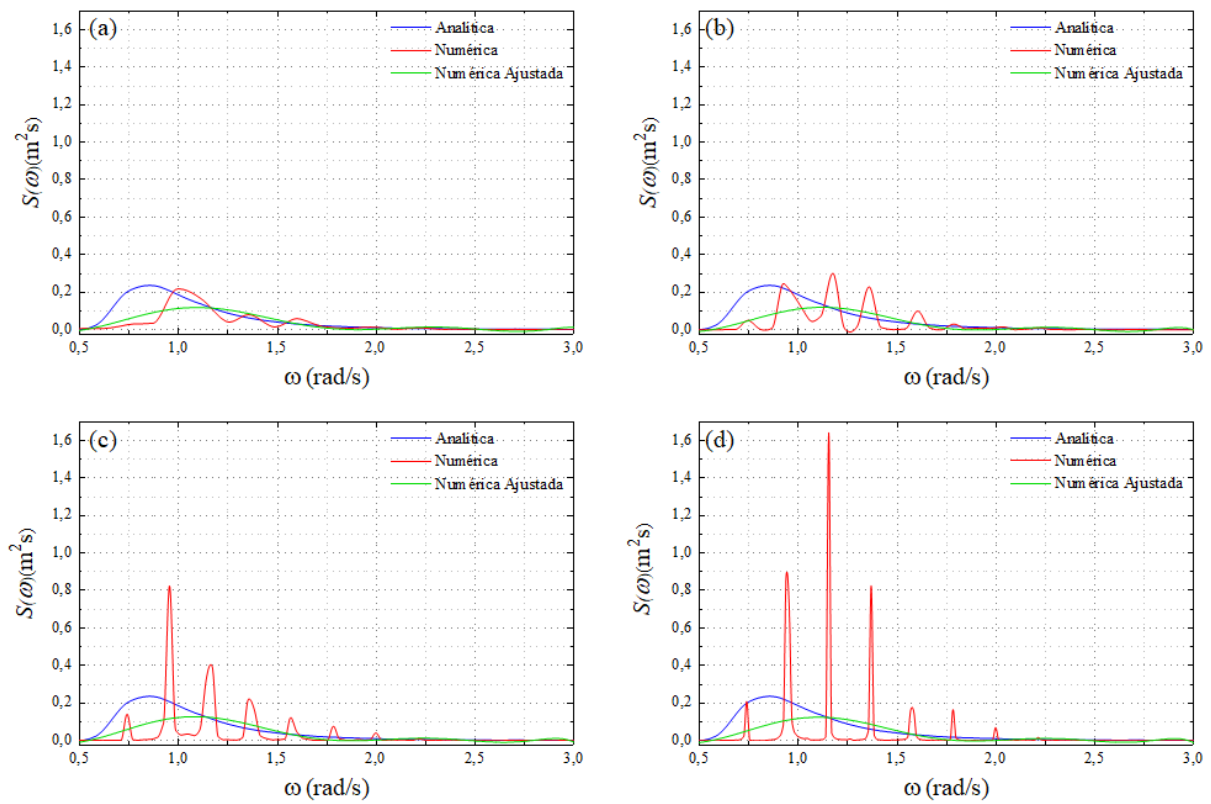


Figura 5.19 – Densidade espectral para a FFT na sonda 3 em:
(a) 512 pontos, (b) 1024 pontos, (c) 2048 pontos e (d) 4096 pontos.

Após o ajuste da curva numérica, a nova curva numérica (numérica ajustada, em verde) passou a ser representada por uma curva sem oscilações. O mesmo acontece para a Fig. 5.18 e para a Fig. 5.19.

Para cada uma destas figuras o que apenas difere entre os gráficos é o número de pontos na FFT, e a diferença espectral entre elas é significativa, uma discrepância em relação à densidade espectral analítica.

De uma forma geral, pode-se concluir que um melhor resultado pode ser alcançado com o número mínimo de pontos para a análise. Embora o espectro mostre muita diferença e pode ser melhorado por uma melhor análise FFT. Mas as ondas irregulares geradas numericamente apresentam concordância com a onda analítica.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas e discutidas análises da propagação de um espectro de ondas em um canal bidimensional com a técnica da praia numérica, uma metodologia disponível no software ANSYS FLUENT (v. 18.1), para a geração numérica de um espectro de ondas do tipo Pierson-Moskowitz. O domínio computacional considerado foi bidimensional e representado por um tanque de ondas numérico. O espectro de ondas de Pierson-Moskowitz, utilizado no presente estudo, leva em consideração algumas características como o período significativo da onda (T_S) igual a 7,5 s e altura significativa da onda (H_S) igual a 1,5 m. Ainda, foram realizadas comparações entre as soluções numérica e analítica para cinco sondas localizadas ao longo do tanque de ondas, considerando a técnica da praia numérica na região de amortecimento com o intuito de eliminar a reflexão da onda. Para a modelagem computacional foi utilizado o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF) que é aplicado para representar a interação entre a água e o ar, sendo que a solução numérica é obtida utilizando um código comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), FLUENT[®], baseado no Método de Volumes Finitos.

Com o objetivo de obter recomendações para a propagação de espectro de ondas em tanques foram realizados testes em relação: a) discretização espacial, b) discretização temporal, c) número de componentes de ondas do espectro, d) influência da profundidade de propagação e e) número de pontos na análise por FFT. O primeiro estudo foi relativo à discretização espacial, ou seja, em relação à geração da malha refinada em certas regiões de interesse, conhecida como malha *stretched*, que possibilita diminuir o esforço computacional nas simulações numéricas. Obtendo como recomendação a simulação três, que corresponde à malha 3. Com esta recomendação deu-se prosseguimento para o próximo tópico sobre a discretização temporal. Ao analisar a forma quantitativa, de maneira geral tratando de ondas irregulares, as médias e desvios são razoáveis e apresentaram bons resultados assim como as diferenças de picos principalmente no período mínimo, onde são menores em relação ao período de pico e máximo. Um dos resultados obtidos, de fato, conforme maior o número de volumes da malha maior o esforço computacional. Para as simulações com o menor número de volumes, malhas mais grosseiras, o tempo de simulação é de aproximadamente 3 h. Enquanto isto, para a simulação com o maior número de volumes, ou seja, uma malha mais refinada, o tempo de processamento foi aproximadamente 8 h.

Em seguida, foi apresentado e discutido um estudo sobre o avanço no tempo (*time-step*), ou discretização temporal. Foram realizadas 12 (doze) simulações com diferentes intervalos de avanço no tempo, relacionadas com o período de mínimo, de pico e de máximo, conforme a Tab. 5.3. Os resultados indicam que a discretização temporal mais adequada é $T_{min}/1000$, sendo esta a

recomendação para o avanço no tempo para as próximas etapas deste trabalho.

Outro estudo realizado foi em relação ao número de componentes de ondas considerado no espectro de ondas, onde foram realizadas outras quatro simulações com diferentes números de componentes de ondas, conforme a Tab. 5.5. Neste caso, o objetivo deste tópico não foi de obter a melhor recomendação, e sim, mostrar como o número de ondas influencia na geração da onda irregular e na densidade espectral, ficando claro que o número de componentes influencia significativamente.

O quarto item de estudo neste trabalho foi em relação à profundidade de propagação do espectro de ondas, onde foram testadas profundidades maiores, especificados na Tab. 5.7. Mesmo alterando a profundidade, os resultados quantitativos e qualitativos permaneceram semelhantes, ou seja, a profundidade pouco influenciou na elevação da superfície livre e na geração da densidade espectral. Sendo os valores quantitativos podem ser verificados na Tab. 5.8, onde é possível observar que a diferença entre os erros são muito pequenos quando analisados na mesma sonda para as várias profundidades. O mesmo acontece com a diferença entre as normas.

Por fim, um estudo sobre a influência da escolha da quantidade de pontos considerados para a análise para a Transformada Rápida de Fourier (FFT) foi realizado. Foram testados quatro valores para o número de pontos, conforme a Tab. 5.9, onde foi possível concluir que o número de pontos para a FFT influencia significativamente na geração da densidade espectral. Desta forma, os resultados indicam que menos pontos para a FFT, menores são as oscilações e com uma menor quantidade de oscilações. Ou seja, o número de pontos na FFT influencia significativamente na montagem da densidade espectral.

Os resultados obtidos indicam que esta técnica pode ser de fato empregada, representando assim um avanço na simulação numérica de estruturas oceânicas considerando ondas irregulares. Por tudo que foi analisado entende-se que este trabalho poderá contribuir para trabalhos futuros nessa área, principalmente no estudo numérico de dispositivos conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, pois com os resultados obtidos é possível simular computacionalmente em tanques de ondas considerando um modelo muito próximo do fenômeno real. Com isto, os resultados apresentados indicam que as recomendações estão fundamentadas nas características de mínimo do espectro.

O modelo ainda é necessário ser aperfeiçoado em trabalhos futuro em questões como:

- i) Considerar o regime turbulento; ii) Implementar um modelo de dispositivo do tipo CAO no tanque de ondas.

7. REFERÊNCIAS

- ANBARSOOZ, M.; FARD, M. P.; MOGHIMAN, M.; **Fully nonlinear viscous wave generation in numerical wave tanks**, 2013. Journal of Ocean Engineering, 73–85, Vol. 59.
- BARREIRO, T. G.; **Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia**. 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 87 p.
- BOO, S. Y.; **Linear and nonlinear irregular waves and forces in a numerical wave tank**, 2002. Journal of Ocean Engineering, 475–493, Vol. 29.
- BUYS, B.; **Laboratório de tecnologia oceânica: inovação nas ondas do mar. Inovação Uniemp**, Campinas, v.1, n.3, dez. 2005.
- CARNEIRO, M. L.; **Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaio de estruturas oceânicas**, 2007. Dissertação (Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 116 p.
- CEM; **Coastal Engineering Manual**, 2002. Army Corps of Engineers. Washington, Estados Unidos.
- CHAKRABARTI, S. K.; **Handbook of offshore engineering**, 2005. vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, 661 p.
- CHO, H. Y.; KWEON, H. M.; JEONG, W. M.; **A study on the equation of the continuous wave spectrum**, 2015. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 1056–1063, Vol. 7.
- COSTA, A. O.; SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O.; GOMES, M. N.; 2016. **Simulação numérica de um espectro de ondas do tipo Pierson - Moskowitz**. VII SEMENGO – *Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*. Rio Grande, p. 258-266.
- DEAN, R. G., DALRYMPLE, R.A.; **Water wave mechanics for engineers and scientists**, 1991. vol. 2, World Scientific, Singapura, 353 p.
- ELANGO VAN, M.; SAHOO, G.; **Generation of Irregular Wave for Marine Application by Plunger Type Wave Maker**, 2010. 11th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structure, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- ELANGO VAN, M.; **Simulation of irregular waves by CFD**, 2011. World Academy of Science, Engineering and Technology, V. 5, pp- 427-431.
- FINNEGAN, W.; GOGGINS, J.; **Linear irregular wave generation in a numerical wave tank**, 2015. Applied Ocean Research, 188–200, Vol. 52.
- FLUENT 6.3; **Documentation Manual**, 2006. Disponível em: <<http://www.fluent.com/software/fluent/index.htm>>.

FLUENT, 17.0; **Documentation Manual**, 2017. Disponível em:
<<http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>>.

GATIN, I.; VUKCEVIC, V.; JASAK, H.; **A framework for efficient irregular wave simulations using Higher Order Spectral method coupled with viscous two phase model**, 2017. Journal of Ocean Engineering and Science 2, 253–267.

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

GOMES, M. N.; SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O.; **Análise de malhas para geração numérica de ondas em tanques**, 2012. In: Proceedings VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2012. São Luiz, Brazil.

GOMES, M. N., SANTOS, E. D., ISOLDI, L. A., ROCHA, L. A. O.; **Two-dimensional geometric optimization of an oscillating water column converter of real scale**, 2013. In: Proceedings 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), Ribeirão Preto.

GOMES, M. N.; COSTA, C. A. O.; DEUS, M. J.; RICARDO, R. L. P.; ISOLDI, L. A.; SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O.; **Análise computacional e geométrica com design construtal de um dispositivo conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante submetido a um espectro de ondas**, 2016. In: Proceedings XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2016), Brasília, Brazil.

HIRT, C.W.; NICHOLS, B.D.; **Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries**, 1981. Journal of Computational Physics, vol. 39, n. 1, pp. 201-225.

KAMATH, A.; BIHS, H.; ARNTSE, O. A.; **Numerical investigations of the hydrodynamics of an oscillating water column device**, 2015. Journal of Ocean Engineering 102, 40–50.

KIM, M. W.; KOO, W.; HONG, S. Y.; **Numerical analysis of various artificial damping schemes in a three-dimensional numerical wave tank**, 2014. Journal of Ocean Engineering 75, 165–173.

KREYSZIG, E., KREYSZIG, H., NORMINTON, E. J.; **Advanced Engineering Mathematics**, 2011. 10^a ed., 1283 p..

LIANG, X. F.; YANG, J. M.; LI, J. ; XIAO, L.; LI, X.; **Numerical simulation of irregular Wave-Simulating Irregular wave train**, 2010. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 537–545, Vol. 22.

LISBOA, R.; C.; TEIXEIRA, P. R. F.; DIDIER, E.; **Simulação da propagação de ondas regulares e irregulares em um canal bidimensional com praia numérica**, 2016. VII SEMENGO – Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, Rio Grande, p. 258-266.

MALISKA, C. R.; **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**, 2004. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 453 p, 2004.

MCCORMICK, M. E.; **Ocean Engineering Wave Mechanics**, 1973. John Wiley & Sons, Nova York, 179 p.

OLIVEIRA, L. O.; **Otimização das dimensões da câmara hidropneumática de um equipamento de extração de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante utilizando a metodologia constructal design**, Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, 2012.

PARK, J. C.; UNO, Y.; SATO, T. ; MIYATA, H.; CHUN, H. H.; **Numerical reproduction of fully multi-directional waves by a viscous 3D numerical wave tank**, 2004. Journal of Ocean Engineering , 1549–1565, Vol. 31.

PRASAD, D. D.; AHMED, M. R.; LEE, Y. O.; SHARMA, R. N.; **Validation of a piston type wave-maker using Numerical Wave Tank**, 2017. Journal of Ocean Engineering , 57–67, Vol. 131.

RAMALHAIS, R. DOS S.; **Estudo numérico de um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO)**, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

REZANEJAD, K.; GUEDES S. C.; LÓPEZ I.; CARBALLO R.; **Experimental and numerical investigation of the hydrodynamic performance of an oscillating water column wave energy converter**, 2017 *Renewable energy*, vol. 106, pp. 1-16.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W.; **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**, 1999. Longman, Malásia, 257 p.

VYZIKAS, T.; DESHOULIÈRES, S.; GIROUX, O.; BARTON, M.; GREAVES, D.; **Numerical study of fixed oscillating water column with rans-type two-phase cfd model**, 2017. *Renewable energy*, vol. 102, part b, pp. 294-305.

WMO; **Guide to wave analysis and forecastin**, 1998. Livro World Meteorological Organization, Geneva- Switzerland, 2^o edição.

ZHANG, X. T.; KHOO, B. C.; LOU, J.; **Wave propagation in a fully nonlinear numerical wave tank: A desingularized method**, 2006. Journal of Ocean Engineering 33, 2310–2331.