

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA**

**ANÁLISE NUMÉRICA DO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR
DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR EM ENERGIA ELÉTRICA DO TIPO PLACA
SUBMERSA**

FLAVIO MEDEIROS SEIBT

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Liércio André Isoldi, Dr. Eng. Mecânica

Co-orientador: Paulo Roberto de Freitas Teixeira, Dr. Eng. Civil

Rio Grande, agosto de 2014.

Aprovação da Banca e do Coordenador.

(Esta página é elaborada pela Secretaria do Programa.)

Aos meus pais e aos meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Liércio André Isoldi por toda sua dedicação na orientação deste trabalho, desde a iniciação científica; pelos importantes ensinamentos e discussões ao longo de todo tempo que trabalhamos juntos. Agradeço, ainda, pela amizade e confiança, por todo apoio e incentivo que foram essenciais para a conclusão desta etapa.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira pelas importantes contribuições na co-orientação deste trabalho, pelos ensinamentos e esclarecimentos ao longo deste período. Agradeço, também, pela confiança desde a proposição do tema na iniciação científica.

Ao Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos pelas importantes discussões e contribuições no acompanhamento deste trabalho, bem como, pelos ensinamentos e auxílio constante na execução, até mesmo, das pequenas etapas. Agradeço, ainda, pela amizade, confiança e motivação ao longo de todo o trabalho, desde a graduação.

Ao Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha por toda confiança e oportunidades proporcionadas desde a iniciação científica para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Agradeço, também, as importantes contribuições e apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Eduardo Costa Couto pelas contribuições técnicas e experiências compartilhadas ao longo do período que pudemos trabalhar juntos. Agradeço, ainda, sua parceria e generosidade.

Ao Prof. Dr. Jeferson Avila Souza pelos importantes ensinamentos e discussões a respeito de modelagem numérica. Agradeço, também, pela amizade e todo o suporte de informática que, juntamente aos ensinamentos, proveu instrumentos e recursos valiosos para otimização da execução deste trabalho.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, com os quais convivi durante as disciplinas, por seus importantes ensinamentos.

A Coordenação e Secretaria do PPGeo pelo suporte e apoio financeiro necessários para a participação nos congressos científicos. Agradeço, ainda, à funcionária Nilza Rodrigues, ex-secretária do Programa, por sua atenção e dedicação no período em que convivemos.

Aos colegas e amigos: Max Letzow, Ruth Brum, Juliana Grimmmler, Matheus Gomes, Rafael Gonçalves, Michel Rodrigues, Marcelo Goulart, André Minasi, Daniel Helbig e Leandro Elpo, pelas parcerias e apoio em diversos momentos.

Aos meus pais, Eloi e Ana, meus irmãos, Ronaldo e Silvana, e a minha namorada, Tais, por todo carinho, incentivo e compreensão em todos os momentos. Agradeço também por serem minha base ao longo da caminhada.

A Deus, fonte da vida e de toda sabedoria, pela inspiração e capacidades que me movem.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação e conclusão deste trabalho.

RESUMO

A crescente demanda por produção de energia elétrica e a necessidade de preservação dos recursos naturais, tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de conversão de baixo impacto ambiental. O potencial energético dos oceanos está distribuído sob diferentes formas, das quais a energia das ondas se destaca por concentrar a maior parte deste recurso. O dispositivo de placa submersa consiste em uma placa horizontal, plana e imersa sob a superfície do mar. A passagem das ondas sobre essa estrutura origina um escoamento horizontal, sob a placa, que alterna constantemente de sentido. Esse escoamento pode ser aproveitado como propulsão para uma turbina hidráulica, fazendo com que o dispositivo atue como um conversor de energia das ondas do mar. Este estudo apresenta uma análise numérica do princípio de funcionamento deste equipamento, isto é, sem considerar a presença da turbina abaixo da placa. Para isso, foram realizadas avaliações da influência de parâmetros geométricos da placa submersa e características das ondas incidentes no dispositivo com relação a sua eficiência de conversão de energia. Para as simulações numéricas foi utilizado um domínio bidimensional que se baseia no modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF), para o tratamento da região de interface água-ar. O domínio computacional foi construído e discretizado (geração da malha) no *software* GAMBIT, enquanto a solução das equações que regem o problema foi realizada com o *software* FLUENT, que utiliza o Método de Volumes Finitos (MVF) para obtenção de um sistema algébrico de equações. As ondas foram geradas por uma condição de contorno de velocidade variável no tempo, impondo as componentes horizontal e vertical de velocidade das partículas de fluido, com base na teoria de ondas de Stokes de 2ª ordem. A análise do escoamento sob a placa submersa permitiu observar que as magnitudes da velocidade e da vazão mássica são maiores nos casos em que a placa tem menor comprimento e é posicionada próxima a superfície. Os resultados indicaram que dependendo das características do dispositivo (construtivas, de instalação e operacionais) é possível atingir uma eficiência em torno de 35 %.

Palavras-chave: Energia das ondas, Conversor de energia das ondas, Placa submersa, *Volume of Fluid* (VOF), Simulação numérica.

ABSTRACT

The growing demand for electric energy production and the need for conservation of natural resources has driven the development of conversion technologies with low environmental impact. The energy resource from oceans is distributed under different forms, among them wave energy stands out by concentrating most of this resource. The submerged plate is a horizontal, flat and submerged structure under the sea surface. The passage of the waves through this structure generates a horizontal flow beneath the plate, alternating constantly the flow direction. This flow can be used to drive a hydraulic turbine, so that the device acts as a wave energy converter. This study presents a numerical analysis of the operational principle of the equipment, i.e., without considering the presence of the turbine below the plate. To do so, studies of the influence of geometric parameters of the submerged plate and parameters of the incident waves on the device in relation to energy conversion efficiency are presented. For the numerical simulations were used a two-dimensional domain based on the Volume of Fluid (VOF) multiphase model for the treatment of air-water region interface. The numerical model was built and discretized in the GAMBIT software, while the solution of the governing equations of the problem were performed with the FLUENT software, which uses the Finite Volume Method (FVM) to obtain an algebraic system of equations. The waves were generated by a time-dependent boundary condition for the velocity, by imposing horizontal and vertical components for the fluid particles velocity, based on the wave theory Stokes 2nd order. The analysis of the flow below the submerged plate allowed the observation that the magnitude of velocity and mass flow rate are higher in cases where the plate has a smaller length and is positioned close to the surface. The results indicated that depending on the device characteristics (construction, installation and operation) it is possible to achieve an efficiency around 35 %.

Keywords: Wave energy, Wave energy converter, Submerged plate, Volume of Fluid (VOF), Numerical simulation.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	9
LISTA DE ABREVIATURAS	11
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE FIGURAS	13
1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 ESTADO DA ARTE	17
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	20
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	20
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 ENERGIA DAS ONDAS	23
2.1.1 <i>O recurso energético das ondas</i>	23
2.1.2 <i>Aspectos técnicos</i>	25
2.1.3 <i>Classificação dos dispositivos</i>	26
2.1.4 <i>Sistema de placa submersa</i>	28
2.2 TEORIA DE ONDAS.....	31
2.2.1 <i>Teoria de ondas linear</i>	34
2.2.2 <i>Teoria de ondas de Stokes de 2ª ordem</i>	36
2.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	38
2.3.1 <i>Método de Volumes Finitos</i>	39
2.3.2 <i>Método Volume of Fluid (VOF)</i>	42
3. MODELAGEM NUMÉRICA	45
3.1 MODELO MATEMÁTICO	45
3.1.1 <i>Modelo físico do escoamento</i>	45
3.1.2 <i>Modelo de geração da onda</i>	47
3.1.3 <i>Proposta de análise do dispositivo</i>	48
3.2 MODELO COMPUTACIONAL.....	49
3.2.1 <i>Geometria do domínio</i>	49
3.2.2 <i>Geração da malha</i>	50
3.2.3 <i>Condições de contorno</i>	52
3.2.4 <i>Parâmetros de simulação</i>	54
3.2.5 <i>Discretização temporal</i>	55
3.3 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	56
3.3.1 <i>Verificação do modelo</i>	57
3.3.2 <i>Validação do modelo</i>	59

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
4.1 PARÂMETROS ANALISADOS.....	61
4.1.1 <i>Velocidade u máxima</i>	61
4.1.2 <i>Vazão mássica RMS</i>	62
4.1.3 <i>Eficiência do dispositivo</i>	63
4.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ALTURA DA PLACA SUBMERSA	63
4.2.1 <i>Características simuladas</i>	63
4.2.2 <i>Comparativos</i>	65
4.2.3 <i>Estudo de Caso: X = 83,3 %</i>	68
4.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA PLACA	71
4.3.1 <i>Características simuladas</i>	72
4.3.2 <i>Comparativos</i>	73
4.4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO PERÍODO DA ONDA INCIDENTE.....	76
4.4.1 <i>Características simuladas</i>	76
4.4.2 <i>Comparativos</i>	80
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
5.1 CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS.....	91
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

LISTA DE SÍMBOLOS

A_L	– Altura livre sob a placa submersa	[m]
B	– Variável de comprimento qualquer	[m]
e_P	– Espessura da placa submersa	[m]
\vec{F}	– Forças externas	[N]
Fr	– Número de Froude	
g	– Aceleração da gravidade	[m/s ²]
H	– Altura de onda	[m]
h	– Profundidade	[m]
H_C	– Altura do canal de ondas	[m]
H_P	– Altura da placa submersa	[m]
I	– Tensor unitário	
J	– Variável de grandeza física qualquer	
k	– Número de onda	[m ⁻¹]
L	– Comprimento de onda	[m]
L_C	– Comprimento do canal de ondas	[m]
L_P	– Comprimento da placa submersa	[m]
m	– Massa	[kg]
\dot{m}	– Vazão mássica	[kg/s]
N_B	– Fator de escala de comprimento	
N_g	– Fator de escala de gravidade	
N_t	– Fator de escala de tempo	
N_V	– Fator de escala de velocidade	
P_P	– Potência média disponível sob a placa submersa	[W]
P_W	– Potência média da onda	[W]
p	– Pressão	[Pa]
T	– Período de onda	[m]
t	– Tempo	[s]
U_R	– Número de Ursell	
u	– Componente do vetor velocidade na direção x	[m/s]
u_x	– Velocidade da partícula na direção x	[m/s]

u_z	– Velocidade da partícula na direção z	[m/s]
V	– Variável de velocidade escalar qualquer	[m/s]
v	– Componente do vetor velocidade na direção y	[m/s]
\vec{v}	– Vetor velocidade	[m/s]
w	– Componente do vetor velocidade na direção z	[m/s]
X	– Altura relativa da placa submersa	[%]
Y	– Razão de abertura da altura livre sob a placa submersa	[%]
α	– Representa a célula computacional	
β	– Variável de ajuste da função de interpolação temporal	
η	– Elevação da superfície livre	[m]
θ	– Ângulo de fase	[rad]
μ	– Viscosidade dinâmica	[kg/ms]
$\bar{\xi}$	– Vorticidade	[s ⁻¹]
ρ	– Massa específica	[kg/m ³]
ϕ	– Potencial de velocidade	
φ	– Eficiência do conversor de placa submersa	[%]
ω	– Frequência de onda	[rad/s]

LISTA DE ABREVIATURAS

CFD	– Dinâmica dos Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
EDP	– Equação Diferencial Parcial
MVF	– Método de Volumes Finitos
NITA	– <i>Non-Iterative Time-Advancement</i>
PIB	– Produto Interno Bruto
PRESTO	– <i>Pressure Staggering Option</i>
RMS	– Média quadrática (<i>Root Mean Square</i>)
UDF	– Função definida pelo usuário (<i>User Defined Function</i>)
VOF	– <i>Volume of Fluid</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Estrutura do presente trabalho.....	21
Tabela 2.1 – Critérios de classificação das ondas quanto à profundidade (U. S. Army, 1973).	36
Tabela 2.2 – Tipos de formulações no tempo.	42
Tabela 3.1 – Parâmetros de simulação adotados.....	55
Tabela 3.2 – Comparação entre os resultados numérico e experimental da velocidade u (cm/s).	59
Tabela 4.1 – Características da onda incidente na placa para avaliação da altura H_p	64
Tabela 4.2 – Relação dos casos simulados na avaliação da altura da placa.....	64
Tabela 4.3 – Posicionamento dos pontos de monitoramento abaixo da placa (coordenadas z).	65
Tabela 4.4 – Relação dos casos simulados na avaliação da razão de abertura Y	69
Tabela 4.5 – Relação dos casos simulados na avaliação do comprimento da placa submersa. 72	
Tabela 4.6 – Posicionamento dos pontos de monitoramento abaixo do dispositivo (coordenadas z) para todos os casos de avaliação de L_p	73
Tabela 4.7 – Características das ondas simuladas e comprimento do canal associado.....	77
Tabela 4.8 – Relação das alturas relativas da placa estudadas.	78
Tabela 4.9 – Características reais equivalentes às ondas monocromáticas simuladas.....	79
Tabela 5.1 – Relação de trabalhos publicados em congressos.	92
Tabela 5.2 – Relação de trabalhos submetidos a periódicos.	92
Tabela 5.3 – Relação de trabalhos publicados em colaboração.	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Variação do PIB e variação do consumo de energia (1998 – 2007) (ANEEL, 2008).....	16
Figura 1.2 – Representação do dispositivo de placa submersa.	18
Figura 2.1 – Espectro qualitativo de energia das ondas (adaptado de Kinsman, 1965).....	24
Figura 2.2 – Distribuição global da energia média anual das ondas (Thorpe, 1999).....	25
Figura 2.3 – Classificação dos conversores quanto à posição em relação à costa (adaptado de Gomes, 2010).....	26
Figura 2.4 – Classificação dos conversores de energia das ondas quanto ao princípio de funcionamento (adaptado de Falcão, 2010).	27
Figura 2.5 – Ilustração dos princípios de funcionamento dos conversores de energia das ondas (adaptado de Callaway, 2007).....	28
Figura 2.6 – Representação do sistema de placa submersa.	29
Figura 2.7 – Representação do dispositivo de placa submersa.	30
Figura 2.8 – Principais características de uma onda (adaptado de Dean e Dalrymple, 1991).	32
Figura 2.9 – Comparação do perfil de onda de Stokes de 2ª ordem com o perfil linear (adaptado de U. S. Army, 1973).	33
Figura 2.10 – Aplicabilidade das teorias de ondas (adaptado de CEM, 2002).	33
Figura 2.11 – Volume elementar para os balanços de conservação.	40
Figura 2.12 – Possibilidades de avanço da solução no tempo.	42
Figura 2.13 – Exemplo de identificação da superfície livre a partir da variação da fração de volume (adaptado de De Brito, 2010).....	43
Figura 3.1 – Representação da geometria do domínio.	50
Figura 3.2 – Dimensões adotadas para a malha empregada no domínio computacional.	52
Figura 3.3 – Condições de contorno do canal simulado.	52
Figura 3.4 – Representação da interface pelo esquema de reconstrução geométrica.	54
Figura 3.5 – Comparação entre os perfis de elevação da onda analítico e numérico.....	57
Figura 3.6 – Comparação entre os perfis de velocidade analítico e numérico para u e w sob a superfície da onda.	58
Figura 4.1 – Distribuição dos monitores numéricos abaixo do conversor.	62
Figura 4.2 – Dimensões do domínio computacional para avaliação da altura H_p	64
Figura 4.3 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob o dispositivo para cada X estudado.	66
Figura 4.4 – Velocidades u_{max} sob o dispositivo nos pontos $p4$, $p6$ e $p8$ para cada X estudado.	66
Figura 4.5 – Média quadrática RMS da vazão mássica sob o dispositivo para cada X estudado.	67
Figura 4.6 – Eficiência do conversor de placa submersa para cada X estudado.	68
Figura 4.7 – Características do domínio computacional para avaliação do caso $X = 83,3 \%$	68
Figura 4.8 – Velocidades u_{max} sob o dispositivo no ponto $p6$ para cada Y do estudo de caso $X = 83,3 \%$	69

Figura 4.9 – Média quadrática RMS da vazão mássica sob o dispositivo para cada Y do estudo de caso $X = 83,3 \%$	70
Figura 4.10 – Eficiência do conversor de placa submersa para cada Y do estudo de caso $X = 83,3 \%$	71
Figura 4.11 – Dimensões do domínio computacional para avaliação do comprimento L_P	72
Figura 4.12 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob a placa submersa para cada L/L_P estudado.....	74
Figura 4.13 – Velocidades $u_{máx}$ sob a placa submersa nos pontos $p4$, $p6$ e $p8$ para cada L/L_P estudado.....	74
Figura 4.14 – Média quadrática RMS da vazão mássica sob a placa submersa para cada L/L_P estudado.....	75
Figura 4.15 – Eficiência do conversor de placa submersa para cada L/L_P estudado.....	76
Figura 4.16 – Características do domínio computacional considerado na avaliação do período da onda incidente.....	77
Figura 4.17 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob a placa submersa para $X = 88,3 \%$	80
Figura 4.18 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob a placa submersa para $X = 86,7 \%$	81
Figura 4.19 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob a placa submersa para $X = 85,0 \%$	81
Figura 4.20 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob a placa submersa para $X = 83,3 \%$	82
Figura 4.21 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob a placa submersa para $X = 80,0 \%$	83
Figura 4.22 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob a placa submersa para $X = 76,7 \%$	83
Figura 4.23 – Velocidades u_{max} sob a placa submersa no ponto central $p6$ para cada X e T estudado.....	84
Figura 4.24 – Média quadrática RMS da vazão mássica sob a placa submersa para cada X e T estudado.....	85
Figura 4.25 – Potência média da onda incidente em relação ao período.....	86
Figura 4.26 – Eficiência do conversor de placa submersa para cada X estudado.....	87

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios para o desenvolvimento tecnológico atualmente passa pelo equilíbrio entre a inovação e a sustentabilidade dos recursos utilizados para mantê-la.

Dos legados deixados pela Revolução Industrial, ocorrida entre o final do século XVIII e o início do século XIX, um dos principais, provavelmente, foi a profunda mudança no modo de vida do homem. As transformações ocorridas desde então vão muito além da substituição do esforço humano pela força das máquinas, elas permitiram que uma sociedade rural e manufatureira viesse a se tornar uma sociedade globalizada e altamente tecnológica (Krüger, 2003).

Entretanto, os avanços alcançados ao longo do último século se pautaram quase que inteiramente na energia proveniente de combustíveis fósseis. As implicações decorrentes do uso dessa fonte em larga escala tornaram-se conhecidas, particularmente, a partir da crise do petróleo ocorrida na década de 1970, que evidenciou as limitações da exploração desses recursos (não renováveis). Com isso, a energia deixou de ser vista como um recurso farto e inesgotável, passando a ser tratada sob a ótica de eficiência (Bulkin, 2003). Mais tarde, diversos estudos científicos passaram a alertar também a respeito das consequências ao meio ambiente, relacionadas às emissões de gás carbônico (CO₂), decorrentes do uso de combustíveis fósseis.

Assim, surgiram as primeiras iniciativas no sentido de diversificar as fontes usadas para produção de energia que, reforçadas pela perspectiva da sustentabilidade dos recursos, direcionaram as ações para o uso de fontes alternativas, preferencialmente as consideradas limpas e renováveis.

Atualmente, o consumo de energia está diretamente vinculado ao desenvolvimento econômico e à qualidade de vida de uma nação, pois reflete tanto o nível do setor industrial quanto o poder aquisitivo da população. Essa relação, apresentada na Figura 1.1, permite entender o sensível aumento da demanda energética mundial observado nos últimos anos. Nos países em desenvolvimento como o Brasil, cuja economia e produção industrial não são plenamente estabilizadas, esse aumento é mais pronunciado (ANEEL, 2008).

Diante do crescimento da demanda por energia, especialmente por energia elétrica, e da necessidade de implementação de tecnologias de produção de baixo impacto ambiental, diversos estudos tem sido realizados nas últimas décadas com vistas ao

desenvolvimento de técnicas para aproveitamento de energia a partir de fontes renováveis como, por exemplo, energia eólica, solar, geotérmica e dos oceanos (ANEEL, 2008). Destas, a dos oceanos tem se destacado como uma das mais promissoras devido ao seu grande potencial energético.

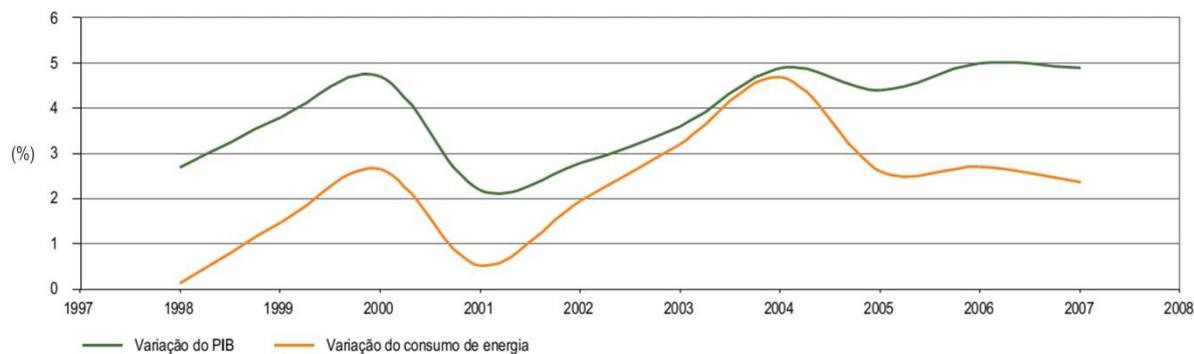


Figura 1.1 – Variação do PIB e variação do consumo de energia (1998 – 2007)
(ANEEL, 2008).

O potencial energético dos oceanos está distribuído sob diferentes formas, sendo as mais relevantes: a energia ondas, a energia das marés, a energia das correntes marítimas e a energia térmica dos oceanos. A energia das ondas tem recebido maior atenção devido a sua grande concentração de energia, expressa geralmente em potência por metro de frente de onda. Regiões com boas médias anuais, como a costa sul da América do Sul, apresentam valores entre 20 e 70 kW/m (Falcão, 2010). Em termos globais, estima-se que a energia das ondas proporcione uma potência em torno de 1 – 10 TW, valor comparável ao consumo médio anual de energia elétrica em todo o mundo (Vining e Muetze, 2009).

Diversas soluções têm surgido para o aproveitamento da energia das ondas, porém atualmente nenhuma delas ocupa uma posição consolidada do ponto de vista comercial. Devido às características do local de instalação serem muito particulares, é esperado que diferentes princípios de conversão de energia das ondas sejam utilizados no desenvolvimento dos conversores (Chozas e Soerensen, 2009).

No presente trabalho é apresentado um estudo numérico a partir da modelagem computacional do princípio de funcionamento do sistema de placa horizontal submersa. Este sistema é um tipo de estrutura utilizado em engenharia costeira, principalmente como quebra-mar, para fins de proteção costeira e pode, também, ser usada como conversor de energia das ondas (Graw, 1993a; Brossard et al., 2009). Sua utilização como conversor apresenta duas

características que se destacam: a primeira é a dupla funcionalidade da estrutura, uma vez que mesmo utilizado para conversão de energia não deixa de servir como quebra-mar, e a segunda é que existem poucos estudos sobre este tipo de dispositivo.

A análise numérica dos conversores de energia das ondas constitui uma importante ferramenta para um melhor conhecimento dos fenômenos fluidodinâmicos envolvidos, bem como, para a investigação de parâmetros operacionais e construtivos desses dispositivos, permitindo também estudos buscando sua otimização geométrica.

Para a realização das simulações numéricas foi utilizado o programa computacional FLUENT, que é um *software* baseado no Método de Volumes Finitos (MVF – Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 2007), que permite a modelagem de escoamentos de fluidos e de transferência de calor com as mais variadas geometrias (FLUENT, 2007). Já para a geração do domínio computacional, foi utilizado o programa GAMBIT que permite a construção e discretização de modelos computacionais para diversas aplicações científicas (GAMBIT, 2006).

O Método de Volumes Finitos é uma técnica matemática que permite obter uma versão discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP). Diferentemente de outros métodos, entretanto, ele fundamenta-se em uma abordagem física do problema representado pela EDP, sendo um método amplamente utilizado em aplicações de engenharia que envolvam dinâmica de fluidos; como, por exemplo: aerodinâmica, hidrodinâmica, interação fluido-estrutura e moldagem de polímeros.

O modelo computacional empregado neste estudo consistiu em um domínio bidimensional, representando um canal de ondas com a presença de uma placa horizontal submersa. Para representar a interação entre água e ar utilizou-se o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF – Hirt e Nichols, 1981), que permite representar de forma realística a interação entre fluidos imiscíveis.

1.1 ESTADO DA ARTE

O sistema de placa submersa foi estudado inicialmente como um quebra-mar visando a proteção costeira. Experimentos realizados por Dick e Brebner (1968) com blocos submersos sólidos e permeáveis, apresentaram a ocorrência de um padrão de circulação do escoamento ao redor desses blocos, dando origem aos estudos de uma placa submersa horizontal.

Mais tarde, experimentos de Graw (1992), apresentaram este equipamento como um eficiente filtro de ondas, sendo vantajoso em relação a outros quebra-mares submersos especialmente pelo escoamento que ocorre sob a placa. Este escoamento foi descrito como um fluxo pulsante, que apresenta maior intensidade no sentido contrário ao da propagação da onda, que ocorre durante a passagem da onda sobre a placa. Nesse mesmo trabalho, afirma-se que este escoamento é bastante estável, não sofrendo alterações significativas mesmo quando a região abaixo da placa é parcialmente obstruída.

A partir desta observação, Graw (1993a) concluiu que o sistema de placa submersa poderia ser usado como conversor de energia das ondas, bastando instalar abaixo da placa uma turbina hidráulica (Figura 1.2) para captar a energia do escoamento induzido pela passagem da onda. Esta é a primeira referência à placa submersa como um dispositivo que pode atuar como quebra-mar e conversor de energia das ondas.

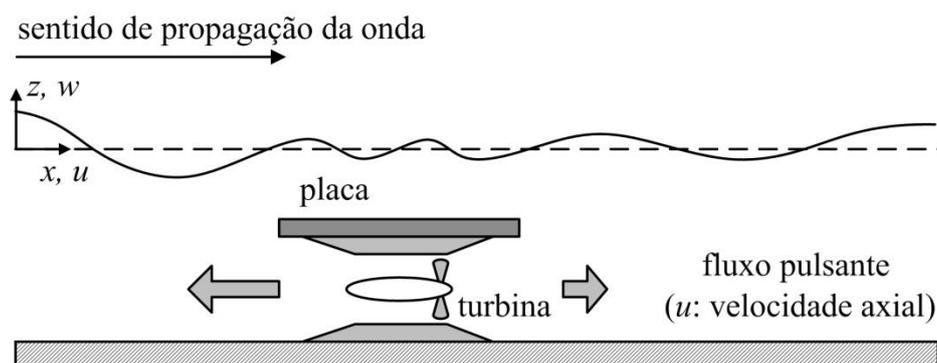


Figura 1.2 – Representação do dispositivo de placa submersa.

Em estudo subsequente, Graw (1993b) compilou os resultados de investigações teóricas e experimentais acerca do funcionamento da placa como quebra-mar com o objetivo de determinar os principais parâmetros a serem investigados na abordagem da placa como conversor. Com isso, foram evidenciadas as relações entre: o comprimento de onda e o comprimento da placa submersa (L/L_p – comprimento relativo da placa); a profundidade de submersão da placa e a profundidade do nível médio da água (H_p/h – altura relativa da placa). Esse estudo apresentou, ainda, avaliações da eficiência da placa submersa, revelando um melhor desempenho da mesma quando a área livre sob a placa é reduzida para 12 %, porém os resultados apontaram valores máximos em torno de 4 % (de eficiência).

Em Graw (1994) são apresentadas uma série de vantagens desse conversor que o diferenciam dos demais conversores de energia das ondas. Dentre estas, é destacada a menor incidência de corrosão devido ao fato deste conversor funcionar totalmente submerso,

uma vez que a maior parte dos conversores de energia das ondas são instalados na superfície, isto é, na região de interface da água com o ar facilitando a ocorrência desta reação e aumentando os custos de manutenção.

Com o avanço dos seus estudos a respeito do sistema de placa submersa como conversor de energia das ondas, o engenheiro e professor alemão Kai-Uwe Graw, da Universidade de Bergische (Wuppertal, Alemanha), obteve o reconhecimento de sua patente em 1995 (Graw, 1995a). Em outro trabalho (Graw, 1995b), apresentou um estudo sistemático a respeito do sistema de placa submersa no contexto dos conversores de energia das ondas.

Mesmo tendo-se no trabalho de Graw (1994) a apresentação da placa submersa como um dispositivo de duplo propósito, onde se enfatiza sua vocação como conversor de energia das ondas, a maior parte dos estudos a respeito do assunto são voltados para seu uso como quebra-mar (Hsu e Wu, 1999; Brossard e Chagdali, 2001; Hu et al., 2002; Hildebrandt e Schlurmann, 2008; Liu et al., 2009). Estes estudos, no entanto, são de grande importância para a melhor compreensão dos fenômenos relacionados ao escoamento em torno da placa submersa.

No estudo de Carter (2005), o sistema de placa horizontal submersa é abordado como conversor de energia das ondas e estudado a partir de um modelo numérico bidimensional, empregando o Método de Elementos de Contorno e a teoria linear de ondas para um escoamento potencial. Ao apresentar o campo de velocidades sob a placa, obtido por este modelo, contribui para o entendimento do escoamento pulsante que se desenvolve sob a mesma em decorrência da passagem das ondas. Os resultados evidenciaram, contudo, que este escoamento é alternante, contrariando afirmações de Graw (1993a), e, assim, indicando a necessidade de uma turbina hidráulica que mantenha o sentido de rotação independente do sentido do escoamento.

Orer e Ozdamar (2007) apresentam resultados experimentais de avaliação da eficiência do dispositivo como conversor de energia das ondas. Nesse estudo os autores analisaram o comportamento da velocidade do escoamento sob a placa quando o dispositivo, em uma altura fixa, é sujeito a diferentes características de ondas incidindo sobre ele e incluíram ainda diferentes níveis de restrição abaixo da placa com formatos retangulares e triangulares. Em seus resultados, comprovam o melhor desempenho da placa submersa quando a área sob a placa é reduzida (conforme Graw, 1993b), porém, indicam a possibilidade de uma eficiência em torno de 60 % para o dispositivo, contrapondo-se as conclusões de Graw (1993b; 1995b) que havia predito uma eficiência de apenas 4 %. Além disso, propõem a necessidade de uma turbina que mantenha o sentido de rotação independente

do sentido do escoamento sob a placa, uma vez que, mesmo ocorrendo pulsos de maior magnitude no sentido contrário ao de propagação das ondas, o escoamento apresenta alternância de sentido.

Em outro estudo recente (Seibt, 2011), é apresentado um modelo numérico bidimensional para o dispositivo de placa submersa baseado no MVF e no modelo multifásico VOF. Esse modelo foi validado com base nos resultados experimentais de Orer e Ozdamar (2007), a partir da reprodução de um caso em que não há restrições ao escoamento sob a placa. Nesse estudo são apresentados perfis de velocidade do escoamento sob a placa para características fixas da onda incidente em três diferentes profundidades relativas da placa, mostrando uma relação entre a profundidade relativa da placa e a magnitude da velocidade do escoamento sob a mesma.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Caracterização do funcionamento e avaliação numérica de parâmetros operacionais (altura relativa, comprimento relativo e período da onda incidente) do conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo placa submersa, empregando modelo bidimensional análogo ao utilizado em Seibt (2011).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Elaboração de revisão bibliográfica e estado da arte a respeito do dispositivo de placa submersa;
- Verificação e validação do modelo computacional empregado;
- Obtenção de dados de caracterização do funcionamento do conversor por simulação numérica: vazão mássica, velocidade axial máxima e perfis de velocidade do escoamento sob a placa submersa;
- Avaliação da influência da variação da altura da placa em relação ao fundo na eficiência do conversor tipo placa submersa;
- Avaliação da influência da variação do comprimento da placa na eficiência do conversor tipo placa submersa;

- Avaliação da influência da variação do período da onda incidente na eficiência do conversor tipo placa submersa.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para a realização do estudo proposto, este trabalho foi estruturado em cinco capítulos descritos na Tabela 1.1, dos quais os três primeiros estão relacionados à fundamentação teórica e formulação do problema e os dois últimos ao desenvolvimento das simulações numéricas e considerações acerca dos resultados.

No capítulo 1 é apresentado o tema, a proposta de estudo, o estado da arte a respeito do sistema de placa submersa e os objetivos do trabalho. No capítulo 2, tem-se uma revisão bibliográfica a respeito de energia das ondas e dos principais dispositivos, destacando o conversor tipo placa submersa. Serão apresentados ainda, os conceitos de teoria das ondas e a metodologia necessária para a utilização da modelagem computacional.

Em seguida, no capítulo 3, é apresentada a descrição do problema estudado. No capítulo 4, encontram-se os resultados e a discussão dos mesmos. Por fim, no capítulo 5, têm-se as conclusões e propostas para trabalhos futuros relacionados a esse dispositivo.

Tabela 1.1 – Estrutura do presente trabalho.

Capítulo	Conteúdo
1	Introdução
2	Revisão Bibliográfica
3	Modelagem Numérica
4	Resultados e Discussão
5	Considerações Finais

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão acerca dos principais temas relacionados ao desenvolvimento do presente trabalho. Inicialmente, é apresentada uma descrição do recurso energético das ondas do mar, juntamente com os conceitos básicos de aproveitamento dessa fonte, destacando-se o sistema de placa submersa e a caracterização do seu princípio de funcionamento.

Em seguida, são apresentados os fundamentos da teoria de ondas oceânicas, descrevendo suas características básicas e equações elementares, incluindo a teoria de Stokes de segunda ordem utilizada neste estudo. Por fim, faz-se uma breve descrição do uso da modelagem computacional para simulação de problemas de dinâmica dos fluidos, com especial atenção ao Método de Volumes Finitos e ao método de representação da interação água-ar *Volume of Fluid* (VOF).

2.1 ENERGIA DAS ONDAS

Segundo Falcão (2010), a crise do petróleo em 1973 desencadeou mudanças significativas no cenário das energias renováveis, dentre elas o interesse na exploração em larga escala da energia das ondas do mar. Ainda segundo o mesmo autor, um artigo publicado em 1974 na revista *Nature*, por Stephen Salter, da Universidade de Edimburgo, “*tornou-se uma referência e chamou a atenção da comunidade científica internacional*” para este assunto que até então era incipiente.

2.1.1 O recurso energético das ondas

O recurso energético dos oceanos encontra-se distribuído sob diferentes formas, sendo as mais relevantes: a energia das marés, a energia térmica dos oceanos, a energia das correntes marítimas e a energia das ondas. Destas, a energia das ondas é a que mais se destaca, devido a sua grande concentração de energia (Cruz e Sarmiento, 2004). Também por esta razão, tem conquistado grande importância, nas últimas décadas, em todo o mundo; sendo considerada um dos recursos renováveis mais promissores (Falcão, 2010).

A energia das ondas do mar pode ser considerada uma forma concentrada de energia solar, uma vez que as ondas são geradas pela ação dos ventos sobre a superfície dos

oceanos e estes decorrem do aquecimento desigual das massas de ar em contato com a terra e o mar. Quando se aborda o tema energia das ondas, os interesses concentram-se nas ondas de superfície ou ondas de gravidade, que são geradas pela interação entre o vento e a superfície do mar, porque estas apresentam maior nível energético conforme pode ser observado na Figura 2.1 (McCormick, 1981).

A quantidade de energia transportada pelas ondas depende essencialmente de sua altura e período, os quais são determinados pelas características dos ventos na região de geração (*fetch* – McCormick, 1981). Uma vez geradas, estas podem se deslocar em alto mar por milhares de quilômetros quase sem perdas de energia (Cruz e Sarmiento, 2004).

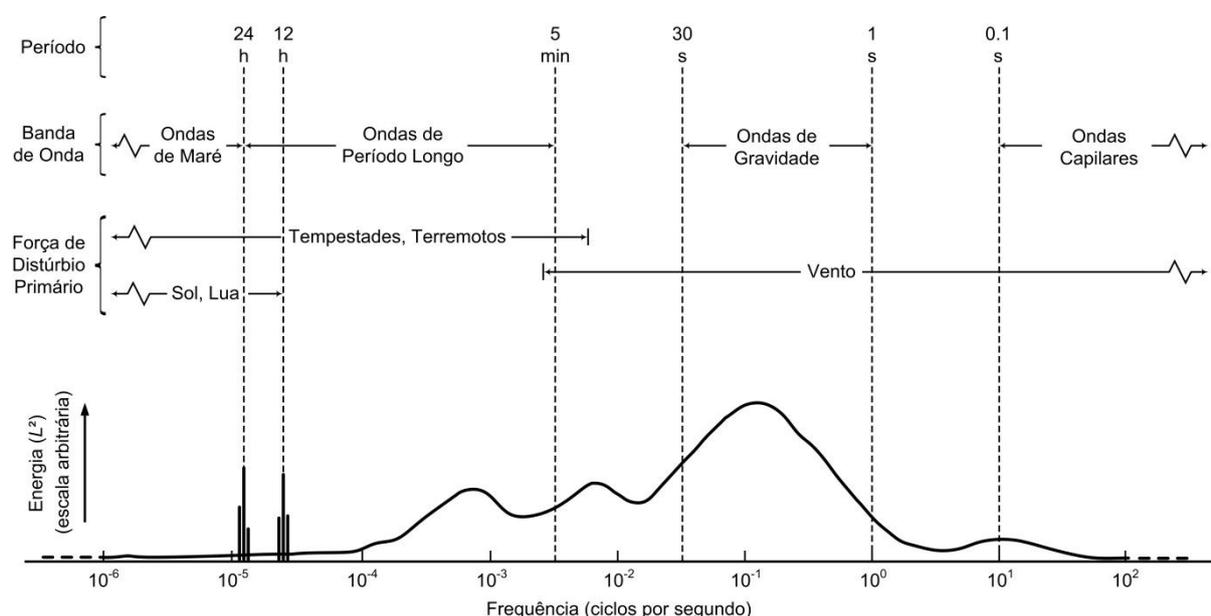


Figura 2.1 – Espectro qualitativo de energia das ondas (adaptado de Kinsman, 1965).

Uma vez que o poder energético das ondas é influenciado pela incidência dos ventos, faz-se necessário o conhecimento prévio das características das ondas que ocorrem na região onde se pretende a instalação de um desses equipamentos conversores. A energia das ondas é expressa, geralmente, em potência por metro de frente de onda; sendo assim, regiões com boas médias anuais, como a costa sul da América do Sul, apresentam valores de potência entre 20 e 70 kW/m (Figura 2.2) (Falcão, 2010).

Estima-se que o recurso energético das ondas seja da ordem de 8.000 – 80.000 TWh/ano (1 – 10 TW) no oceano inteiro, valor comparável ao consumo médio anual de energia elétrica em todo o mundo. Além disso, é esperado que a energia das ondas

proporcione de 15 – 20 vezes mais energia por metro quadrado que a energia eólica ou solar (Vining e Muetze, 2009).

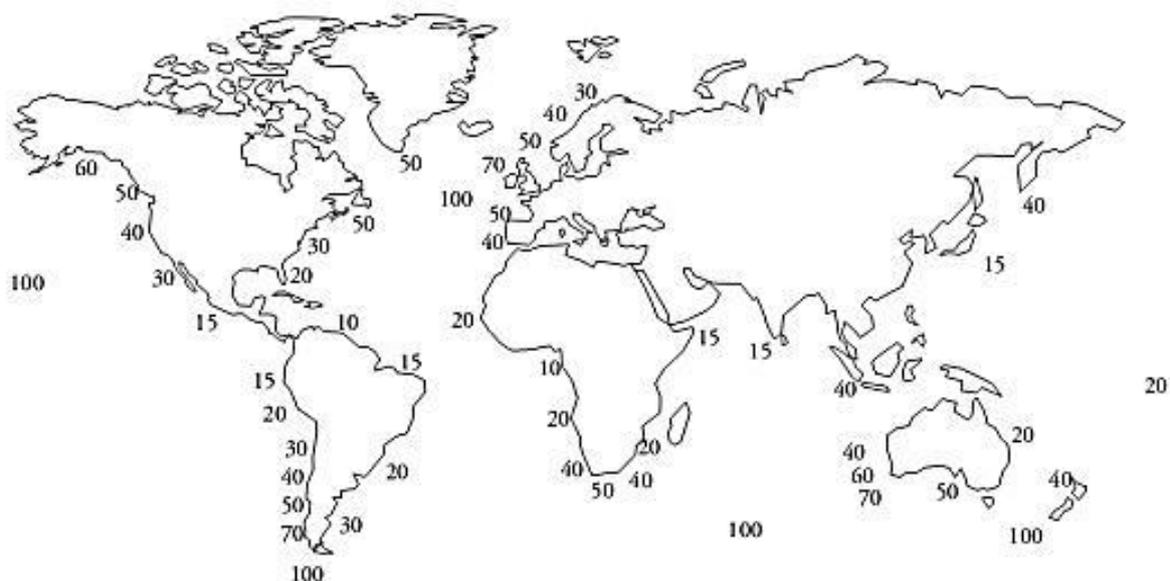


Figura 2.2 – Distribuição global da energia média anual das ondas (Thorpe, 1999).

2.1.2 Aspectos técnicos

O aproveitamento da energia das ondas envolve processos hidrodinâmicos consideravelmente complexos do ponto de vista da sua formulação teórica, tanto pelos fenômenos decorrentes da interação entre a água e o equipamento, como difração e radiação de ondas, como pela própria natureza aleatória do fenômeno de geração das ondas. Por esta razão, a concepção e o desenvolvimento de equipamentos capazes de converter essa energia é uma tarefa bastante complexa (Falcão, 2010).

Diversas soluções têm surgido para o aproveitamento da energia das ondas, porém, atualmente, nenhuma delas ocupa uma posição consolidada do ponto de vista comercial. Devido às características do local de instalação serem muito particulares, é esperado que diferentes princípios de conversão de energia das ondas sejam utilizados no desenvolvimento dos conversores (Chozas e Soerensen, 2009).

Uma etapa importante no desenvolvimento de sistemas de conversão de energia das ondas é a realização de experimentos, geralmente realizados com um modelo em escala. Um modelo em escala pode representar tanto uma parte do equipamento como o

equipamento inteiro e permite a avaliação de características específicas do seu funcionamento real desde que suas dimensões sejam definidas por um fator de escala (McCormick, 1981).

No caso de modelos para estudo de escoamento de fluidos esta escala é determinada por um critério de similaridade, o qual consiste em um fator de escala que permite estabelecer uma relação entre aspectos fluidodinâmicos do modelo e aspectos reais do escoamento. O uso de um critério de similaridade, no entanto, não altera o fato de que os modelos (numérico ou de laboratório) são construídos com base em simplificações do caso real. Um dos critérios mais utilizados em modelos de estudo de engenharia costeira é o Número de Froude que estabelece uma relação entre as forças de inércia e as forças de gravidade (Hughes, 1993).

2.1.3 Classificação dos dispositivos

Diferentes critérios são utilizados para classificar os conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, os mais usuais são a localização com relação à costa e o tipo de princípio de funcionamento do conversor.

O primeiro critério pode ser ilustrado conforme Figura 2.3.

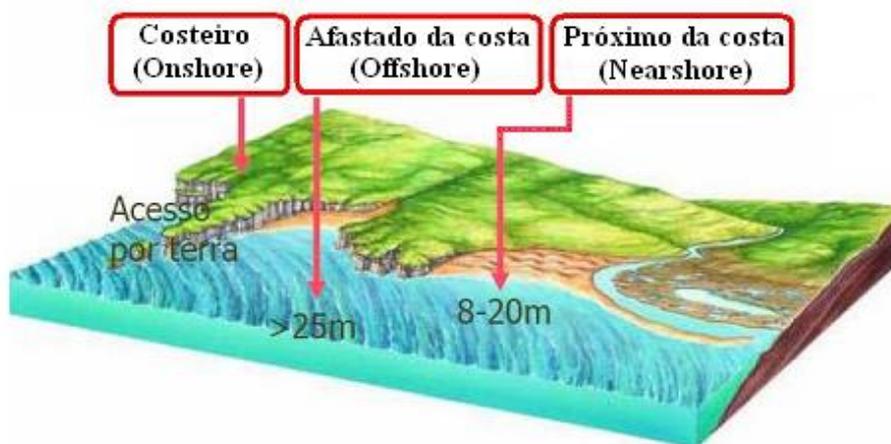


Figura 2.3 – Classificação dos conversores quanto à posição em relação à costa (adaptado de Gomes, 2010).

Esse critério (Figura 2.3) permite classificar os equipamentos como (Cruz e Sarmento, 2004):

- costeiros (*shoreline* ou *onshore*) – situados em região com profundidades de até 20 m, são geralmente presos ao fundo;

- próximos da costa (*near-shore*) – situados em região com profundidades entre 20 e 50 m, podem ser presos ao fundo ou flutuantes;
- ou afastados da costa (*offshore*) – situados em região com profundidades maiores que 50 m, são geralmente flutuantes.

Já o segundo critério, agrupa os conversores pelo seu princípio de funcionamento, conforme Figura 2.4 (Falcão, 2010).

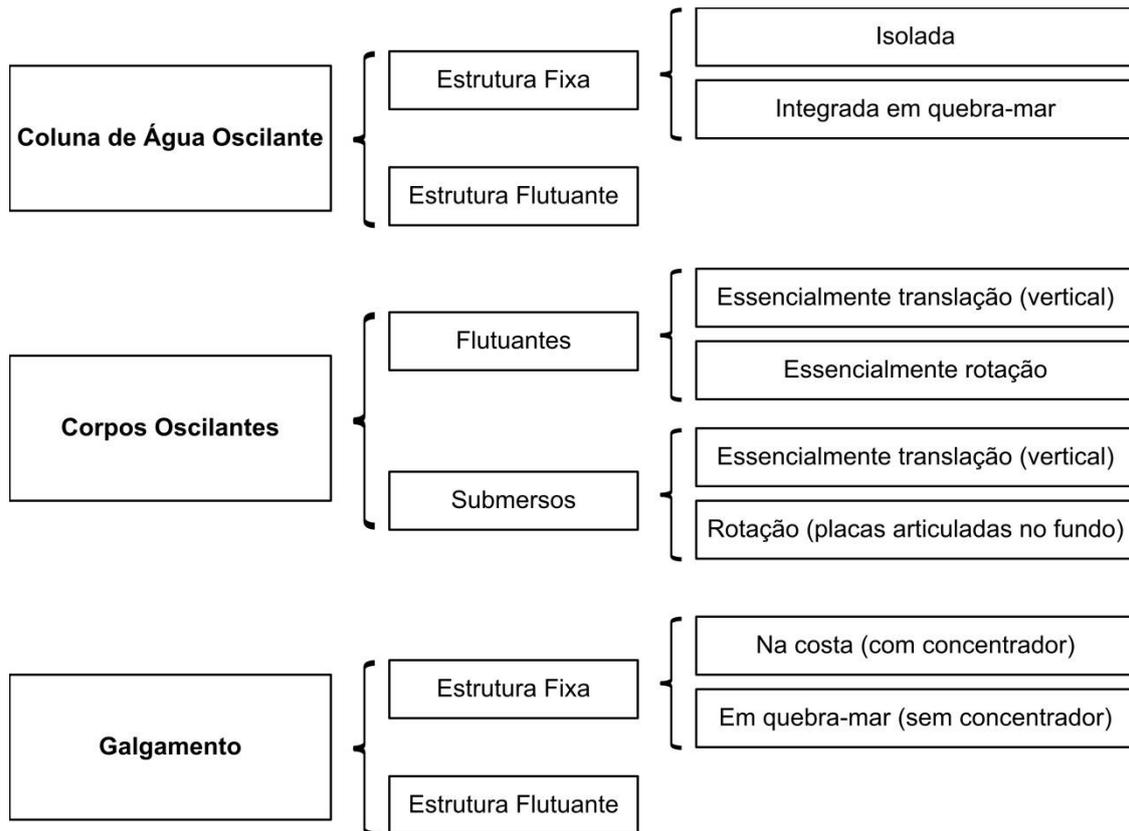


Figura 2.4 – Classificação dos conversores de energia das ondas quanto ao princípio de funcionamento (adaptado de Falcão, 2010).

A Figura 2.5, apresenta a ilustração dos principais tipos de dispositivos destacados a partir do critério de classificação do princípio de funcionamento.

Entretanto, estas classificações não contemplam todas as possibilidades existentes de converter a energia das ondas em energia elétrica. Outros princípios de funcionamento podem ser usados, como é o caso do conversor do tipo placa submersa.

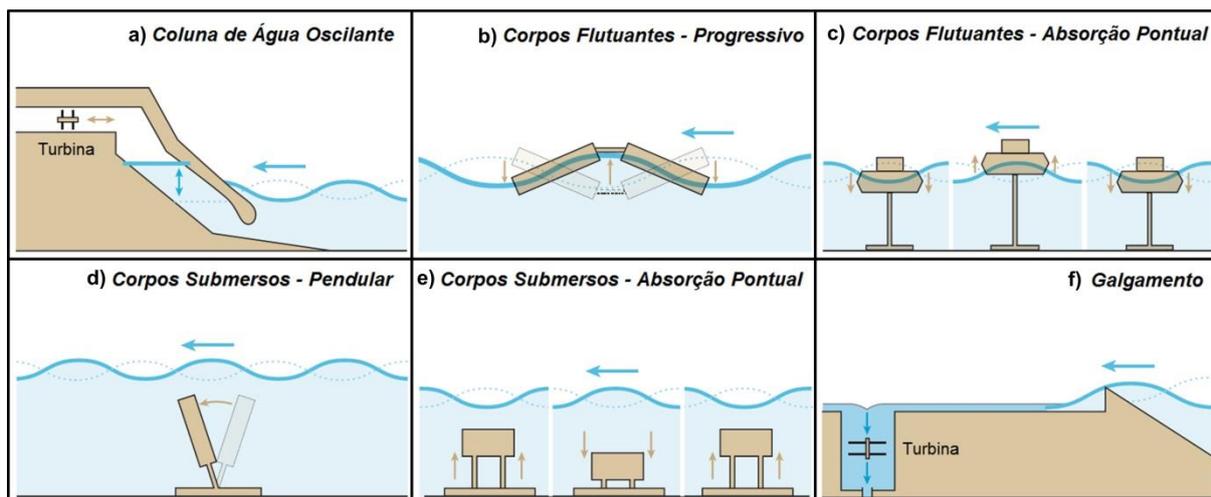


Figura 2.5 – Ilustração dos princípios de funcionamento dos conversores de energia das ondas (adaptado de Callaway, 2007).

2.1.4 Sistema de placa submersa

O sistema de placa horizontal submersa é um tipo de estrutura utilizada em engenharia costeira, principalmente como quebra-mar, para fins de proteção costeira, e como conversor de energia das ondas (Brossard et al., 2009).

Enquanto quebra-mar, este sistema se destaca como um eficiente filtro de ondas, sendo vantajoso em relação a outros quebra-mares submersos especialmente pelo escoamento que ocorre sob a placa (Figura 2.6). Graw (1992) descreve este escoamento como um fluxo pulsante, que apresenta maior intensidade no sentido contrário ao da propagação da onda, que ocorre durante a passagem da onda sobre a placa. Neste mesmo trabalho, afirma-se que este escoamento é bastante estável, não sofrendo alterações significativas mesmo quando a região abaixo da placa é parcialmente obstruída.

O princípio físico do sistema de placa submersa pode ser descrito como (Graw, 1993a):

- ao atingir a placa, a onda que está se propagando é dividida em duas partes: uma onda de gravidade, acima da placa, e uma distorção de pressão, se propagando abaixo da placa. O fluxo de energia, próximo à superfície, que passa sobre a placa se propaga com a velocidade da onda de gravidade (mais curta) determinada pela redução da profundidade da água nessa

região; já a outra parte, abaixo da placa, se propaga mais devagar, com a velocidade da distorção de pressão;

- assim que a onda de gravidade (menor) passa a placa e atinge a região após a mesma, uma nova onda é formada, a qual segue com mesmo sentido de deslocamento e mesmo comprimento de onda da onda original, porém com menos energia. Além disso, uma parte da energia do galgamento da onda sobre a placa também se propaga na região abaixo da placa (para trás);
- origina-se assim, um escoamento sob a forma de um forte fluxo pulsante no sentido contrário ao de propagação da onda, dependendo do comprimento da placa e da distribuição original do fluxo de energia na região próxima a superfície;
- a energia transferida por este fluxo, de volta para a região antes da placa, torna impossível, devido às distorções de pressão causadas, que as ondas seguintes se propaguem na região abaixo da placa e o escoamento torna-se intenso. Este fluxo é a razão física pela qual a energia é refletida por esta estrutura. Como ele depende do equilíbrio de energia entre a região à frente da placa e a região posterior à placa, abaixo dela, a placa funciona como um filtro de ondas.

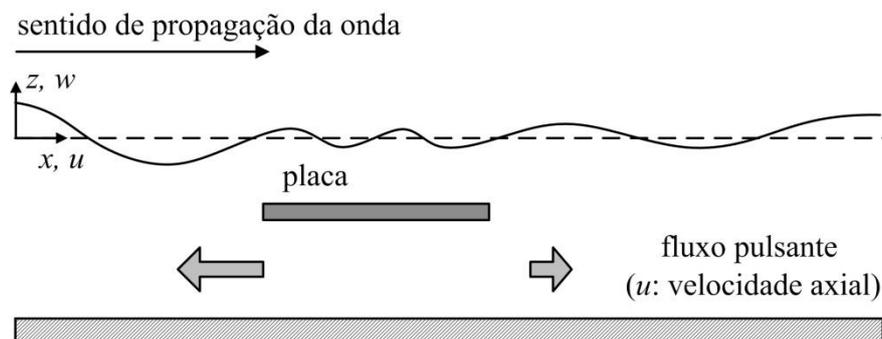


Figura 2.6 – Representação do sistema de placa submersa.

O conversor de placa submersa consiste no aproveitamento do escoamento que ocorre sob uma placa horizontal imersa abaixo da superfície da água, como propulsão para uma turbina hidráulica (Figura 2.7) instalada sob a mesma (Graw, 1993a; 1993b; 1995a).

Este conversor apresenta algumas vantagens com relação a outros conversores de energia das ondas (Graw, 1994):

- (i) como é totalmente submerso, o impacto de ondas grandes e da quebra de ondas sobre a estrutura é reduzido;
- (ii) pela mesma razão, problemas de corrosão na turbina também são reduzidos;
- (iii) como o fluxo pulsante sob a placa tem o sentido predominante contrário ao da propagação das ondas, uma turbina hidráulica comum pode ser utilizada, proporcionando uma redução de custos de implantação do sistema;
- (iv) seu duplo propósito, proteção costeira e conversor, também contribui para esta redução de custos: se a turbina está captando energia, o sistema atua como filtro de ondas e conversor de energia, caso contrário, mesmo que o fluxo abaixo da placa diminua, o sistema continua atuando como um quebra-mar submerso convencional;
- (v) como o dispositivo é totalmente submerso, a influência sobre o meio ambiente é reduzida.

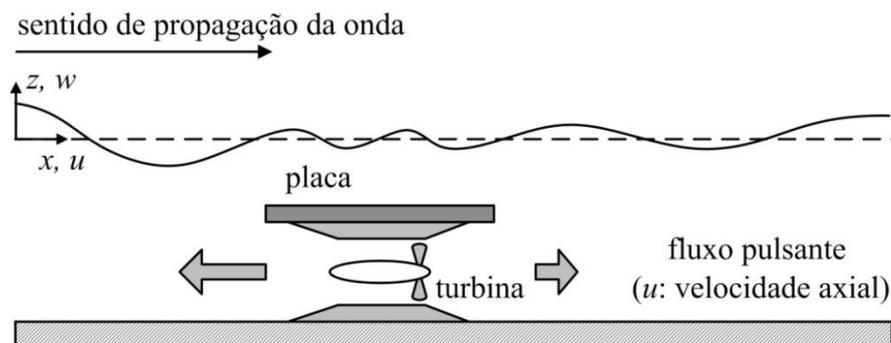


Figura 2.7 – Representação do dispositivo de placa submersa.

As descrições do sistema de placa submersa apresentadas por Graw (1992; 1993a; 1993b; 1994; 1995a; 1998) em diversos artigos, conforme citadas anteriormente, são essenciais para o entendimento do princípio físico do equipamento. Entretanto, outros autores, ao descreverem o escoamento sob a placa, esclarecem que, apesar de sua maior intensidade no sentido contrário ao de propagação das ondas, o mesmo apresenta uma natureza oscilatória; tendo em vista que a magnitude das velocidades do escoamento, no sentido de propagação da onda, nem sempre é desprezível relativamente às velocidades no sentido contrário (Carter, 2005; Orer e Ozdamar, 2007; Seibt et al., 2013).

2.2 TEORIA DE ONDAS

As ondas do mar são influenciadas por diversos fatores que resultam em diferentes formas e tamanhos de ondas, dependendo da magnitude e intensidade de atuação dos mesmos sobre a água (Dean e Dalrymple, 1991). Dentre estes, enumera-se quatro principais: o movimento de corpos na superfície, a ação dos ventos, abalos sísmicos, e as forças gravitacionais exercidas pelo sol e pela lua; cada um ocasionando diferentes movimentações da superfície marítima (McCormick, 1981).

A sobreposição dos efeitos dos diferentes fenômenos que geram ondas na superfície do mar torna a descrição matemática das ondas bastante complexa, especialmente devido às não linearidades envolvidas, às características tridimensionais e à aleatoriedade das interações. Entretanto, a teoria de Airy (1845 – também chamada de teoria linear ou de pequena amplitude) permite representar as ondas como oscilações regulares. Para isso, são assumidas as seguintes simplificações (U. S. Army, 1973):

- (a) o fluido é homogêneo e incompressível (massa específica constante),
- (b) desconsidera-se a tensão superficial do fluido,
- (c) desconsidera-se o efeito de coriolis,
- (d) a pressão sobre a superfície livre do fluido é constante e uniforme,
- (e) o fluido é não viscoso,
- (f) o fluido é irrotacional (não há movimento relativo entre as partículas de fluido),
- (g) o fundo é horizontal, fixo e impermeável,
- (h) a amplitude da onda é pequena e sua forma é invariável no tempo e no espaço,
- (i) as ondas são planas (bidimensionais).

Outras teorias não lineares permitem uma melhor representação das ondas em situações não previstas pela teoria linear, especialmente quando há interação da onda com o fundo (águas rasas) e quando as ondas são mais altas (Carneiro, 2007).

A partir da teoria linear, as ondas do mar podem ser vistas como um perfil senoidal que se propaga ao longo da superfície do mar. As principais características das ondas são: a distância horizontal entre duas cristas sucessivas (comprimento de onda, L), a distância vertical entre a crista e a cava (altura de onda, H) e o tempo decorrido entre o aparecimento de duas cristas sucessivas (período de onda, T) (U. S. Army, 1973). A Figura 2.8 ilustra as principais características das ondas.

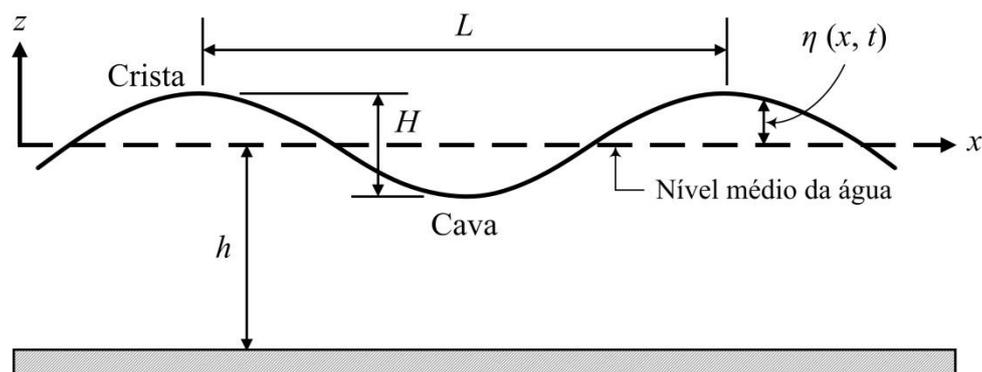


Figura 2.8 – Principais características de uma onda (adaptado de Dean e Dalrymple, 1991).

Outra característica importante é a distância entre o nível médio da superfície da água até o fundo do mar (profundidade, h); bem como a distância instantânea da superfície livre ao plano médio do nível da água (elevação da superfície livre, $\eta(x, t)$), ambos indicados na Figura 2.8.

Algumas dessas características devem ser levadas em conta na determinação da teoria de ondas a ser aplicada, sendo as principais: a altura de onda (H), o comprimento de onda (L) e a profundidade da água (h). Essas características, por sua vez, compõem os seguintes parâmetros adicionais:

- declividade (H/L),
- profundidade relativa (h/L),
- altura relativa da onda (H/h),
- número de Ursell ($U_R = L^2 H / h^3$).

A teoria de Airy, em vista de sua simplicidade, é válida quando a declividade, a profundidade relativa e a altura relativa da onda são pequenas, ou seja, ondas com pequena amplitude e comprimento, em grandes profundidades. Já a teoria de Stokes, por sua vez, se aplica a ondas mais altas em águas relativamente profundas.

A partir da teoria de segunda ordem de Stokes podem ser representadas ondas com cristas mais altas e cavas mais chatas (Figura 2.9), além disso, é possível representar o fenômeno de transporte de massa na direção de propagação da onda, uma vez que o caminho das partículas não se apresenta como uma órbita fechada (Gomes, 2010).

A solução de Stokes é formalmente válida para $kh < 1$ e $H/L \ll 1$; em termos do número de Ursell o limite de aplicação é $U_R < 26$ (Carneiro, 2007). Um recurso usual para a definição da teoria de ondas a ser aplicada é o gráfico apresentado na Figura 2.10, desde que as características da onda sejam conhecidas.

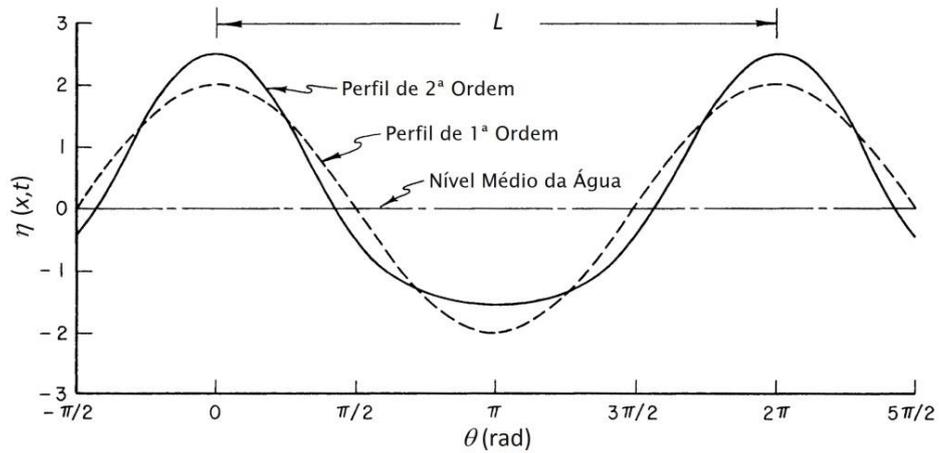


Figura 2.9 – Comparação do perfil de onda de Stokes de 2ª ordem com o perfil linear (adaptado de U. S. Army, 1973).

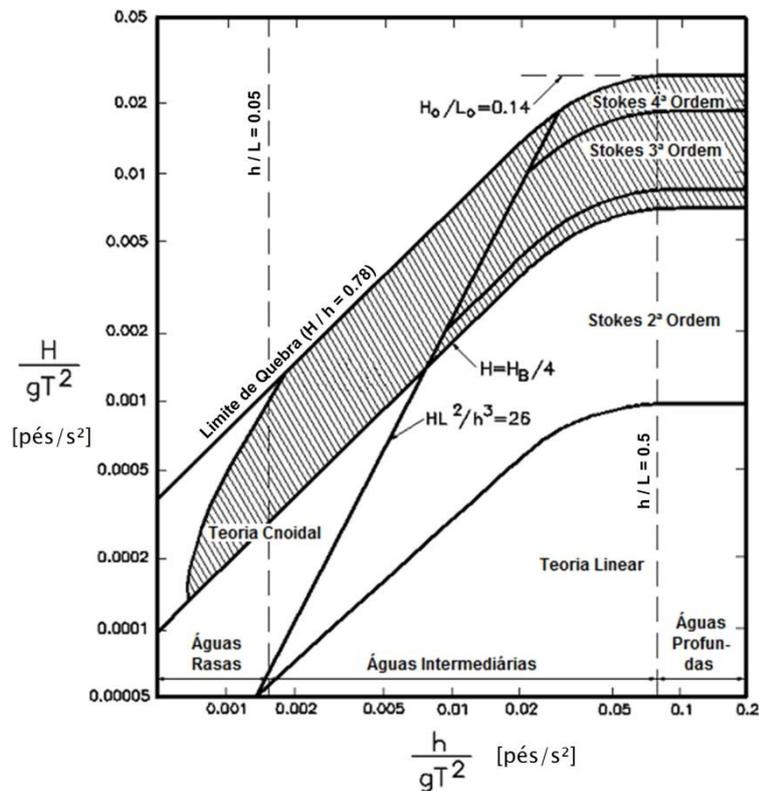


Figura 2.10 – Aplicabilidade das teorias de ondas (adaptado de CEM, 2002).

Cabe destacar que a escala do gráfico da Figura 2.10 é definida com base no sistema métrico inglês, sendo assim, as características da onda medidas em metros devem ser convertidas para pés (1,00 m = 3,28 pés); da mesma forma, o valor da aceleração da gravidade (g) deve ser considerado como 32,20 pés/s².

2.2.1 Teoria de ondas linear

Como citado anteriormente, a teoria linear das ondas admite certas simplificações, sendo assim, a equação da continuidade definida como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

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

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

pode ser representada pela equação de Laplace:

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

em que u e w representam as velocidades das partículas de água nas direções de x e z , respectivamente; ϕ representa o potencial de velocidade, x e z as coordenadas horizontal e vertical do sistema de eixos empregado. Adicionando à expressão (2.4) as condições de contorno:

a) Condição de contorno cinemática de fundo, considerado rígido e impermeável:

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

b) Condição de contorno cinemática na superfície livre:

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

c) Condição de contorno dinâmica da superfície livre:

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

sendo p a pressão na superfície da água, a Equação de Bernoulli na superfície $z = \eta$ é dada por:

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

onde g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

Dessa forma, a solução encontrada, conforme McCormick (1973) é:

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

onde k é o número de onda e ω é a frequência de onda, dados por:

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

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

Isolando η na expressão (2.8), obtém-se:

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t}, \text{ em } z = 0. \quad (2.12)$$

Logo, das expressões (2.9) e (2.12) decorre que a elevação da superfície é:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kh - \omega t) \quad (2.13)$$

Assim, através das expressões (2.6), (2.9) e (2.13) em $z = 0$, encontra-se:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{Hg}{2\omega} \frac{\sinh kh}{\cosh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{Hg}{2\omega} \tanh kh \sin(kx - \omega t) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{H}{2} \omega \sin(kx - \omega t) \quad (2.16)$$

$$\frac{Hg}{2\omega} k \tanh kh \sin(kx - \omega t) = \frac{H}{2} \omega \sin(kx - \omega t) \quad (2.17)$$

$$\tanh kh = \frac{\omega^2}{gk} \tag{2.18}$$

Substituindo as expressões (2.10) e (2.11) em (2.18) e isolando L , obtém-se:

$$\tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right) = \frac{\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2}{g\left(\frac{2\pi}{L}\right)} \tag{2.19}$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right) \tag{2.20}$$

As ondas são normalmente classificadas a partir da relação h/L permitindo, assim, que se obtenha a simplificação da expressão (2.20) de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Critérios de classificação das ondas quanto à profundidade (U. S. Army, 1973).

Critério	Profundidade	$\tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right)$
$h/L \geq 1/2$	Águas profundas	≈ 1
$h/L \leq 1/20$	Águas rasas	$\tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right)$
$1/20 < h/L < 1/2$	Águas intermediárias	$\approx \frac{2\pi}{L} h$

Assim, em águas profundas ($h/L \geq 1/2$), quando kh é grande e $\tanh\left(\frac{2\pi}{L} h\right) = 1$,

tem-se o comprimento de onda calculado por:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tag{2.21}$$

2.2.2 Teoria de ondas de Stokes de 2ª ordem

Stokes desenvolveu um método de alta ordem para a análise de ondas de gravidade de alturas finitas. Basicamente a teoria de Stokes consiste em assumir que as propriedades do movimento da onda, tais como o potencial de velocidade, podem ser

representadas por uma série de pequenas perturbações. Portanto, quanto mais alto o número de termos incluídos na série melhor é a aproximação das propriedades atuais da onda (Gomes, 2010).

Assim, a expressão do potencial de velocidades obtida a partir da teoria de Stokes de 2ª ordem, é escrita como (McCormick, 1973):

$$\phi = \frac{H}{2} c \frac{\cosh(kh+kz)}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \left(\frac{H}{2}\right)^2 \frac{3\pi c}{4L} \omega k \frac{\cosh(2kh+2kz)}{\sinh^4(kh)} \sin(2kx - 2\omega t) \quad (2.22)$$

onde c é celeridade, dada por:

$$c = \left[\frac{g}{k} \tanh(kh) \right]^{1/2} \quad (2.23)$$

Derivando-se a expressão (2.22), em relação a u e w , é possível encontrar as componentes de velocidade de propagação da onda, respectivamente, como (Dean e Dalrymple, 1991):

$$u = \frac{H}{2} g k \frac{\cosh(kh+kz)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2}\right)^2 \omega k \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (2.24)$$

$$w = \frac{H}{2} g k \frac{\sinh(kh+kz)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2}\right)^2 \omega k \frac{\sinh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (2.25)$$

Já a equação para a elevação da superfície livre, é descrita como:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8L} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos(2kx - 2\omega t) \quad (2.26)$$

No presente trabalho, é adotada a teoria de Stokes de 2ª ordem, tendo em vista o enquadramento das características das ondas estudadas pelo parâmetro de Ursell. Da mesma forma, os comprimentos de onda são calculados ao longo do estudo pela expressão (2.20), tendo em vista que esta é idêntica para ambas as teorias.

2.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

A metodologia de pesquisa utilizada no presente trabalho foi baseada na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*), uma ferramenta que permite a análise e solução de problemas físicos de grande complexidade matemática, voltados a aplicações de engenharia (Maliska, 2004).

Através dessa ferramenta trabalha-se com a discretização do campo de solução do problema e aplicação de um método numérico que permita encontrar de forma adequada à solução do mesmo. Para tanto, foram empregados no presente estudo os *softwares* GAMBIT (GAMBIT, 2006) e FLUENT (FLUENT, 2007) que constituem um pacote comercial para CFD da empresa ANSYS®.

Nesse pacote, o GAMBIT é um programa que auxilia na construção e discretização de domínios numéricos para cálculo computacional e o FLUENT é um programa baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF – Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 2007), para a modelagem de escoamento de fluidos e de transferência de calor em geometrias complexas; o que se dá pela conversão das equações de conservação de massa e da quantidade de movimento da forma diferencial em um sistema de equações algébricas para todos os volumes de controle.

Estudos numéricos por meio de modelagem computacional, normalmente, são divididos em três etapas, de acordo com o estudo desenvolvido, como as descritas a seguir:

- Pré-processamento: quando é realizada a construção da geometria do problema e a geração da malha, onde foi empregado o *software* GAMBIT; e a definição das condições iniciais e de contorno, onde foi empregado o *software* FLUENT;
- Processamento: nessa etapa são resolvidas as equações que compõe o modelo do problema, onde foi empregado o *software* FLUENT;
- Pós-processamento: quando é feita a coleta dos resultados dos cálculos e a análise dos dados pela plotagem de gráficos e topologias, o *software* FLUENT oferece recursos para esta etapa, porém outros, como planilhas eletrônicas, foram utilizados por permitem manusear os dados com mais facilidade.

2.3.1 Método de Volumes Finitos

O Método dos Volumes Finitos (MVF) é uma maneira de se obter a forma discreta de uma Equação Diferencial Parcial (EDP). Diferentemente de outros métodos ele fundamenta-se em uma abordagem física do problema representado pela EDP. O seu desenvolvimento está intrinsecamente ligado ao conceito de fluxo entre regiões, ou volumes adjacentes, onde o fluxo de uma determinada grandeza, como massa ou energia, é a quantidade dessa grandeza que atravessa a área de uma fronteira.

A quantidade líquida que atravessa um volume de controle, por unidade de tempo, é calculada pela integração, sobre essas fronteiras, da diferença entre os fluxos que entram e os que saem deste volume, o que é conseguido de forma geral pela integração das EDPs (Maliska, 2004).

O MVF é considerado adequado para a solução de problemas físicos de dinâmica dos fluidos por garantir a conservação local da propriedade do fluido para cada célula do volume de controle. Quando os esquemas numéricos empregam a forma conservativa é assegurada também a conservação global da propriedade do fluido para todo o domínio computacional.

Um sistema na forma conservativa ou divergente, é aquele em que na equação diferencial os fluxos estão dentro do sinal da derivada e, na primeira integração, aparecem os fluxos nas fronteiras do volume elementar, equivalente, dessa forma, ao balanço.

Existem duas maneiras de encontrar as equações aproximadas de um problema através do MVF. A primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, e a segunda, é a de integrar sobre o volume elementar, no espaço e no tempo, as equações na forma conservativa (Maliska, 2004).

O balanço de massa no volume elementar ou finito, mostrado na Figura 2.11, é calculado, no regime permanente, por (Maliska, 2004):

$$\dot{m}_e - \dot{m}_w + \dot{m}_n - \dot{m}_s = 0 \quad (2.27)$$

e no regime transiente, como:

$$\dot{m}_e - \dot{m}_w + \dot{m}_n - \dot{m}_s = \frac{\Delta m}{\Delta t} \Big|_p \quad (2.28)$$

Já para o volume elementar no sistema de coordenadas cartesianas, em termos das velocidades, tem-se que:

$$\rho u \Delta y|_e - \rho u \Delta y|_w + \rho v \Delta x|_n - \rho v \Delta x|_s = 0 \quad (2.29)$$

onde os índices e , w , n e s representam, respectivamente, os pontos cardeais leste, oeste, norte e sul e são a nomenclatura usual utilizada para identificar as faces do volume de controle na discretização numérica; \dot{m}_i representa a vazão mássica que atravessa a fronteira i do volume; t indica o tempo; ρ é a massa específica; u e v as componentes do vetor velocidade nas direções x e y , respectivamente.

Dividindo a expressão (2.29) pelo produto $\Delta x \Delta y$, obtém-se:

$$\frac{\rho u|_e - \rho u|_w}{\Delta x} + \frac{\rho v|_n - \rho v|_s}{\Delta y} = 0 \quad (2.30)$$

aplicando o limite, tem-se a representação da forma diferencial conservativa da equação de conservação da massa, pois os produtos ρu e ρv estão dentro do sinal da derivada, como:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.31)$$

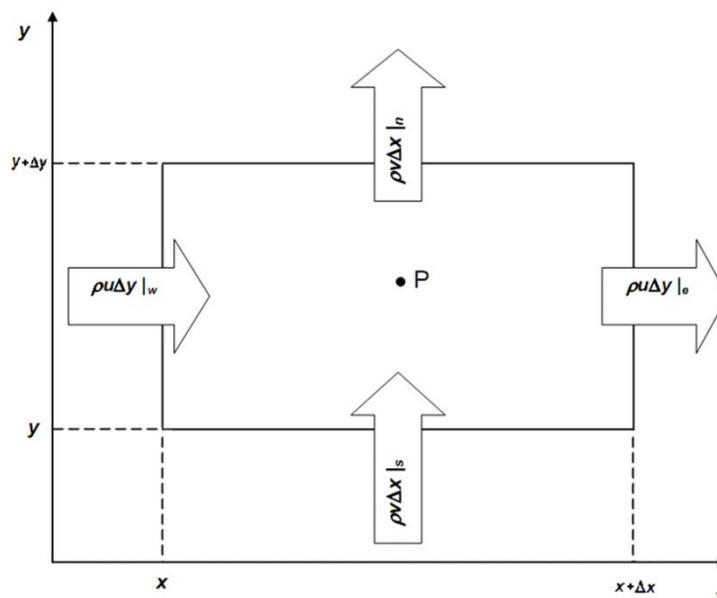


Figura 2.11 – Volume elementar para os balanços de conservação.

Para obter-se a aproximação numérica da equação da conservação da massa infinitesimal é necessário integrar a expressão (2.31) no volume elementar (Figura 2.11):

$$\int_w^e \int_s^n \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \right] dx dy = 0 \quad (2.32)$$

$$\int_w^e [\rho v|_n - \rho v|_s] dx + \int_s^n [\rho u|_e - \rho u|_w] dy = 0 \quad (2.33)$$

Considerando que o fluxo de massa avaliado no meio da face do volume de controle representa a média da variação na face, pode-se escrever:

$$\rho u \Delta y|_e - \rho u \Delta y|_w + \rho v \Delta x|_n - \rho v \Delta x|_s = 0 \quad (2.34)$$

que é exatamente a expressão (2.29) obtida da realização do balanço, podendo ser escrita também como:

$$\dot{m}_e - \dot{m}_w + \dot{m}_n - \dot{m}_s = 0 \quad (2.35)$$

Conforme Maliska (2004), a expressão (2.29), é a equação aproximada que vale para o volume P . Dessa forma, percebe-se que efetuar a integração na forma conservativa da equação diferencial ou realizar o balanço são procedimentos equivalentes. Escolhendo então o processo de integração para todos os volumes elementares, obtém-se uma equação algébrica para cada volume e, portanto, um sistema de equações algébricas.

O *software* FLUENT baseia-se na conversão da equação governante de cada volume de controle para a forma algébrica e, então, resolve o problema numericamente (FLUENT, 2007). A técnica empregada nesse processo utiliza o método da integração das equações governantes em cada célula do volume de controle, resultando em equações discretizadas.

Um aspecto importante a ser observado é a questão do comportamento do fluxo nas faces do volume elementar durante o intervalo de tempo (Δt) para que a integração possa ser realizada. Dependendo da função de interpolação escolhida para esse comportamento, a formulação pode ser explícita, implícita ou totalmente implícita. Essa função de interpolação no tempo pode ser representada por:

$$J^\beta = \beta J + (1 - \beta) J^\beta \quad (2.36)$$

onde J é uma variável física qualquer que pode, por exemplo, ser o valor representativo da temperatura para todo o intervalo e β representa a variável de ajuste da função.

A formulação adotada vai variar de acordo com o valor de β , sendo a classificação apresentada na Tabela 2.2, e algumas características indicadas na Figura 2.12.

Tabela 2.2 – Tipos de formulações no tempo.

Formulação	β
Explícita	0
Totalmente implícita	1
Implícita	$0 < \beta < 1$

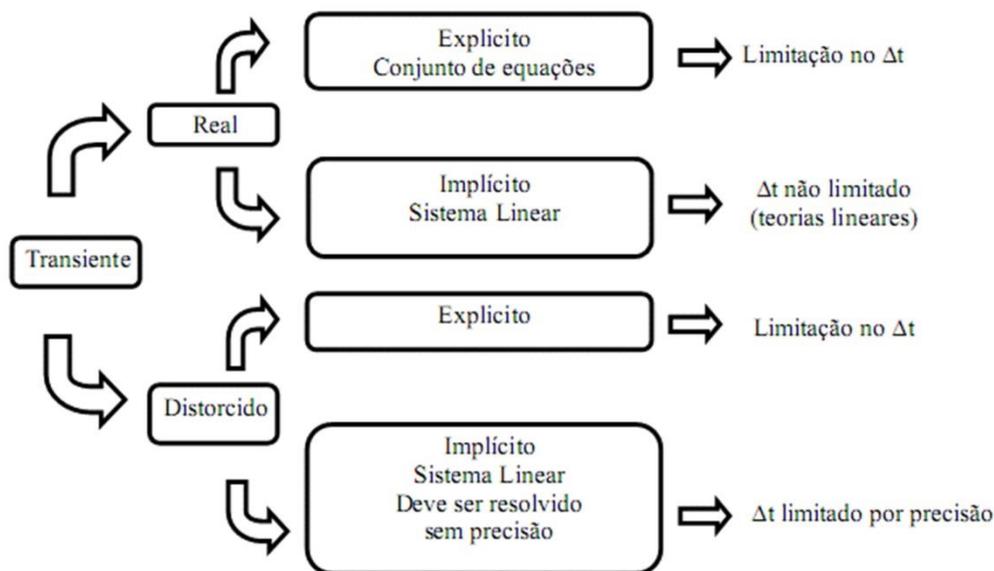


Figura 2.12 – Possibilidades de avanço da solução no tempo.

2.3.2 Método *Volume of Fluid* (VOF)

A partir do conceito de fração volumétrica (Hirt e Nickols, 1981), o método VOF permite a representação de dois ou mais fluidos imiscíveis resolvendo um único conjunto de equações de transporte. A identificação da interface dos fluidos é feita considerando que o volume de uma fase não pode ser ocupado por outras fases.

Define-se a fração de volume, α , como sendo uma variável, contínua no espaço e no tempo, que representa a presença de um fluido no interior do volume de controle.

Assim, em cada volume de controle a soma da fração volumétrica de todas as fases é unitária, de forma que se têm três possíveis situações:

- $\alpha = 1$: caracteriza um volume onde há unicamente a água,
- $\alpha = 0$: indica o volume que contém apenas ar,
- $0 < \alpha < 1$: é usado para identificar a posição da superfície livre.

A equação de transporte da fração volumétrica, usada para determinar a fração do volume relativa às duas fases em cada elemento de malha do domínio computacional, é dada por (Srinivasan et al., 2011):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial \alpha u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2.37}$$

O método VOF não calcula explicitamente a posição da superfície livre entre os fluidos, esta é determinada pela discretização da fração volumétrica na região de interface entre os dois fluidos onde há valores α entre 0 e 1 (Figura 2.13).

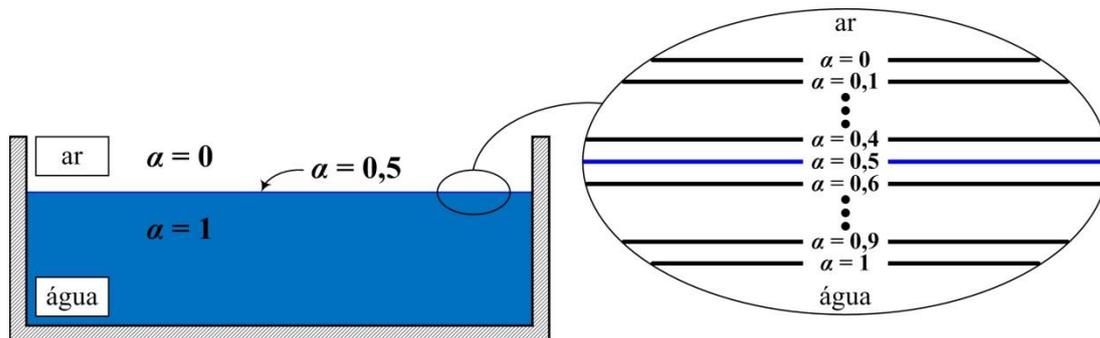


Figura 2.13 – Exemplo de identificação da superfície livre a partir da variação da fração de volume (adaptado de De Brito, 2010).

As propriedades físicas na zona de transição entre os dois fluidos são calculadas como médias ponderadas com base na fração volumétrica. Dessa forma, a massa específica e a viscosidade dinâmica, são escritas como (Srinivasan et al., 2011):

$$\rho = \alpha \rho_{\text{água}} + (1 - \alpha) \rho_{\text{ar}} \tag{2.38}$$

$$\mu = \alpha \mu_{\text{água}} + (1 - \alpha) \mu_{\text{ar}} \tag{2.39}$$

3. MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica realizada neste estudo foi desenvolvida empregando-se o software de CFD FLUENT (FLUENT, 2007) o qual é uma ferramenta para a modelagem computacional de fenômenos físicos envolvendo escoamentos de fluidos e transferência de calor. Para tanto, este software utiliza o MVF (Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 2007) para a discretização das equações diferenciais que representam o problema físico a ser estudado.

Nesse capítulo é feita uma breve apresentação das equações matemáticas que compõe o modelo, da geometria e geração de malha no domínio computacional, bem como dos parâmetros computacionais adotados. Além disso, apresenta a descrição do estudo de validação e verificação do modelo numérico utilizado.

3.1 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático apresentado nesta seção consiste no conjunto geral de equações que foram utilizadas na simulação numérica, bem como, no contexto de um estudo numérico de engenharia, as equações utilizadas para análise do dispositivo a partir dos dados extraídos das respectivas simulações numéricas.

3.1.1 Modelo físico do escoamento

O escoamento de um fluido viscoso (newtoniano) é descrito pelas equações de Navier-Stokes que traduzem a conservação da massa e da quantidade de movimento. Estas equações diferenciais são fortemente não lineares e estabelecem relações entre as taxas de variação do campo de velocidades, pressão, tensões e massa específica (De Brito, 2010).

Na forma vetorial, podem ser escritas, respectivamente, como (Schlichting e Gersten, 2000):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\frac{\tau}{\rho} \right) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.2)$$

onde ρ é a massa específica da mistura (kg/m^3), \vec{v} é o vetor velocidade do escoamento (m/s), p é a pressão (N/m^2), $\rho\vec{g}$ e \vec{F} são o empuxo e forças externas (N/m^3), respectivamente, e $\bar{\tau}$ é o tensor de deformação (N/m^2), o qual para um fluido newtoniano, é dado por:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3.3)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica (kg/(ms)), I é um tensor unitário e o segundo termo a partir da esquerda diz respeito a tensão deviatória (N/m^2).

No presente estudo, porém, as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento assumem como hipóteses simplificativas a resolução de um escoamento isotérmico, laminar, incompressível e bidimensional, podendo ser escritas respectivamente como (Schlichting e Gersten, 2000):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (3.5)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho \left[u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \rho\vec{g} \quad (3.6)$$

onde ρ é a massa específica (kg/m^3), u e w são as componentes horizontal e vertical, respectivamente, da velocidade do escoamento (m/s), p é a pressão (N/m^2), $\rho\vec{g}$ é o empuxo (N/m^3) e μ é a viscosidade dinâmica (kg/(ms)).

Para a simulação de escoamentos de superfície livre, como um canal de ondas, onde há interação água-ar, é necessário o uso de alguma técnica de identificação da posição da superfície livre; no caso, o método VOF (Hirt e Nickols, 1976). O método VOF é um modelo multifásico usado para escoamentos de fluidos com duas ou mais fases consideradas imiscíveis, isto é, o volume ocupado por uma fase não pode ser ocupado pela outra fase.

A fração de volume (α_q) é usada para representar ambas as fases no interior do volume de controle. Nesse modelo, as frações de volume são assumidas como contínuas no espaço e no tempo. Além disso, a soma das frações de volume, no interior do volume de controle, são sempre unitárias ($0 \leq \alpha_q \leq 1$). Sendo assim, se $\alpha_{\text{água}} = 0$ a célula está sem água e

preenchida de ar ($\alpha_{ar} = 1$) e se a célula tem a presença de ambos os fluidos (água e ar), uma fase é o complemento da outra, ou seja, $\alpha_{ar} = 1 - \alpha_{água}$. Portanto, é necessária uma equação de transporte adicional para a fração de volume, dada como (Srinivasan et al., 2011):

$$\frac{\partial(\alpha_q)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_q u)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha_q w)}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

Os valores de massa específica e viscosidade dinâmica para o conjunto de equações são dados, portanto, pela média ponderada das propriedades de cada uma das fases e podem ser escritos como (Srinivasan et al., 2011):

$$\rho = \alpha_{água} \rho_{água} + \alpha_{ar} \rho_{ar} \quad (3.8)$$

$$\mu = \alpha_{água} \mu_{água} + \alpha_{ar} \mu_{ar} \quad (3.9)$$

Uma vez que o escoamento em questão não envolve transferência de calor, a equação da energia não é resolvida; e uma vez que o fluido é considerado incompressível, devido ao escoamento envolver baixas velocidades, a equação de estado, para determinação da pressão em qualquer ponto do domínio, torna-se dependente apenas da coluna de fluido, não existindo variação de massa específica (Versteeg e Malalasekera, 2007).

3.1.2 Modelo de geração da onda

A partir da teoria de ondas de Stokes de 2ª ordem, apresentada anteriormente, são definidas as equações que descrevem as características e o comportamento hidrodinâmico da propagação das ondas utilizadas no modelo computacional. A seguir são listadas apenas as equações diretamente aplicadas ao presente estudo.

A partir das características de período de onda (T) e a profundidade da lâmina de água (h), é possível determinar o comprimento de onda, a partir da expressão de dispersão, dada por (Dean e Dalrymple, 1991):

$$L = \left(\frac{g}{2\pi} \right) T^2 \tanh\left(\frac{2\pi h}{L} \right) \quad (3.10)$$

onde g é a aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), T é o período de onda (s), h é a profundidade da lâmina de água (m) e L é o comprimento de onda (m). Esta expressão, para a teoria de Stokes de 2ª ordem, é idêntica a obtida da teoria linear (U. S. Army, 1973).

As expressões de elevação da superfície livre e das componentes de velocidade de propagação da onda, na direção horizontal (x) e vertical (z), são escritas, respectivamente, como (Dean e Dalrymple, 1991):

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8L} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos(2kx - 2\omega t) \quad (3.11)$$

$$u(x, z, t) = \frac{H}{2} gk \frac{\cosh(kh + kz)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2} \right)^2 \omega k \frac{\cosh 2k(h + z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (3.12)$$

$$w(x, z, t) = \frac{H}{2} gk \frac{\sinh(kh + kz)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2} \right)^2 \omega k \frac{\sinh 2k(h + z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (3.13)$$

onde H é a altura de onda (m), g é a aceleração da gravidade (m/s^2), k é o número de onda dado por $k = 2\pi/L$ (m^{-1}), L é o comprimento de onda (m), ω é a frequência de onda dada por $\omega = 2\pi/T$ (rad/s), T é o período de onda (s), h é a profundidade da lâmina de água (m) e t é o tempo (s).

Já a potência média da onda P_w (W), é definida como (McCormick, 1981):

$$P_w = \left(\frac{1}{16} \rho g H^2 \right) \frac{\omega}{k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \left[1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{k^4 h^6} \right] \quad (3.14)$$

3.1.3 Proposta de análise do dispositivo

A eficiência (φ) deste conversor é definida por (Graw, 1995b; Carter, 2005; Orer e Ozdamar, 2007):

$$\varphi = \frac{P_P}{P_w} \quad (3.15)$$

onde P_P é a potência média disponível no escoamento sob a placa (W) e P_w é a potência média da onda incidente no equipamento (W). Esta potência é definida na teoria de Stokes de 2ª ordem conforme expressão (3.14).

Já a potência média disponível sob a placa (P_p) foi calculada, no presente trabalho, segundo a expressão (Dizadji e Sajadian, 2011):

$$P_p = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{-h+H_p} \left(p + \frac{1}{2} \rho u^2 \right) u dz dt \quad (3.16)$$

onde p é a pressão estática (Pa) sob a placa e o termo $(\rho u^2/2)$ representa a pressão dinâmica (Pa).

Esta expressão difere-se da adotada por outros autores, no estudo de placa submersa, que consideram apenas o termo de pressão dinâmica, desprezando o termo de pressão estática (Graw, 1995b; Orer e Ozdamar, 2007). Contudo, em relação aos casos em que a área livre sob a placa submersa não apresenta obstruções, observou-se que essa diferença acarreta em resultados aproximadamente 15 % maiores (ver Graw, 1993b e Orer e Ozdamar, 2007 na seção 1.1 Estado da Arte).

A proposta da equação (3.16) considera o fluxo de energia da onda segundo a teoria de Airy, onde o efeito da dinâmica de propagação da onda confere significativa contribuição para a variação do campo de pressões abaixo da superfície livre (Dean e Dalrymple, 1991). Sendo assim, uma vez que o escoamento sob a placa submersa também é influenciado pela variação no campo de pressões, adotou-se a mesma consideração, em relação à propagação da onda, com as devidas adequações para a área livre sob a placa.

3.2 MODELO COMPUTACIONAL

Nesta seção é apresentada uma descrição geral do domínio computacional e dos parâmetros de solução adotados nas simulações numéricas.

3.2.1 Geometria do domínio

No presente estudo, o domínio computacional foi construído a partir da representação, bidimensional, de um canal de ondas, típico de modelos de laboratório, com a presença da placa submersa a certa distância do gerador de ondas.

Para a definição das dimensões do domínio computacional, adotou-se a distância de dois comprimentos de onda entre o gerador e a aresta frontal da placa submersa e, aproximadamente, quatro comprimentos de onda a partir da aresta posterior até a parede final

do canal de ondas (Figura 3.1). Já a altura do canal e a espessura da placa, foram fixadas em 1,00 m e 0,02 m, respectivamente.

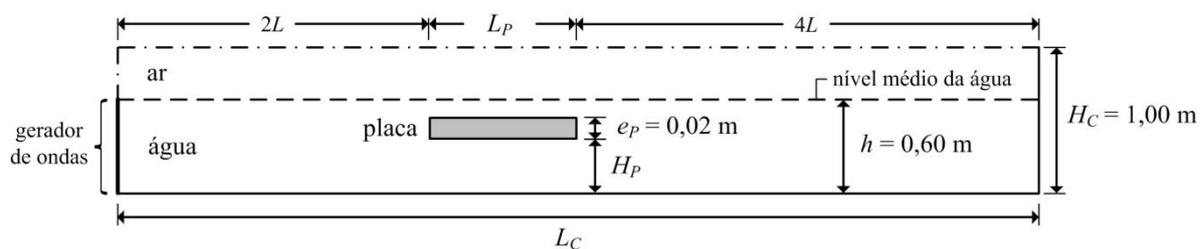


Figura 3.1 – Representação da geometria do domínio.

3.2.2 Geração da malha

Apesar da robustez dos códigos de CFD, como o FLUENT, a correta definição do número de elementos e de suas dimensões, proporciona que se obtenham resultados adequados e com eficiência no uso dos recursos computacionais.

O domínio computacional deste estudo foi criado no *software* GAMBIT que permite tanto a construção da geometria do domínio quanto a geração da malha de discretização do mesmo. Após a construção da geometria e geração da malha é possível exportar o domínio em formato compatível com o *software* FLUENT.

A geração de malha pode ser feita basicamente de dois modos (De Brito, 2010):

- estruturada: a malha gerada é disposta num padrão regular e repetido. Este tipo de malha utiliza elementos quadriláteros ou triângulares em 2D e elementos tetraédricos ou hexaédricos em 3D. A utilização da malha estruturada possibilita um bom controle na sua construção, bem como um maior nível de precisão dos esquemas numéricos;
- não estruturada: utiliza um conjunto arbitrário de elementos para preencher o domínio computacional e o arranjo dos elementos não apresenta um padrão fixo. Este tipo de malha utiliza triângulos e quadriláteros em 2D, e tetraedros, hexaedros e prismas em 3D. O uso da malha não estruturada permite gerar mais facilmente malhas em torno de geometrias complexas.

No presente estudo, dada à simplicidade geométrica do domínio, utilizou-se malha do tipo estruturada, a qual permite um melhor controle das dimensões de seus elementos ao longo do domínio. Este recurso é especialmente útil para a discretização da região de superfície livre, onde há interface entre água e ar, uma vez que esta requer maior cuidado para evitar-se difusão numérica da fração de volume (Ramalhais, 2011).

A primeira parte do presente estudo, apresentada na seção 4.2 onde realizou-se a avaliação referente à influência da área livre sob a placa submersa, foi desenvolvida com base em estudos anteriores, onde a malha gerada era formada apenas por elementos quadrados de dimensões $0,01 \text{ m} \times 0,01 \text{ m}$ (199.800 elementos de volume para um canal de comprimento $L_C = 20,00 \text{ m}$, altura $H_C = 1,00 \text{ m}$, com uma placa de comprimento $L_P = 1,00 \text{ m}$ e espessura $e_P = 0,02 \text{ m}$). O estudo de independência dessa malha foi apresentado em Seibt (2011), no qual foram testadas 4 configurações de malhas regulares ($0,04 \text{ m} \times 0,04 \text{ m}$, $0,02 \text{ m} \times 0,02 \text{ m}$, $0,01 \text{ m} \times 0,01 \text{ m}$, $0,005 \text{ m} \times 0,005 \text{ m}$), tendo como critério de independência de malha uma diferença relativa entre os resultados, da vazão mássica do escoamento sob a placa submersa, menor que 1 %.

Entretanto, num segundo momento, visando à continuidade desse trabalho, foram adotados critérios para definição das dimensões dos elementos de malha que permitissem a construção de domínios computacionais, cujo número de elementos totais em domínios de dimensões reais ou tridimensionais, não representasse um acréscimo desnecessário de esforço computacional, como seria esperado ao manterem-se as dimensões utilizadas anteriormente. Esse procedimento é adotado em estudos de outros autores devido a esta característica (Horko, 2007; Barreiro, 2009; Barreiro et al., 2009; Ramalhais, 2011).

Com isso, foram adotados para a discretização da região de interface entre as fases, 20 elementos entre crista e cava da onda e, para garantir a propagação da onda sem perdas de amplitude ou alteração de período, 60 elementos por comprimento de onda (Barreiro, 2009; Ramalhais, 2011).

A partir desses critérios de refinamento de malha, por exemplo, o mesmo domínio que apresentava 199.800 elementos passou a apresentar 148.698 elementos de volume, o que representou uma redução no tempo computacional em torno de 30 min de simulação para esse mesmo domínio. A comparação entre os resultados numéricos obtidos com a malha gerada a partir dos novos critérios, não apresentou diferenças significativas.

Portanto, para as análises apresentadas nas seções 4.3 e 4.4 do presente estudo, o domínio foi dividido em diversas regiões, conforme Figura 3.2, onde as dimensões de malha foram adequadas para cada região. Levando em conta os efeitos causados pela dissipação de

energia das ondas em torno da placa, a malha desta região foi discretizada na direção horizontal com base no comprimento de onda equivalente à terceira harmônica (L_3) da onda considerada na simulação, portanto $L_3/60$. Além disso, na direção vertical, o critério $H/20$ foi estendido até 0,10 m abaixo da placa. Logo abaixo desta região a dimensão “ b ” dos volumes aumenta até $3H/20$, voltando a reduzir na região próxima ao fundo do canal para proporcionar maior refinamento da malha próximo a essa região. Acima da região de interface água-ar, a dimensão “ b ” da malha tem uma transição de $H/20$ até $7H/20$ na parte superior do canal, resultando em 35 elementos conforme recomendação de Barreiro (2009).

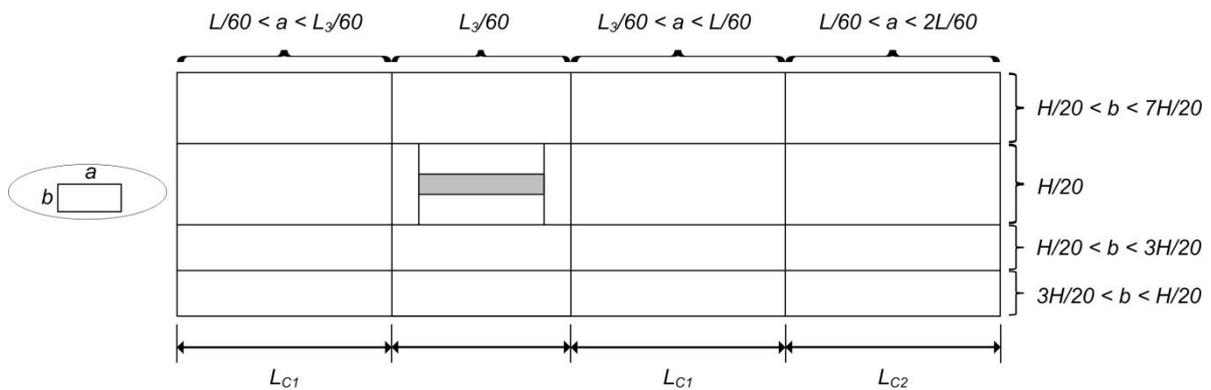


Figura 3.2 – Dimensões adotadas para a malha empregada no domínio computacional.

3.2.3 Condições de contorno

Após definir a geometria do domínio computacional e gerar a malha de discretização do mesmo, segue-se a definição das condições de contorno do problema.

Na Figura 3.3 a representação do canal com a indicação das condições de contorno do domínio é apresentada.

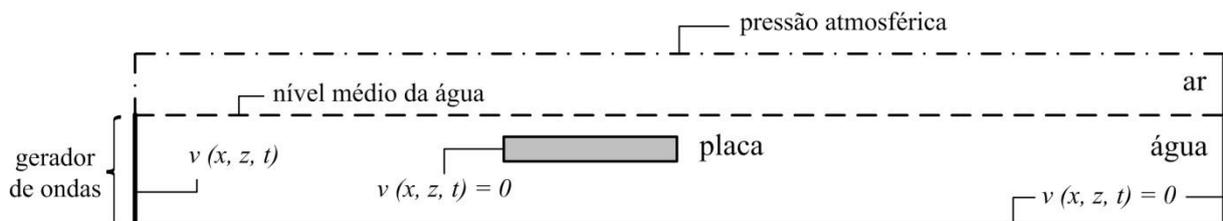


Figura 3.3 – Condições de contorno do canal simulado.

Para definir onde se encontram os limites sólidos do canal (linha contínua na Figura 3.3), diferenciando-os das regiões de líquido onde ocorre o escoamento de propagação da onda, são atribuídas condições de contorno de não deslizamento (ou velocidade nula) nas arestas representativas do fundo do canal e da extremidade final do canal (parede direita), assim como nas quatro arestas que delimitam a posição da placa submersa. Esta condição de contorno indica que nestas regiões a componente de velocidade normal é nula e que não há transporte de massa através destas faces.

Como um canal de ondas é uma estrutura aberta deve-se representar essa condição no domínio computacional, o que é feito com a condição de contorno de pressão atmosférica. Esta condição foi aplicada à aresta superior do canal e à parte da aresta lateral esquerda do canal situada acima do nível médio da água, acima do gerador de ondas, representadas por uma linha traço-ponto na Figura 3.3.

No FLUENT, estas condições de contorno são nomeadas como parede (*wall*), para condição de não deslizamento e impermeabilidade, e pressão de saída (*pressure outlet*), para condição de pressão atmosférica.

Para a simulação do movimento da onda aplicou-se, na aresta correspondente ao gerador de ondas, a condição de contorno de velocidade dependente do tempo ($v(x, z, t)$ – *velocity inlet*). Neste recurso é possível utilizar uma função definida pelo usuário (UDF – *User Defined Function*), escrita em linguagem C, para impor a variação de velocidade horizontal (expressão (3.12)) e vertical (expressão (3.13)) ao fluido (Horko, 2007; Barreiro, 2009; Gomes, 2010; Ramalhais, 2011). Sendo assim, o controle desse movimento é feito de acordo com as características da onda que se deseja simular, resultando em um perfil de elevação da superfície equivalente ao descrito pela expressão (3.11).

Um procedimento complementar à definição das condições de contorno, é a delimitação das regiões que estarão preenchidas por cada uma das fases. No presente estudo, utilizou-se uma profundidade da lâmina de água no canal de 0,60 m, assim a condição de contorno de velocidade dependente do tempo, que simula o gerador de ondas, foi aplicada, na respectiva aresta, apenas até esta altura, impondo as componentes de velocidade da onda somente à fase de líquido (água).

3.2.4 Parâmetros de simulação

Com as condições de contorno definidas é preciso ajustar os esquemas numéricos que são os parâmetros que delimitam como o FLUENT soluciona as equações durante a simulação numérica.

Para a solução das equações de transporte utilizou-se a formulação transiente segundo o esquema *Upwind* de primeira ordem. Com isso, as quantidades em todas as faces dos volumes são calculadas supondo que o centro do volume de controle, para um campo variável, representa um valor médio ao longo de todo o volume, assim mantendo todas as características ao longo deste (Iahnke, 2010).

Ainda em relação à solução das equações da conservação da massa e quantidade de movimento, foram adotados os fatores de sub-relaxação da solução de 0,3 e 0,7, respectivamente.

No método VOF foi adotada a formulação explícita, dessa forma os fluxos nas faces são interpolados na interface de acordo com o esquema de reconstrução geométrica (*Geo-reconstruct*). O esquema de reconstrução geométrica, cuja forma da interface é apresentada na Figura 3.4, representa a interface entre os fluidos através de uma abordagem linear por partes (*piecewise-linear*). No FLUENT, este regime é o mais preciso, sendo aplicável para as malhas estruturadas e não estruturadas (Iahnke, 2010).

O primeiro passo no esquema da reconstrução geométrica é o cálculo da posição da interface linear em relação ao centro de cada volume parcialmente cheio, com base em informações sobre a fração de volume e suas derivadas na célula. O segundo passo é calcular o montante de advecção de cada uma das fases, através da representação de cada interface computadorizada linearmente e das informações sobre a distribuição de velocidades normal e tangencial na face. O terceiro passo é calcular a fração de volume em cada célula, utilizando o balanço dos fluxos calculados durante a etapa anterior (Gomes, 2010).

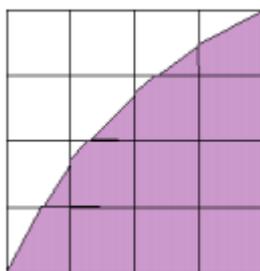


Figura 3.4 – Representação da interface pelo esquema de reconstrução geométrica.

A pressão e a velocidade são determinadas no centro dos volumes, porém é necessário interpolar os valores de pressão para as suas faces. Para tal, utilizou-se o esquema PRESTO (do inglês, *PREssure STaggering Option*) que emprega um balanço discreto da continuidade para o escalonamento do volume de controle, na face em que a pressão é computada, e é adequado para modelagem de escoamentos com superfície livre (Ramalhais, 2011).

Para o acoplamento pressão-velocidade foi adotado o método PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), cuja relação de aproximação entre as correções para a pressão e velocidade possui um grau mais elevado que os métodos SIMPLE e SIMPLEC, pois emprega duas correções a mais do que estes: a correção da vizinhança e a correção da assimetria (Gomes, 2010).

Na Tabela 3.1 tem-se um resumo de todos os parâmetros e esquemas numéricos empregados nas simulações deste estudo.

Tabela 3.1 – Parâmetros de simulação adotados.

Formulação	Parâmetro adotado
	Transiente
Solução no tempo	Formulação implícita de 1 ^a ordem Baseado na pressão Avanço não iterativo no tempo
Modelo VOF	Formulação explícita
	Método de acoplamento pressão-velocidade: PISO
Controle da solução	Método de discretização da pressão: PRESTO! Formulação da quantidade de movimento: <i>Upwind</i> de 1 ^a ordem Esquema de discretização da fração geométrica: <i>Geo-reconstruct</i>

3.2.5 Discretização temporal

De acordo com FLUENT (2007), no sistema de solução segregado o erro total de discretização do tempo é determinado pela escolha da discretização temporal (isto é, primeira ordem e segunda ordem) e pela forma com que as soluções avançam à próxima etapa

(esquemas de avanço do tempo). Existem duas formas de aproximação para o avanço do tempo: iterativo e não iterativo.

No esquema iterativo, todas as equações são resolvidas iterativamente, para um determinado passo de tempo, até que os critérios de convergência sejam satisfeitos. Desta forma, o avanço da solução em um passo de tempo exige um esforço computacional considerável devido ao grande número de iterações externas executadas em cada passo de tempo (FLUENT, 2007).

Já o esquema de avanço não-iterativo (NITA – *Non-Iterative Time-Advancement*), utilizado no presente estudo, visa preservar a precisão total no tempo, assim, ao invés de reduzir o erro a zero, limita este a mesma ordem do erro de truncamento. O esquema NITA, não precisa de repetições exteriores, realizando uma única iteração exterior por passo de tempo o que reduz significativamente o tempo computacional de simulações transientes (FLUENT, 2007).

Um parâmetro importante para a precisão dos resultados de uma simulação numérica é a definição do passo de tempo. O uso de valores inadequados pode provocar a perda de informação e a não convergência das soluções (Barreiro, 2009). O passo de tempo utilizado em todas as simulações deste estudo foi de 0,001 s, sendo um valor adequado para independência de discretização temporal dos resultados (Gomes, 2010). O tempo computacional médio das simulações foi de 6 horas.

3.3 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Semelhante ao que ocorre com modelos físicos, que em geral são uma representação em escala de um protótipo, os modelos computacionais, muitas vezes, são construídos em escala reduzida, também chamada de escala de laboratório.

Esse é um recurso bastante usado para pesquisa e desenvolvimento de projetos de engenharia, sendo essencial para validação de estudos por métodos computacionais, pois os modelos físicos de laboratório fornecem dados para validação do estudo numérico. Por outro lado, as equações do modelo matemático, em sua forma analítica, proporcionam a verificação do modelo em relação à base teórica do estudo.

Nesta seção são apresentados estes dois procedimentos.

3.3.1 Verificação do modelo

No processo de verificação do modelo, a simulação numérica foi realizada sem a presença da placa no domínio do canal e empregando uma onda com altura $H = 0,06$ m, período $T = 1,50$ s e profundidade $h = 0,60$ m. Uma vez que esta se enquadra na teoria de Stokes de segunda ordem é possível utilizar a expressão (3.11) para comparar os resultados numéricos obtidos pela simulação com os analíticos resultantes da série temporal.

Na Figura 3.5 são apresentados os resultados numéricos obtidos em $x = 5$ m juntamente com os da série temporal com ajuste de fase para que se possa avaliar a concordância entre os dois perfis. Os dados apresentados correspondem a um intervalo de tempo no qual a onda encontra-se estabilizada, ou seja, são omitidos os instantes iniciais, quando existe a influência de efeitos de inércia no processo de formação da onda; e os instantes finais, quando a onda passa a sofrer os efeitos de sua propagação refletida no fim do canal. A diferença média entre os dois perfis foi de 2,5 % no intervalo de sete períodos de onda, verificando o modelo computacional adotado.

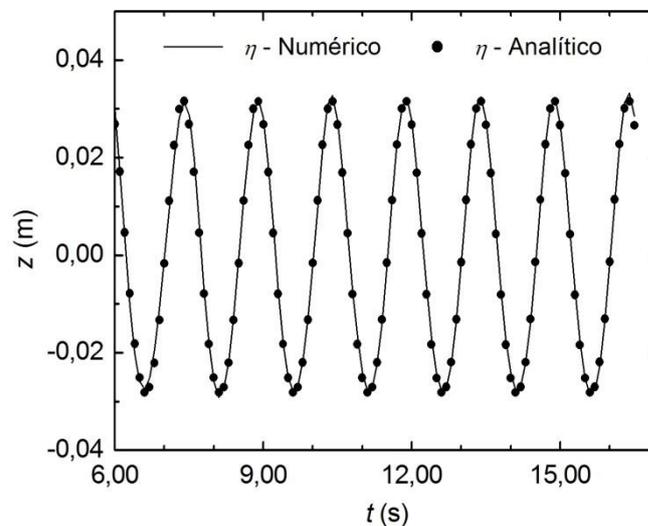


Figura 3.5 – Comparação entre os perfis de elevação da onda analítico e numérico.

Outra forma de verificar o modelo numérico é através da comparação dos perfis de velocidade sob a superfície livre, assim obtém-se uma investigação completa do comportamento hidrodinâmico do modelo. Para isso são comparados os perfis de velocidade numérico e analítico em quatro diferentes tempos de propagação da onda: i) $t = T$, para

velocidades sob a crista ($\eta = h + H/2$); ii) $t = T/4$, para velocidades de zero descendente ($\eta = h$); iii) $t = T/2$, para velocidades sob a cava ($\eta = h - H/2$); iv) $t = 3T/4$, para velocidades de zero ascendente ($\eta = h$). Estes perfis são dados nas direções horizontal (u) e vertical (w) pelas expressões (3.12) e (3.13).

As Figuras 3.6(a) e 3.6(b) mostram os perfis de velocidade numérico e analítico de u e w , respectivamente, em função da profundidade da água para os quatro instantes mencionados. Percebe-se uma boa concordância dos resultados, especialmente para os instantes de tempo $t = T$ e $T/2$ (crista e cava), onde as diferenças encontradas para perfis de velocidade na direção x foram menores do que 1% (Figura 3.6(a)). A única exceção observada foi para o perfil de velocidade na direção x em $t = 3T/4$ (Figura 3.6(a)), onde o resultado numérico superestima a magnitude da velocidade. No entanto, neste instante de tempo específico, a magnitude da velocidade é quase nula e, certamente, as diferenças encontradas entre as soluções numérica e analítica não afetam significativamente o comportamento global do escoamento.

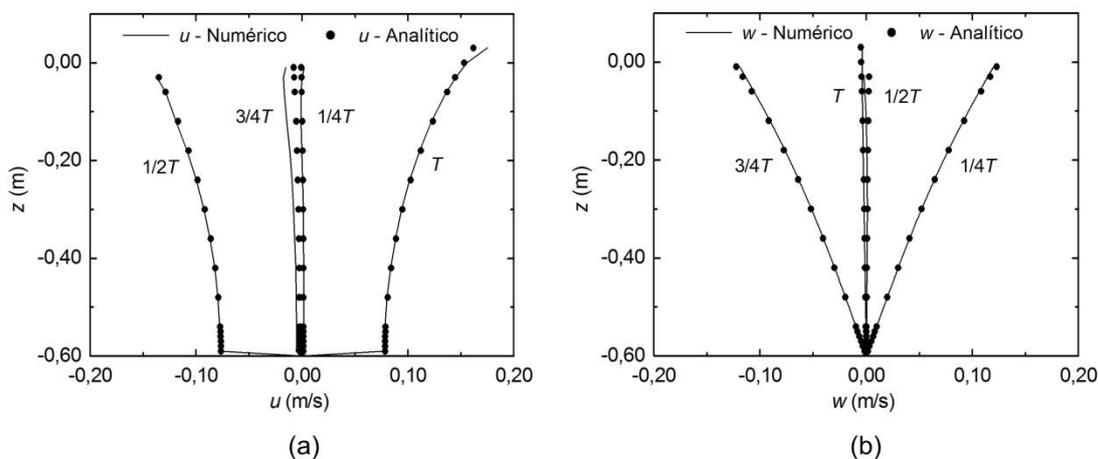


Figura 3.6 – Comparação entre os perfis de velocidade analítico e numérico para u e w sob a superfície da onda.

Sendo assim, é possível considerar que a verificação do modelo numérico foi bem sucedida para a simulação da propagação da onda no canal. Outra observação importante, diz respeito às diferenças de velocidade percebidas próximo ao fundo (Figura 3.6(a)), pois estas demonstram a imposição da condição de contorno de não deslizamento aplicada na parte inferior do canal em que a velocidade para $z = -0,60$ m deve ser nula.

3.3.2 Validação do modelo

Para realizar a validação do modelo numérico foi simulado um caso com as mesmas características geométricas de um dos modelos de laboratório apresentados no trabalho de Orer e Ozdamar (2007), que desenvolveram um estudo experimental sobre a eficiência do conversor de placa submersa. Neste estudo, os autores abordaram diversos arranjos geométricos da placa submersa sujeita a uma ampla faixa de períodos e alturas de onda.

Dentre os casos investigados por Orer e Ozdamar (2007), foi escolhido o modelo cuja altura relativa da placa ($X = H_p/h$) era $X = 86,7 \%$, submetido a duas ondas de períodos diferentes $T = 1,50 \text{ s}$ e $T = 1,87 \text{ s}$ e mesma altura $H = 0,06 \text{ m}$. O canal de ondas reproduzido possuía $40,00 \text{ m}$ de comprimento e $1,00 \text{ m}$ de altura, com a placa centralizada no canal e profundidade da água $h = 0,60 \text{ m}$. Os resultados observados nos experimentos e utilizados para comparação foram medidas da velocidade máxima do escoamento abaixo da placa em sentido contrário ao de propagação da onda ($-x$) em um ponto situado à metade da distância entre a placa e o fundo do canal. Os resultados desse estudo foram obtidos com incerteza de $\pm 2 \%$.

Na Tabela 3.2 é apresentada a comparação entre os resultados de velocidade máxima do escoamento abaixo da placa na direção $-x$ obtidos nos modelos numérico e experimental. Observa-se que no caso de $T = 1,50 \text{ s}$, o modelo numérico apresentou uma magnitude de velocidade aproximadamente 12% menor que o experimento, enquanto no caso de $T = 1,87 \text{ s}$ a magnitude da velocidade foi superestimada na mesma ordem.

Tabela 3.2 – Comparação entre os resultados numérico e experimental da velocidade u (cm/s).

Caso	T (s)	H (m)	u (cm/s) experimental	u (cm/s) numérico	Erro relativo (%)
1	1,50	0,06	-9,44	-8,34	-11,67
2	1,87	0,06	-11,39	-12,72	11,74

Uma possível explicação para as diferenças encontradas, pode estar relacionada às dificuldades de reproduzir o experimento exatamente como descrito no artigo, haja vista que as ondas simuladas numericamente são geradas a partir das equações de Stokes de 2ª ordem e cujas características são, portanto, previamente determinadas para serem inseridas no modelo. Por sua vez, os resultados experimentais descrevem as ondas a partir de

características ajustadas no gerador de ondas (T e H) e apresentam o comprimento de onda (L) como uma medida efetuada durante o experimento, entretanto com valores discordantes dos previstos pela teoria de ondas (tanto linear, quanto Stokes de 2^a ou 3^a ordem).

Contudo, a magnitude das velocidades numérica e experimental apresentou uma concordância razoável e, também, o procedimento de verificação da geração de ondas demonstrou a concordância do modelo com a teoria de ondas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente estudo do conversor de placa submersa contempla três avaliações distintas a cerca da eficiência do escoamento sob a placa. Cada uma destas avaliações consistiu de um conjunto de simulações numéricas realizadas a partir do modelo computacional descrito anteriormente.

Vale destacar que a proposta de análise da eficiência do conversor, diz respeito apenas a uma relação entre potência da onda incidente e potência do escoamento abaixo da placa, ou seja, não estão sendo consideradas perdas de carga representativas de uma turbina. Dessa forma, os resultados apresentados fornecem uma quantificação do desempenho baseado somente no princípio de funcionamento do conversor.

Neste capítulo são apresentados inicialmente os parâmetros em torno dos quais foram desenvolvidas as avaliações. Em seguida, é apresentada a primeira avaliação acerca da influência da altura da placa (H_P) sobre a eficiência. Do mesmo modo, segue-se a avaliação da influência do comprimento da placa (L_P) e, por fim, a avaliação do período da onda incidente, também relacionados à eficiência do conversor.

4.1 PARÂMETROS ANALISADOS

Cada uma das avaliações realizadas se desenvolveu com base em um comparativo estabelecido entre os casos estudados, no qual o principal parâmetro analisado foi a eficiência do conversor. Entretanto, tendo em vista a caracterização do funcionamento do mesmo, foram analisados mais dois parâmetros: velocidade u máxima e vazão mássica RMS (*Root Mean Square*).

A seguir tem-se a descrição de cada um destes parâmetros quanto a forma de obtenção dos dados e o pós-processamento realizado. Vale destacar que os dados foram obtidos com $\Delta t = 0,05$ s e o passo de tempo utilizado nas simulações foi de 0,001 s.

4.1.1 Velocidade u máxima

Em cada um dos casos foram coletados valores de velocidade (u) por meio de 11 pontos de monitoramento centralizados abaixo do dispositivo de placa submersa e distribuídos ao longo da altura H_P (Figura 4.1). Estes pontos funcionam como sensores

numéricos e são configurados, através de um recurso do FLUENT chamado de “*surface monitors*”, para armazenar diferentes tipos de dados. Neste estudo, os dados monitorados foram da componente horizontal de velocidade u .

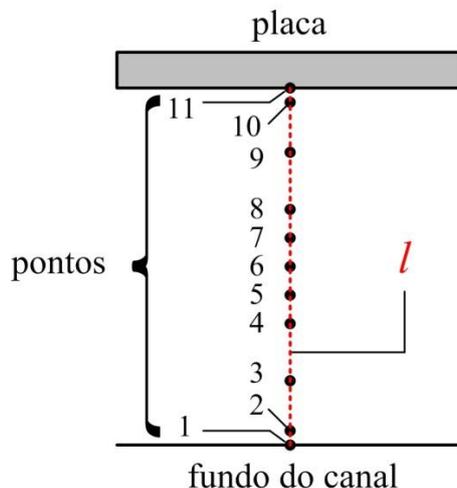


Figura 4.1 – Distribuição dos monitores numéricos abaixo do conversor.

A partir dos dados obtidos destes monitores foram definidas duas formas de comparação: velocidade máxima no ponto central $p6$ e perfis de velocidade máxima.

Com os dados obtidos no ponto central ($p6$) procedeu-se o seguinte: excluir os dados fora do intervalo de tempo compreendido entre $3T$ e $11T$ (onde T é o período de onda); localizar o maior valor de “ $+u$ ” e de “ $-u$ ”; determinar o instante de tempo em que estes valores ocorreram. A exclusão dos dados anteriores a $3T$ se deve ao transiente de formação da onda no início do canal, já em relação aos dados posteriores a $11T$, ao fenômeno de reflexão da onda na parte final do canal.

Para a composição dos perfis de velocidade máxima, foram utilizados os dados, de todos os pontos, registrados no mesmo instante de tempo em que ocorrera a velocidade máxima no ponto $p6$. A composição dos perfis de velocidade $+u$ e $-u$ permite uma visualização do efeito pulsante do escoamento sob a placa submersa.

4.1.2 Vazão mássica RMS

Além dos pontos de monitoramento, a Figura 4.1 apresenta também uma linha (l) colocada na mesma região, a qual foi utilizada para obtenção de valores de vazão mássica a cada instante de tempo. Como alternativa para se obter um valor representativo da

quantidade de massa que é deslocada ao longo do tempo, conforme o escoamento abaixo da placa muda de sentido, adotou-se o cálculo da média quadrática RMS.

O cálculo da média quadrática RMS foi aplicado ao conjunto de dados, obtidos desse monitor, contidos no intervalo de tempo de $3T$ a $11T$. Os resultados dessa média proporcionam outro parâmetro para os comparativos realizados em cada avaliação.

4.1.3 Eficiência do dispositivo

Para o cálculo da eficiência do conversor (expressão (3.15)) é necessário determinar a potência disponível do escoamento abaixo da placa (expressão (3.16)). Sendo assim, além dos dados de velocidade u são necessários ainda dados de pressão do escoamento.

Com isso, os mesmos pontos de monitoramento da velocidade u , apresentados na Figura 4.1, foram utilizados também para monitorar a pressão estática. Do total de dados de pressão estática e velocidade u obtidos, foram utilizados no cálculo da eficiência somente os valores contidos no intervalo de tempo entre $5,2T$ e $7,2T$. A definição deste intervalo se deu com base em observações dos dados de elevação da onda na região anterior à placa submersa, que levaram à conclusão de que neste intervalo o escoamento abaixo da placa apresentaria pouca ou nenhuma influência dos efeitos de reflexão da onda no dispositivo, com subsequente retorno da mesma à região de geração da onda, além da reflexão no final do canal.

4.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ALTURA DA PLACA SUBMERSA

Nesta etapa do estudo foram realizadas seis simulações variando-se a altura do conversor de placa submersa em relação ao fundo, enquanto as características da onda incidente e as dimensões do canal e da placa foram mantidas invariáveis ao longo da avaliação.

A seguir são apresentadas todas as características analisadas.

4.2.1 Características simuladas

As dimensões da placa, nessa avaliação, foram fixadas como: $L_P = 1,00$ m, $e_P = 0,02$ m. Além destas, as dimensões do canal também foram fixadas em $L_C = 20,00$ m e $H_C = 1,00$ m, conforme Figura 4.2.

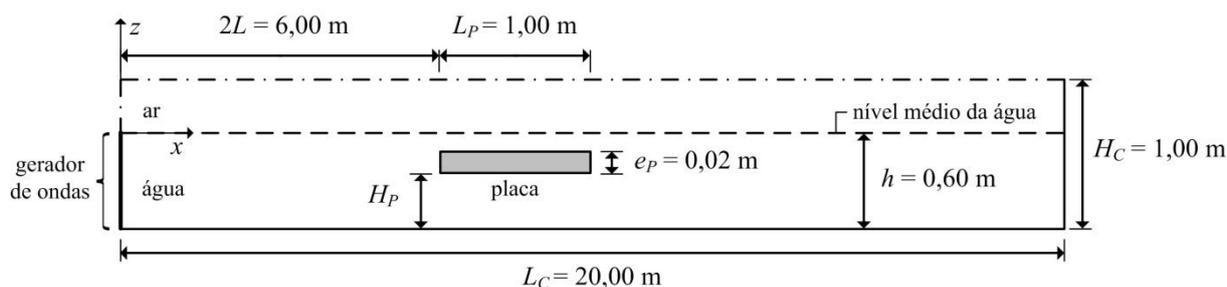


Figura 4.2 – Dimensões do domínio computacional para avaliação da altura H_P .

Já as características da onda incidente no conversor constam na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características da onda incidente na placa para avaliação da altura H_P .

Característica	Dimensão
Altura de onda (H)	0,06 m
Período de onda (T)	1,50 s
Comprimento de onda (L)	3,00 m
Profundidade da água (h)	0,60 m

Conforme descrito na seção 3.2.1 o posicionamento da aresta frontal da placa no canal de ondas foi definido como duas vezes o comprimento de onda ($2L$), assim, a placa foi posicionada a 6,00 m da aresta esquerda do canal onde a onda é gerada (ver Figura 4.2).

Tendo em vista estabelecer uma relação adimensional da área livre abaixo da placa, e, conseqüentemente do seu posicionamento, as alturas H_P foram divididas pela profundidade da lâmina de água (h), resultando no parâmetro chamado de altura relativa (X). A sequência de simulações e os respectivos parâmetros de cada uma delas são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Relação dos casos simulados na avaliação da altura da placa.

Caso	Altura da placa H_P (m)	Altura relativa X (%)
1	0,46	76,7
2	0,48	80,0
3	0,50	83,3
4	0,51	85,0
5	0,52	86,7
6	0,53	88,3

Para cada um dos casos foram coletados os valores de velocidade u e pressão estática por meio de 11 pontos de monitoramento centralizados abaixo da placa, conforme Figura 4.1. A posição vertical de cada ponto, em coordenadas de z , é dada para cada caso na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Posicionamento dos pontos de monitoramento abaixo da placa (coordenadas z).

Ponto	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
	z (m)					
11	-0,140	-0,120	-0,100	-0,090	-0,080	-0,070
10	-0,160	-0,140	-0,120	-0,110	-0,100	-0,090
9	-0,220	-0,200	-0,190	-0,180	-0,180	-0,170
8	-0,290	-0,280	-0,270	-0,260	-0,260	-0,250
7	-0,330	-0,320	-0,310	-0,300	-0,300	-0,290
6	-0,370	-0,360	-0,350	-0,345	-0,340	-0,335
5	-0,410	-0,400	-0,390	-0,390	-0,380	-0,380
4	-0,450	-0,440	-0,430	-0,430	-0,420	-0,420
3	-0,520	-0,520	-0,510	-0,510	-0,500	-0,500
2	-0,580	-0,580	-0,580	-0,580	-0,580	-0,580
1	-0,600	-0,600	-0,600	-0,600	-0,600	-0,600

Além destes, os valores de vazão mássica também foram coletados e pós-processados conforme descrito na seção anterior (ver Figura 4.1). Para esta avaliação foram simulados em cada caso 20 s de escoamento, durante os quais foram coletados os dados necessários aos comparativos com $\Delta t = 0,05$ s.

4.2.2 Comparativos

Na Figura 4.3 são apresentados os perfis de velocidade máxima no sentido de propagação da onda e no sentido oposto para os seis casos simulados. É possível perceber que a magnitude das velocidades é maior no sentido oposto à propagação da onda e que a diminuição da altura relativa acarreta um aumento significativo da velocidade $+u$ para $X = 80,0$ % e $X = 76,7$ %. Esse acréscimo também pode ser observado nos valores absolutos da velocidade $-u$, quando $88,3 > X > 80,0$ %, porém em menor proporção. Observa-se, ainda, que essas variações na magnitude das velocidades não modificam significativamente o formato dos perfis.

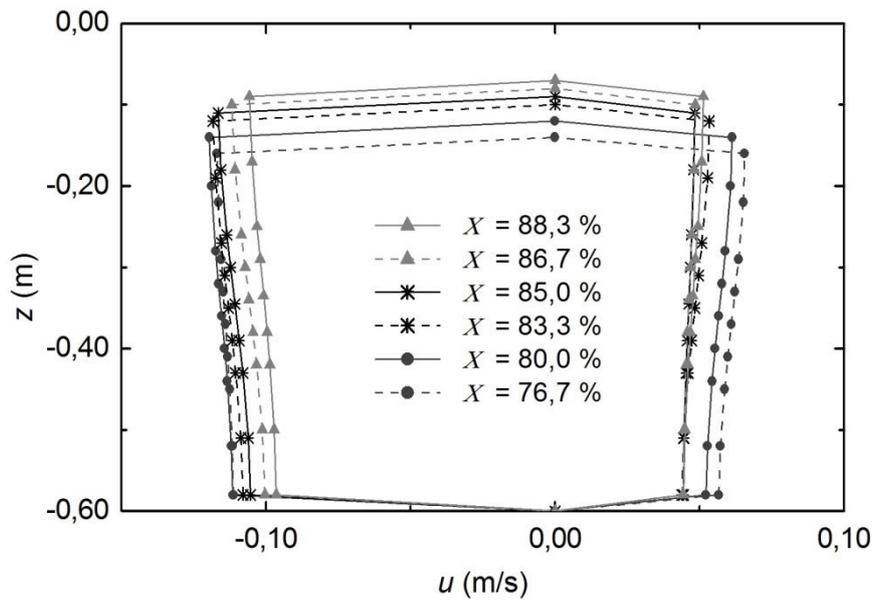


Figura 4.3 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob o dispositivo para cada X estudado.

A Figura 4.4 apresenta as velocidades máximas, no sentido oposto à propagação da onda para cada caso, obtidas em três pontos centrais ($p4$, $p6$ e $p8$ – ver Figura 4.1) selecionados entre os sensores numéricos já mencionados.

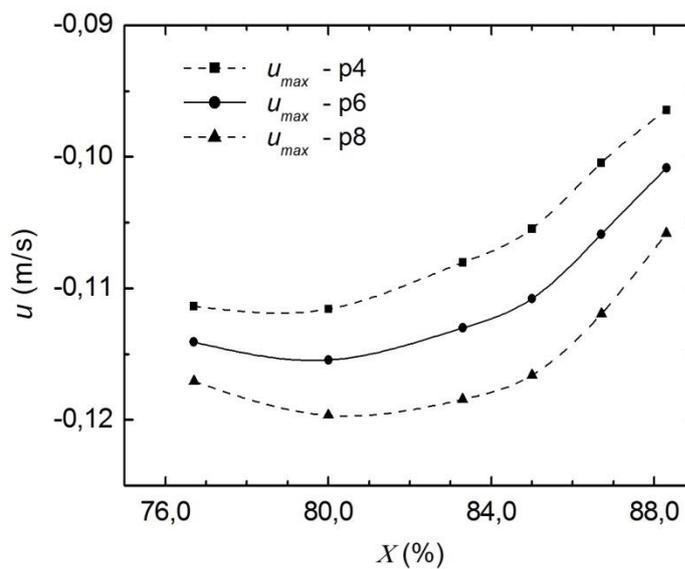


Figura 4.4 – Velocidades u_{max} sob o dispositivo nos pontos $p4$, $p6$ e $p8$ para cada X estudado.

Na Figura 4.4, é possível observar a ocorrência de uma velocidade máxima em valor absoluto para $X = 80,0\%$ em todos os pontos monitorados.

A vazão mássica RMS é apresentada na Figura 4.5, onde se percebe que à medida que a altura relativa (X) da placa aumenta a vazão sob a placa também aumenta. Esse comportamento era esperado, já que decorre do aumento da área sob a placa submersa. As variações mais significativas podem ser observadas para $X < 80,0\%$ e $X > 86,7\%$.

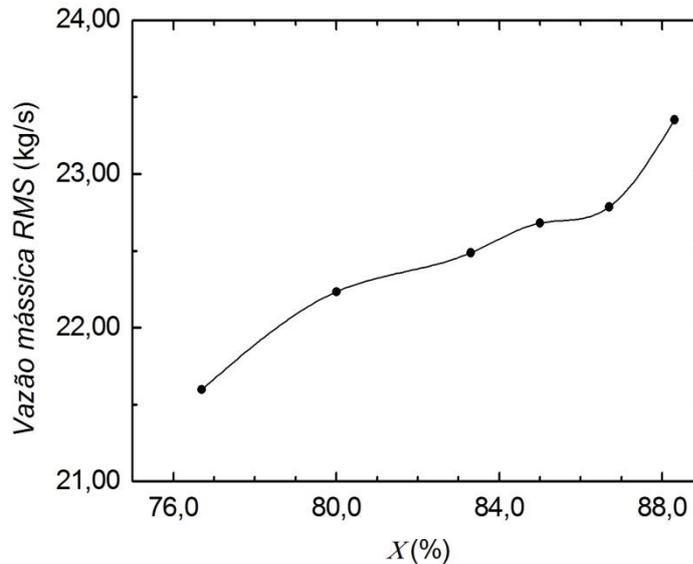


Figura 4.5 – Média quadrática RMS da vazão mássica sob o dispositivo para cada X estudado.

Já a Figura 4.6 apresenta a eficiência do conversor de placa submersa onde, facilmente, percebe-se um valor mínimo registrado para $X = 83,3\%$. À direita, com o aumento de X em 5% , tem-se um crescimento da eficiência de até 14% . Enquanto isso, à esquerda, com uma redução de X em 6% , tem-se um acréscimo da mesma ordem.

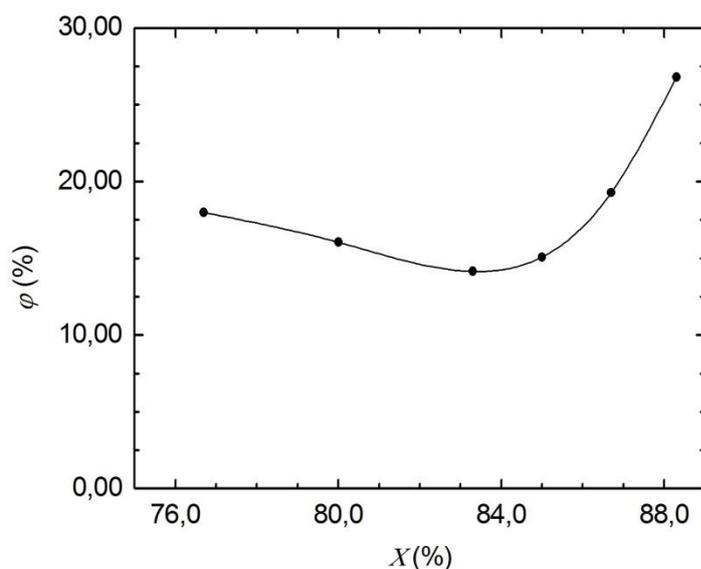


Figura 4.6 – Eficiência do conversor de placa submersa para cada X estudado.

4.2.3 Estudo de Caso: X = 83,3 %

Dentre os casos simulados, selecionou-se o caso que apresentou menor eficiência, onde $X = 83,3 \%$, para realizar uma avaliação do efeito que a redução da área livre abaixo da placa submersa acarretaria em relação à potência disponível no escoamento sob a mesma, sem modificar a altura H_p .

Para tanto, as dimensões do canal e da placa submersa foram mantidas constantes, variando-se apenas a razão de abertura (Y) com a inclusão de uma restrição abaixo da placa, conforme Figura 4.7. A razão de abertura Y é dada pela relação entre a altura livre sob a placa submersa (A_L) e a profundidade da água (h), portanto $Y = A_L/h$. As características da onda simulada também foram mantidas para que se pudesse estabelecer a comparação.

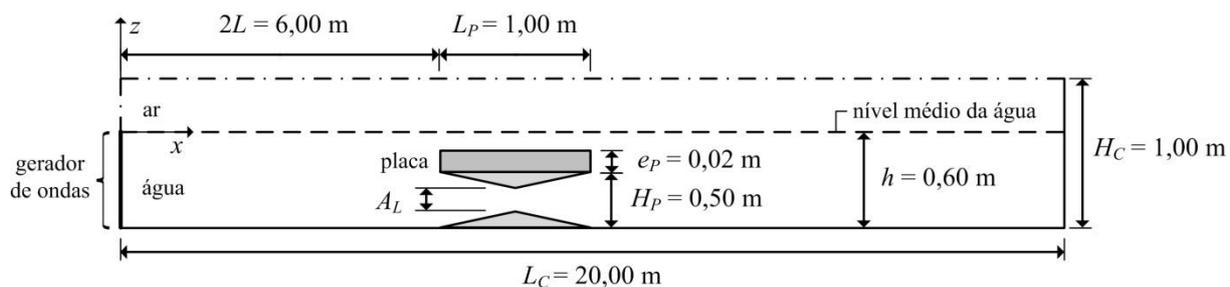


Figura 4.7 – Características do domínio computacional para avaliação do caso $X = 83,3 \%$.

A partir deste caso, foram simuladas duas situações com diferentes razões de abertura Y , onde a restrição inserida abaixo da placa possuía formato triangular simétrico (ver Figura 4.7), de modo que Y foi determinado segundo a altura livre (A_L) medida entre os vértices dos triângulos. Para o caso analisado, em que $X = 83,3 \%$, as dimensões de H_P e A_L coincidem, assim os valores de X e Y são idênticos para a situação em que nenhuma restrição é colocada sob a placa submersa. A Tabela 4.4 apresenta as relações de Y avaliadas nesse estudo de caso.

Tabela 4.4 – Relação dos casos simulados na avaliação da razão de abertura Y .

Caso	Altura livre A_L (m)	Razão de abertura Y (%)
I	0,50 ^a	83,3
II	0,32	53,3
III	0,12	20,0

^a Sem restrição.

Para a análise da velocidade horizontal do escoamento (u) sob a placa tomou-se como referência a velocidade obtida no ponto central ($p6$) da abertura. É possível observar, conforme a Figura 4.8, que a redução da área abaixo da placa levou a um incremento significativo na magnitude da velocidade do escoamento nessa região.

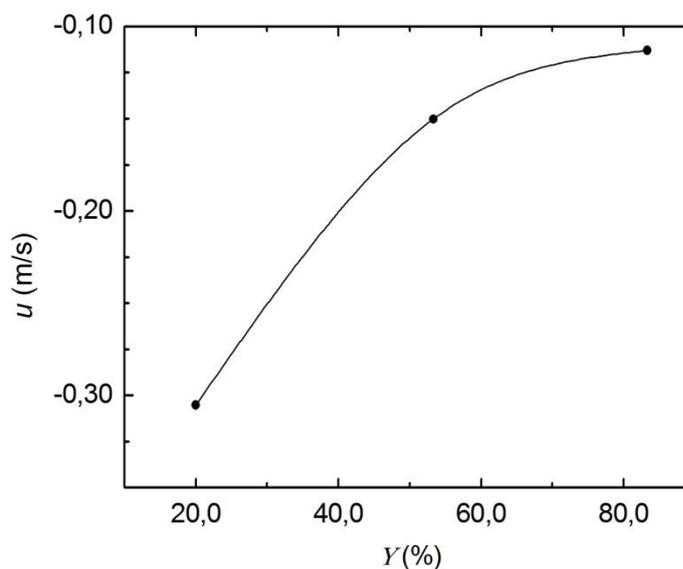


Figura 4.8 – Velocidades u_{max} sob o dispositivo no ponto $p6$ para cada Y do estudo de caso $X = 83,3 \%$.

Na Figura 4.8, percebe-se que entre os casos II ($Y = 53,3 \%$) e III ($Y = 20,0 \%$) a velocidade do escoamento aumenta em duas vezes. Já do caso I, sem restrição, para o caso III há um aumento de aproximadamente três vezes nesse parâmetro. A velocidade do escoamento é importante do ponto de vista de conversão de energia, pois serve como propulsão para a turbina, no entanto é necessário avaliar a quantidade de massa deslocada.

Com a análise da vazão mássica RMS, conforme Figura 4.9, percebe-se que este parâmetro tem um comportamento inverso ao da velocidade, o que já era esperado.

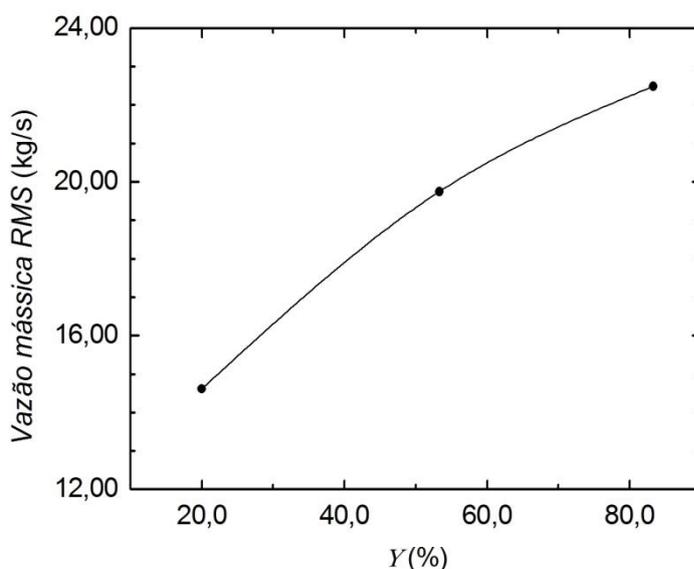


Figura 4.9 – Média quadrática RMS da vazão mássica sob o dispositivo para cada Y do estudo de caso $X = 83,3 \%$.

Na Figura 4.9, observa-se que essa redução da vazão mássica RMS ficou na ordem de 30 % entre o caso I (sem restrição) e o caso III ($Y = 20 \%$), sendo, portanto, menor que o incremento da velocidade, entre os mesmos casos, que foi de aproximadamente 300 %.

É possível estabelecer, de forma intuitiva, uma analogia do comportamento desses parâmetros com relação à redução da seção transversal de um duto, exceto pela não linearidade das relações de proporcionalidade observadas. Isso se deve a complexidade desse escoamento, que envolve significativas dissipações de energia relacionadas às transformações sofridas pela onda durante sua propagação através do equipamento. Sendo assim, uma avaliação mais apurada da potência disponível do escoamento em cada caso, permite a visualização da influência desses efeitos sobre a eficiência do dispositivo.

Com base nos resultados apresentados na Figura 4.10, percebe-se, então, que embora a velocidade tenha aumentado significativamente, a diminuição da área determinou a

redução da potência disponível sob a placa. Em outras palavras, a redução da abertura abaixo da placa, que foi da ordem de 63 % entre o caso I e o caso III, levou a uma queda de aproximadamente 6,2 % na eficiência do dispositivo.

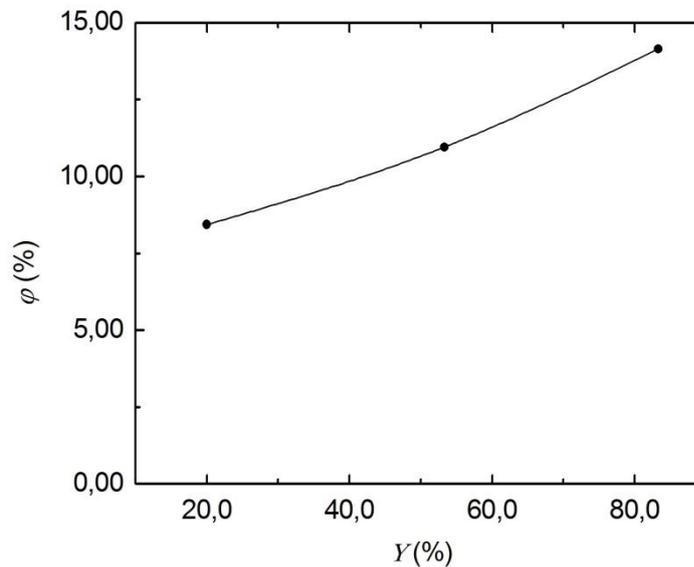


Figura 4.10 – Eficiência do conversor de placa submersa para cada Y do estudo de caso $X = 83,3$ %.

Uma observação importante, no cálculo da potência média disponível (P_P – ver expressão (3.16)), é avaliar a importância do parâmetro velocidade do escoamento sobre P_P , uma vez que este é responsável pelos efeitos cinéticos do escoamento. Essa avaliação revelou que a parcela de potência, devido à energia cinética, chegou a 4 % da potência média disponível no caso III ($Y = 20$ %), onde a restrição foi maior. Já nos casos I e II, não ultrapassou 2 %, evidenciando assim as variações no campo de pressão, devido à dinâmica de propagação da onda, como principal fator na determinação da potência média disponível sob a placa submersa. Vale destacar que essas observações são válidas para a análise das variações da razão de abertura Y simuladas para a altura relativa $X = 83,3$ %.

4.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA PLACA

Para esta avaliação foram realizadas cinco simulações com diferentes comprimentos da placa submersa mantendo as características da onda incidente constantes. As dimensões do canal e a altura relativa da placa (X) foram mantidas fixas nesta avaliação,

sendo a altura relativa escolhida foi a que apresentou melhor resultado de eficiência na avaliação anterior ($X = 88,3\%$).

As características analisadas são apresentadas a seguir.

4.3.1 Características simuladas

Nesta avaliação, as dimensões do canal foram mantidas fixas em $L_C = 20,00$ m e $H_C = 1,00$ m, bem como a espessura da placa submersa em $e_P = 0,02$ m e a altura relativa do dispositivo em $X = 88,3\%$ ($H_P = 0,53$ m – Figura 4.11).

Utilizou-se uma onda incidente no conversor com as mesmas características apresentadas na Tabela 4.1. Com isso, o posicionamento da aresta frontal da placa no canal de ondas também foi mantido em $6,00$ m ($2L$) a partir do gerador de ondas (Figura 4.11).

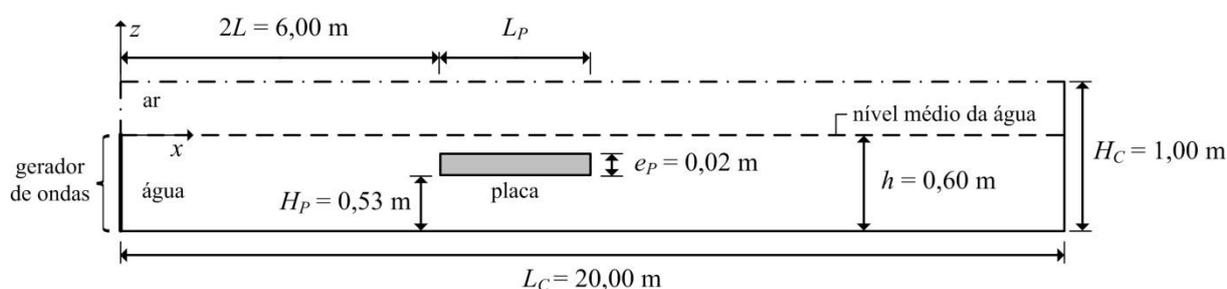


Figura 4.11 – Dimensões do domínio computacional para avaliação do comprimento L_P .

Foi utilizada uma relação adimensional para descrever o comprimento da placa, de forma que, o comprimento da onda incidente ($L = 3,00$ m) foi dividido pelos comprimentos de placa (L_P) simulados. A sequência de simulações numéricas e os respectivos parâmetros de cada uma delas encontram-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Relação dos casos simulados na avaliação do comprimento da placa submersa.

Caso	Comprimento da placa L_P (m)	L/L_P
7	1,00	3,0
8	1,50	2,0
9	2,00	1,5
10	2,50	1,2
11	3,00	1,0

Em cada uma das simulações foram coletados os valores de velocidade u e pressão estática por meio de 11 pontos de monitoramento, os mesmos foram mantidos sempre centralizados abaixo do dispositivo (ver Figura 4.1) independentemente do comprimento. A posição vertical da cada ponto foi mantida em todos os casos, uma vez que a altura relativa da placa (X) não foi variada. As coordenadas em z destes pontos constam na Tabela 4.6.

Os valores de vazão mássica foram coletados pelo monitoramento da linha l (ver Figura 4.1), também mantida centralizada abaixo da placa submersa. Para esta avaliação foram simulados, em cada caso, 20 s de escoamento e coletados dados com $\Delta t = 0,05$ s.

Tabela 4.6 – Posicionamento dos pontos de monitoramento abaixo do dispositivo (coordenadas z) para todos os casos de avaliação de L_P .

Ponto	z (m)
11	-0,070
10	-0,090
9	-0,170
8	-0,250
7	-0,290
6	-0,335
5	-0,380
4	-0,420
3	-0,500
2	-0,580
1	-0,600

4.3.2 Comparativos

Os perfis de velocidade máxima, apresentados na Figura 4.12, no sentido de propagação da onda e no sentido oposto para os cinco casos simulados, reafirmam o efeito pulsante do escoamento sob a placa submersa. Observa-se que a magnitude das velocidades é maior no sentido oposto à propagação da onda.

Na Figura 4.12 pode ser percebido ainda que, nos casos em que L/L_P é maior, o valor absoluto das velocidades aumenta em ambos os sentidos, sendo mais pronunciado no sentido oposto à propagação da onda. É possível observar, ainda, que para $L/L_P < 2,00$ os perfis de velocidade são mais regulares (retilíneos), deixando de apresentar velocidades mais elevadas nos pontos próximos à placa, como as que ocorrem nas curvas $-u$ de $L/L_P \geq 2,00$.

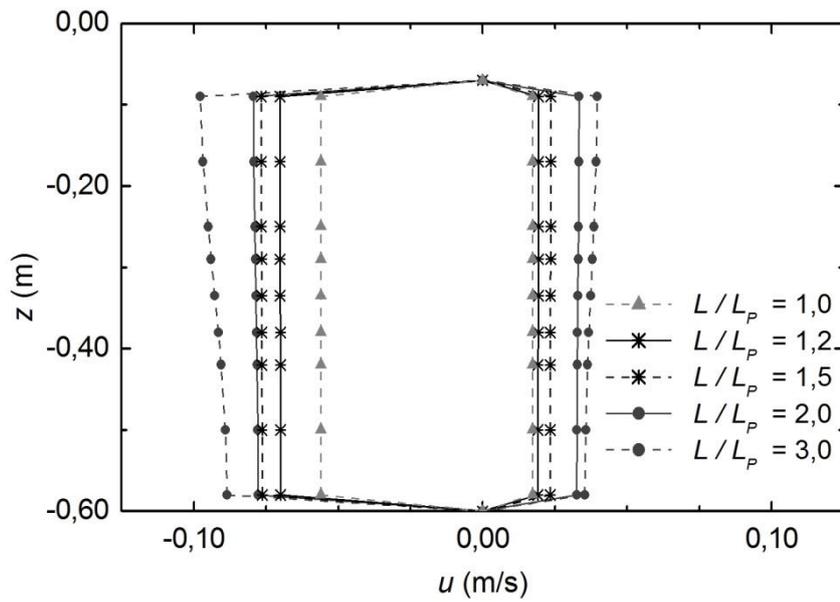


Figura 4.12 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob a placa submersa para cada L/L_P estudado.

Essa regularidade dos perfis de velocidade pode ser observada na Figura 4.13, onde são apresentadas as velocidades máximas obtidas nos pontos $p4$, $p6$ e $p8$.

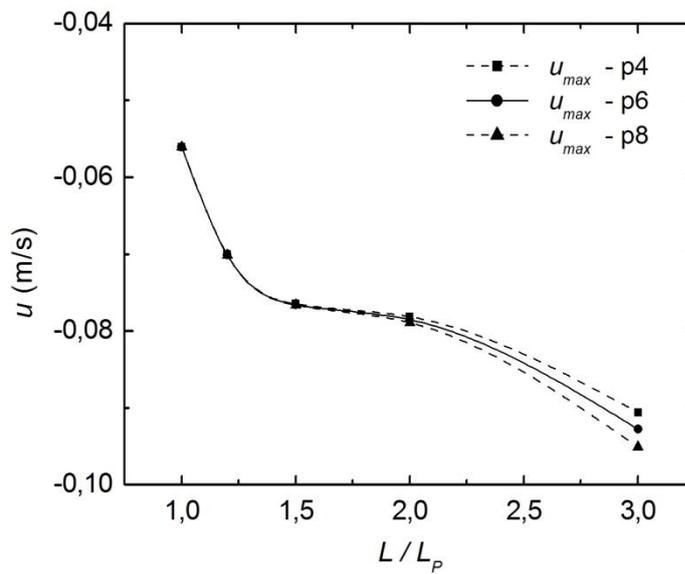


Figura 4.13 – Velocidades $u_{máx}$ sob a placa submersa nos pontos $p4$, $p6$ e $p8$ para cada L/L_P estudado.

Na Figura 4.13 é possível perceber, também, que para $1,20 < L/L_P < 2,00$ a variação da magnitude das velocidades é pequena, enquanto que para $1,00 \leq L/L_P \leq 1,20$ e para $2,00 \leq L/L_P \leq 3,00$ a diferença entre os módulos das velocidades fica em torno de 20 %.

Em termos de vazão mássica (Figura 4.14), a média quadrática RMS dos casos estudados, aponta para a redução da quantidade de massa deslocada, pelo escoamento sob a placa, à medida que o comprimento da placa se aproxima do comprimento da onda incidente. Observa-se ainda que o comportamento da curva de vazão RMS é bastante semelhante ao da velocidade máxima de maneira que as variações mais significativas ocorrem para valores de $L/L_P < 1,50$ e $L/L_P > 2,00$.

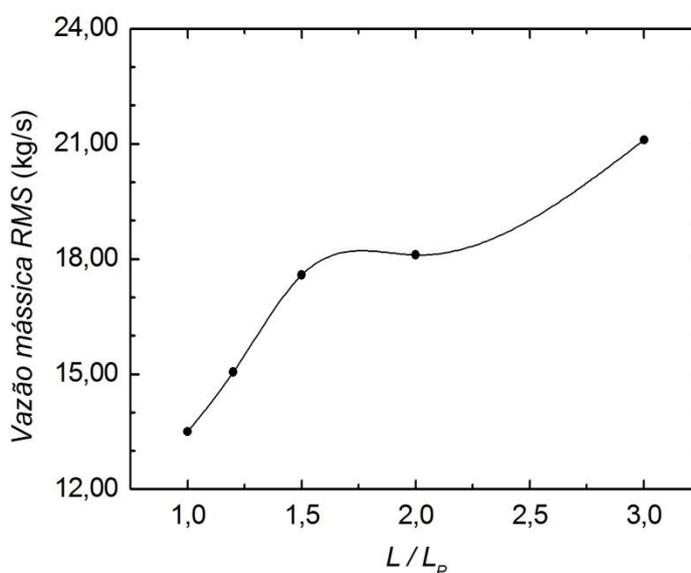


Figura 4.14 – Média quadrática RMS da vazão mássica sob a placa submersa para cada L/L_P estudado.

Na Figura 4.15 são apresentados os valores da eficiência do conversor, onde se percebe que, para as relações L/L_P estudadas, houve uma tendência de estabilização desta em torno de 20 %. Observa-se um decréscimo deste valor apenas para a relação $L/L_P = 1,00$, quando a placa tem comprimento igual ao comprimento de onda, chegando a 16 %.

A redução dos valores absolutos de velocidade, bem como da vazão e eficiência, observada no caso 11 ($L/L_P = 1,00$), decorre provavelmente da maior dissipação da energia da onda incidente para esta relação de comprimentos.

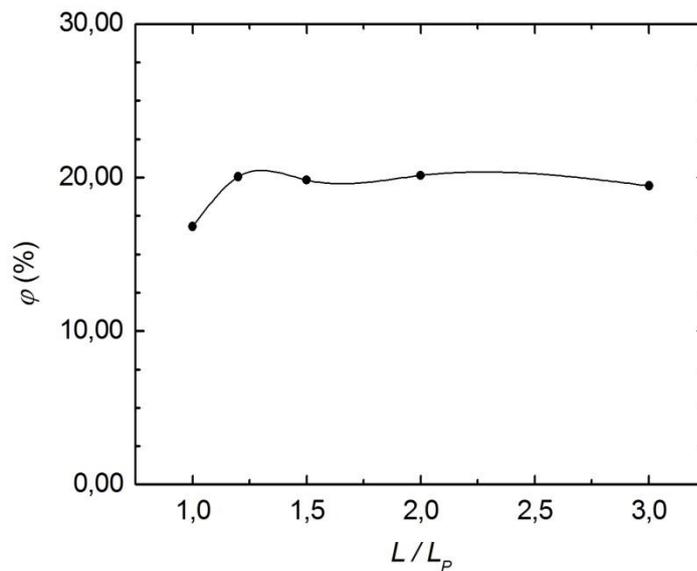


Figura 4.15 – Eficiência do conversor de placa submersa para cada L/L_p estudado.

4.4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO PERÍODO DA ONDA INCIDENTE

Esta etapa do estudo contempla uma avaliação mais ampla do funcionamento do conversor de placa submersa, de forma que foram simuladas seis ondas de diferentes períodos incidindo numa placa submersa com seis diferentes relações de altura relativa, totalizando 36 casos.

A altura de onda (H) e o comprimento da placa (L_p) não foram variados, assim como a altura do canal (H_C) e profundidade da água (h). Já o comprimento do canal e a distância entre a borda frontal da placa e o gerador de ondas foram adaptados às características de cada onda simulada, conforme descrição a seguir.

4.4.1 Características simuladas

Conforme a Figura 4.16, as dimensões do domínio mantidas fixas nesta avaliação foram: a altura do canal $H_C = 1,00$ m, o comprimento da placa $L_p = 2,50$ m, a espessura da placa em $e_p = 0,02$ m e a profundidade da água $h = 0,60$ m.

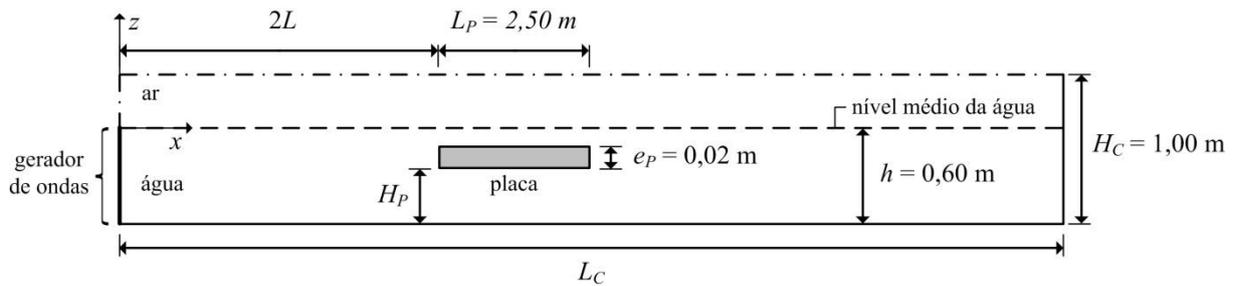


Figura 4.16 – Características do domínio computacional considerado na avaliação do período da onda incidente.

Uma vez que as distâncias entre a borda frontal da placa e o gerador de ondas e entre a borda posterior da placa e a parede final do canal foram definidas em relação ao comprimento da onda incidente, logo o comprimento do canal (L_C) foi ajustado para cada onda simulada. Na Tabela 4.7 são apresentadas as características das ondas simuladas bem como as respectivas relações de L/L_P e os comprimentos do canal de ondas considerado.

Tabela 4.7 – Características das ondas simuladas e comprimento do canal associado.

Onda	T (s)	H (m)	L (m)	L/L_P	L_C (m)
1	1,25	0,06	2,27	0,91	15,80
2	1,50	0,06	2,99	1,20	20,00
3	2,00	0,06	4,36	1,74	28,00
4	2,50	0,06	5,67	2,27	35,70
5	3,00	0,06	6,95	2,78	43,20
6	3,50	0,06	8,21	3,30	50,60

Nesta avaliação, este conjunto de ondas foi submetido a seis diferentes relações de altura relativa da placa, descritas na Tabela 4.8. Resultando, assim, em 36 diferentes combinações de onda incidente e altura relativa.

Em cada um dos casos foram monitorados os dados de velocidade u e pressão estática por meio de 11 pontos centralizados abaixo do dispositivo, bem como dados de vazão mássica por uma linha l também centralizada sob a placa (ver Figura 4.1). A distribuição vertical dos pontos de monitoramento sob a placa seguiu as mesmas coordenadas apresentadas na Tabela 4.3 para cada X simulado. O tempo de escoamento simulado em cada caso foi de $13T$ (onde T é o período de onda) e os dados foram coletados com $\Delta t = 0,05$ s.

Tabela 4.8 – Relação das alturas relativas da placa estudadas.

Placa	Altura relativa X (%)
1	88,3
2	86,7
3	85,0
4	83,3
5	80,0
6	76,7

Vale destacar que a faixa de períodos de onda utilizados nessa parte do estudo, foi definida com base no critério de similaridade de Froude, como forma de possibilitar uma estimativa do desempenho do equipamento sob condições reais de funcionamento.

O critério de Froude estabelece uma relação entre forças de inércia e forças de gravidade para um escoamento de fluido e é definido como (Hughes, 1993):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gB}} \quad (4.1)$$

onde V é a variável de velocidade (m/s), g é a aceleração da gravidade (m/s^2) e B é a variável de comprimento (m).

A partir dessa relação, a escala é criada estabelecendo-se um paralelo entre as dimensões do modelo (índice m) e do caso real (ou protótipo, índice r), assim (Hughes, 1993):

$$\left(\frac{V^2}{gB}\right)_r = \left(\frac{V^2}{gB}\right)_m \quad (4.2)$$

rearranjando:

$$\left(\frac{V_r^2}{V_m^2}\right) = \left(\frac{g_r}{g_m}\right) \left(\frac{B_r}{B_m}\right) \quad (4.3)$$

adimensionalizando cada grandeza:

$$(N_V)^2 = N_g \cdot N_B \quad (4.4)$$

obtem-se uma relação entre as escalas N de cada grandeza, como:

$$\frac{(N_B)^2}{(N_t)^2} = N_g \cdot N_B \quad (4.5)$$

assumindo condições atmosféricas idênticas $N_g = 1$, portanto:

$$N_t = \sqrt{N_B} \quad (4.6)$$

onde N_t representa a escala de tempo e N_B a escala de comprimento.

Sendo assim, com o propósito de analisar ondas na faixa de período de 5 s a 14 s (faixa que compreende características semelhantes às ondas que ocorrem na região de Rio Grande – RS), estabeleceu-se uma escala de comprimento $N_B = 16$; logo, a escala para o tempo foi $N_t = 4$.

Dessa forma, a partir das características das ondas simuladas, apresentadas na Tabela 4.7, é possível determinar as características equivalentes de ondas reais (monocromáticas). Isso pode ser feito, por exemplo, para o período da Onda 3 ($T = 2,00$ s) multiplicando-se esse valor por N_t ($N_t = 4$, escala de tempo), logo o período de onda equivalente é $T' = 8,00$ s. Ou, então, para a altura da Onda 3 ($H = 0,06$ m) multiplicando-se por N_B ($N_B = 16$, escala de comprimento), logo a altura de onda equivalente $H' = 0,96$ m. Apenas para a determinação dos valores de comprimento de onda equivalentes (L') recorreu-se a expressão (3.10) aplicando os valores de T' e h' .

A Tabela 4.9 apresenta as características reais equivalentes de cada onda simulada.

Tabela 4.9 – Características reais equivalentes às ondas monocromáticas simuladas.

Onda	T' (s)	H' (m)	L' (m)	h' (m)
1	5,00	0,96	36,31	9,60
2	6,00	0,96	47,85	9,60
3	8,00	0,96	69,79	9,60
4	10,00	0,96	90,77	9,60
5	12,00	0,96	111,23	9,60
6	14,00	0,96	131,39	9,60

4.4.2 Comparativos

As Figuras 4.17 até 4.22, apresentam os perfis de velocidades máximas sob a placa submersa para as diferentes relações de X estudadas (ver Tabela 4.8), respectivamente. Em todas estas constam os perfis de cada uma das ondas incidentes simuladas.

Uma característica comum a todos os perfis para todas as relações de X simuladas é a maior magnitude das velocidades no sentido oposto ao de propagação da onda, o que era esperado uma vez que é o efeito característico da placa submersa. Observa-se ainda uma significativa diferença, em valores absolutos, das velocidades das ondas de maior período em relação às ondas de menor período.

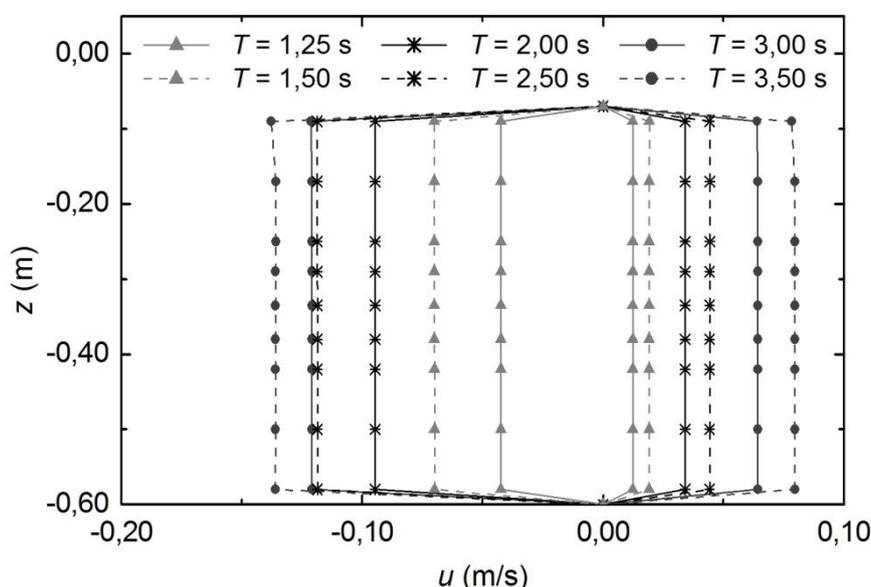


Figura 4.17 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob a placa submersa para $X = 88,3 \%$.

Percebe-se também uma característica comum às ondas com $T \leq 2,50$ s, cujos perfis apresentam-se bastante regulares para todas as relações de X abordadas. Já as ondas com períodos maiores ($T > 2,50$ s) apresentam uma leve variação das velocidades, no sentido oposto à propagação da onda ($-u$), nos pontos mais próximos à placa submersa para os casos em que $X > 85,0 \%$ (ver Figuras 4.17 e 4.18).

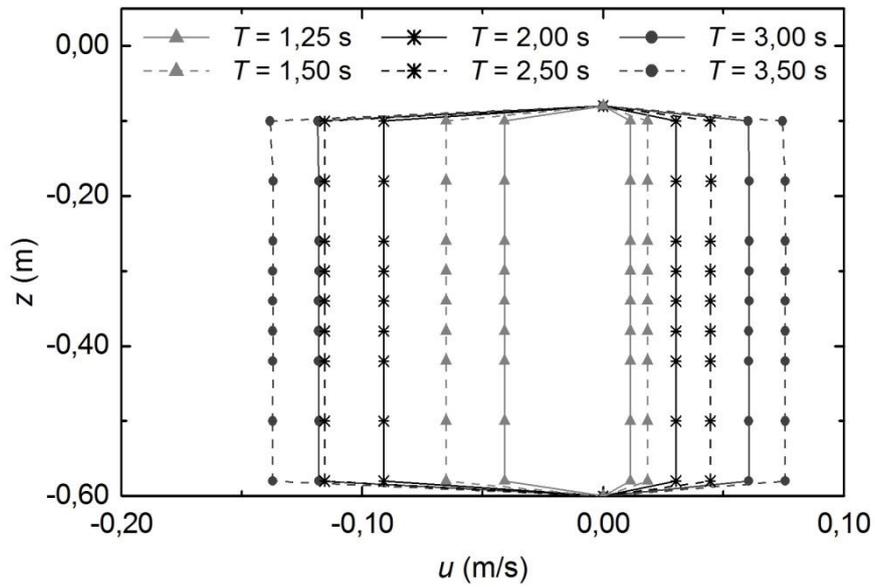


Figura 4.18 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob a placa submersa para $X = 86,7 \%$.

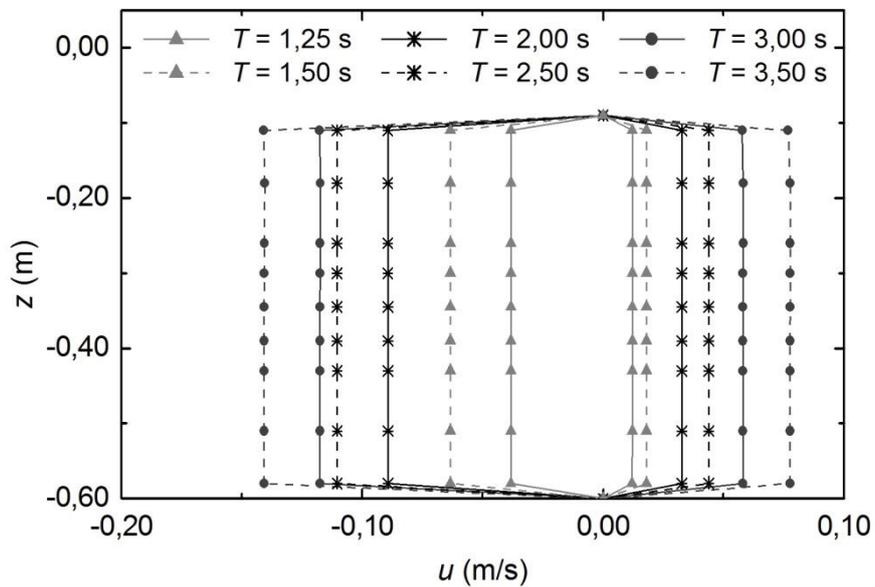


Figura 4.19 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob a placa submersa para $X = 85,0 \%$.

À medida que a relação X diminui, observa-se que a tendência de crescimento dos valores absolutos de velocidades, no sentido oposto ao de propagação da onda, ocorre apenas para as ondas de período $T = 3,00$ s e $T = 3,50$ s. Isso pode ser observado comparando-se a Figura 4.17 com a Figura 4.22, onde considerando $T = 3,50$ s, a velocidade aumentou de aproximadamente $-0,14$ m/s para próximo de $-0,18$ m/s. Por outro lado, considerando $T = 2,50$ s, nas mesmas figuras, a velocidade diminuiu de aproximadamente $-0,12$ m/s para próximo de $-0,08$ m/s. Este fato demonstra uma diferença de comportamento do escoamento, em relação à variação de X , quando a relação $L/L_P > 2,00$ ($T \geq 2,50$ s).

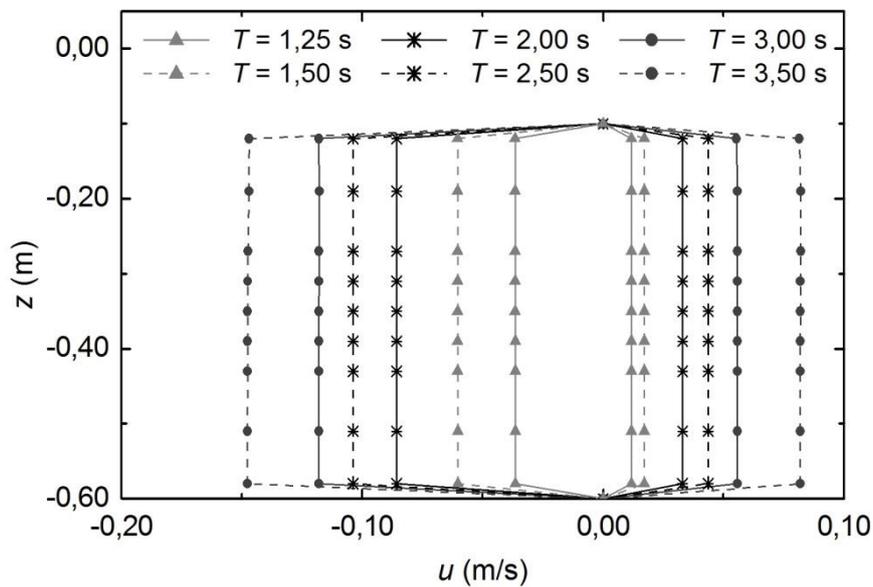


Figura 4.20 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob a placa submersa para $X = 83,3$ %.

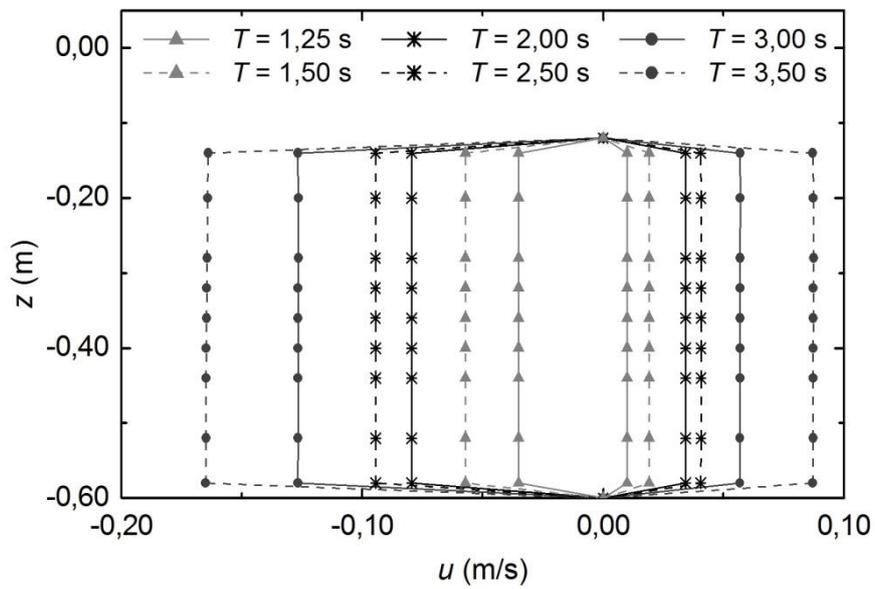


Figura 4.21 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob a placa submersa para $X = 80,0 \%$.

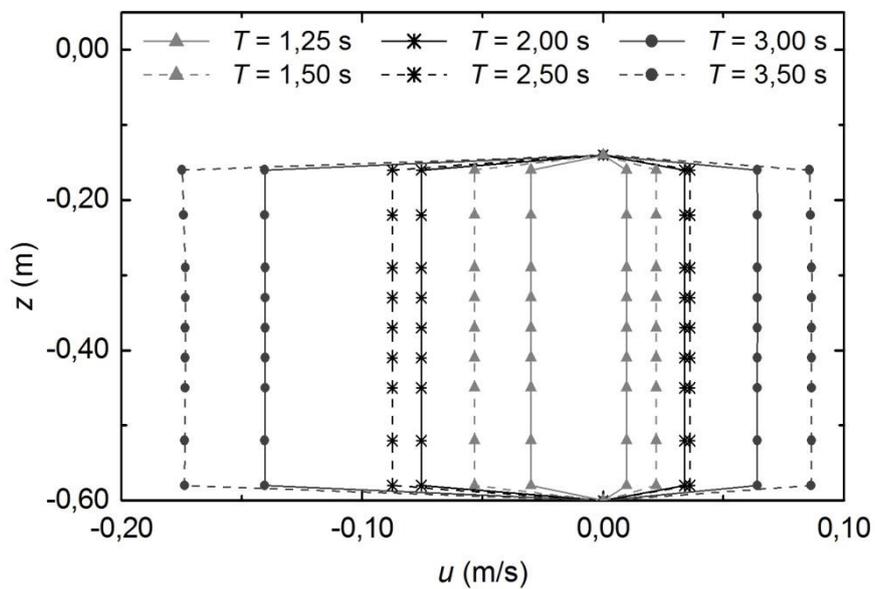


Figura 4.22 – Perfis de velocidade máximos do escoamento sob a placa submersa para $X = 76,7 \%$.

A diferenças observadas nos perfis de velocidades podem ser melhor avaliadas na Figura 4.23, onde são apresentadas as velocidades máximas de cada caso no ponto central ($p6$).

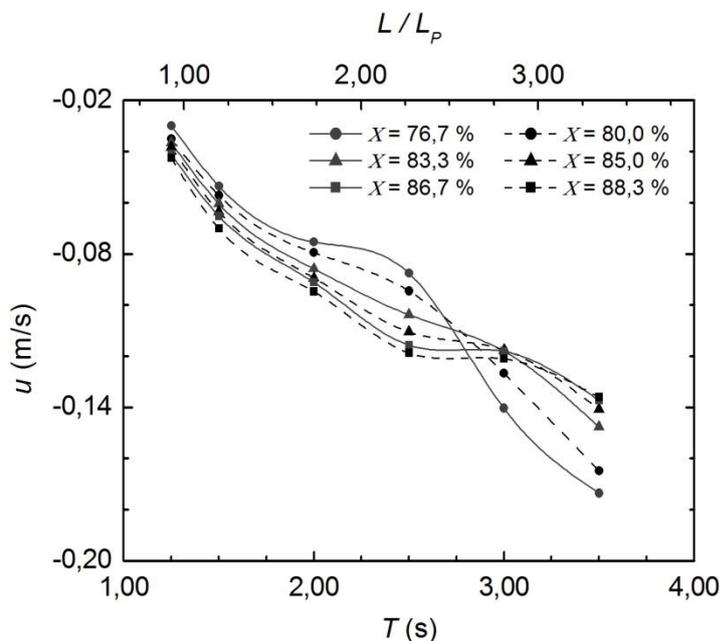


Figura 4.23 – Velocidades u_{max} sob a placa submersa no ponto central $p6$ para cada X e T estudado.

Na Figura 4.23, percebe-se que as ondas simuladas cujos períodos eram menores que 2,50 s ($L/L_p \leq 2,27$ – ver Tabela 4.7) mantiveram uma tendência de redução da velocidade máxima à medida que a relação X diminuiu. Pode-se observar ainda um incremento significativo na magnitude das velocidades nessa região em torno de 3,5 vezes, com o aumento do período da onda incidente.

Com relação à vazão mássica (Figura 4.24), percebe-se que a mesma apresenta um comportamento análogo ao da velocidade, ou seja, há também um acréscimo na magnitude da vazão mássica RMS de aproximadamente três vezes, com o aumento do período da onda incidente. É possível observar ainda diferenças na forma de variação da vazão para os casos em que a relação $L/L_p > 2,27$ ($T > 2,50$ s).

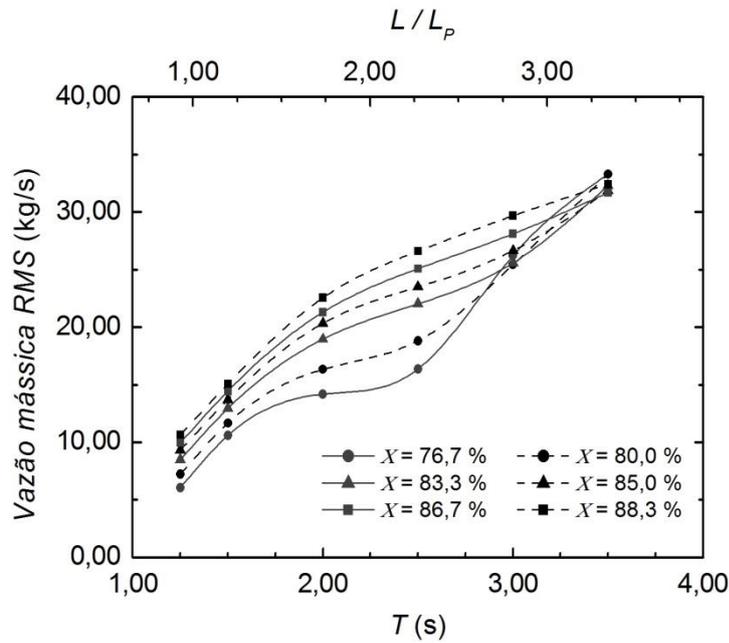


Figura 4.24 – Média quadrática RMS da vazão mássica sob a placa submersa para cada X e T estudado.

A partir dos gráficos da Figura 4.23 e Figura 4.24, percebe-se a preponderância do período de onda na variação da magnitude dos dados analisados, o que aponta para uma diferença importante entre cada uma destas ondas, sua potência.

Na equação da potência média da onda (expressão (3.14)), percebe-se que a característica da onda de maior relevância para potência da mesma é a altura de onda (H), característica esta que foi fixada em mesmo valor para todas as ondas simuladas. No entanto, o número de onda (k) é determinado a partir do comprimento de onda (L) e, portanto, tem-se um acréscimo de energia da onda incidente a cada incremento no período da onda, como é possível observar na Figura 4.25.

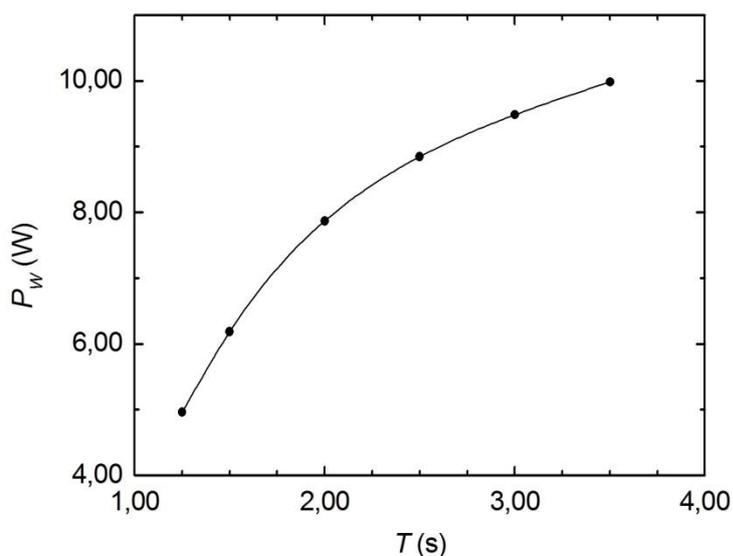


Figura 4.25 – Potência média da onda incidente em relação ao período.

Conforme a Figura 4.25, esse acréscimo de energia da onda fica em torno de 2 vezes, da onda de menor período para a de maior período, ou seja, bastante menor que o incremento percebido na velocidade do escoamento.

Já a eficiência do dispositivo determinada para cada período de onda, é apresentada na Figura 4.26, onde se pode perceber um claro aumento de eficiência de conversão do dispositivo com o aumento do período da onda incidente. Esse valor fica aproximadamente 3 vezes maior, com o aumento do período da onda, quando a relação X é de 88,3 %, se comparados o menor e o maior períodos de onda considerados. Enquanto para as demais relações de X estudadas este valor aumenta em torno de 2,5 vezes.

Outra observação importante, na Figura 4.26, é a tendência de um valor limite de eficiência, para as ondas de período $T = 1,25$ s ($L/L_P = 0,91$) e $T = 3,50$ s ($L/L_P = 3,30$), observada em cinco curvas deste gráfico, excetuando-se a curva de $X = 88,3$ %.

A avaliação desses parâmetros permite confirmar que o potencial energético da onda incidente é determinante para a eficiência do dispositivo de placa submersa, como era esperado.

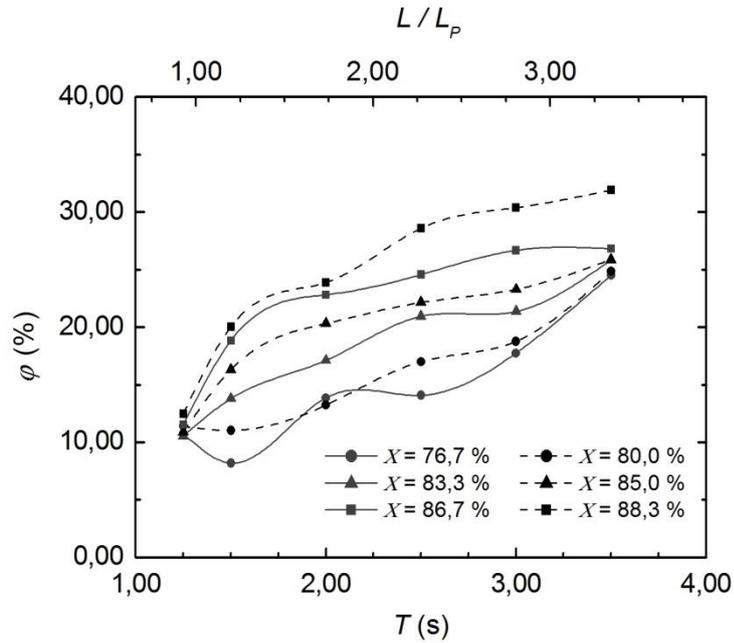


Figura 4.26 – Eficiência do conversor de placa submersa para cada X estudado.

Estudos do sistema de placa submersa, enquanto quebra-mar, indicam a relevância do parâmetro L/L_p e recomendam relações de L/L_p entre 1 e 3 ($1 \leq L/L_p \leq 3$) para o bom desempenho da estrutura na dissipação da energia das ondas (Graw, 1994; 1998). Esses dados permitem compreender a razão pela qual o comportamento das curvas na Figura 4.26 é diferenciado próximo a estes valores.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho centrou-se na caracterização do funcionamento do sistema de placa submersa como conversor de energia das ondas do mar por meio de ferramentas de modelagem computacional com o uso do Método de Volumes Finitos.

Para tanto, o estudo foi dividido em três avaliações distintas que proporcionaram identificar a influência de diferentes parâmetros na eficiência do equipamento.

Os resultados obtidos foram apresentados com base na abordagem do princípio de funcionamento do dispositivo, ou seja, não foram consideradas perdas de carga representativas da presença de uma turbina hidráulica sob a placa.

Os processos de validação e verificação do modelo numérico apresentaram resultados satisfatórios e coerentes com a base teórica do modelo matemático empregado. Dessa forma, alguns parâmetros apresentados no estado da arte puderam ser identificados ao longo do estudo, permitindo uma melhor compreensão das características observadas nos resultados.

Na primeira avaliação, acerca da influência da altura da placa, definida em termos da área livre sob a placa submersa como altura relativa, os resultados mostraram que este parâmetro é determinante quanto à magnitude da velocidade e da vazão mássica sob o dispositivo.

Quanto à velocidade, observou-se que uma redução de 8% da altura relativa ocasionou um incremento em torno de 15 % da velocidade em valores absolutos. Além disso, para $X < 80,0$ % a velocidade apresentou uma leve redução. Em termos de vazão mássica, a média RMS apresentou uma redução gradual, para os casos considerados, à medida que a altura relativa diminuiu. Ainda assim, para uma redução em torno de 12 % da altura relativa a vazão mássica RMS decresceu em torno de 8 %.

Já quanto à eficiência, observou-se um valor mínimo (cerca de 14 %), encontrado para um valor intermediário de altura relativa ($X = 83,3$ %), e que um aumento da altura relativa de apenas 5 % ($X = 88,3$ %) melhorou em quase 93 % a eficiência do conversor, atingindo um nível de eficiência em torno de 27 %.

O estudo de caso realizado para $X = 83,3$ %, no qual ocorreu o valor mínimo, permitiu observar que uma redução 63 % da área livre sob a placa submersa, sem alterar a profundidade de imersão da placa, pode ocasionar um aumento de até 300 % na magnitude da

velocidade do escoamento no sentido contrário ao de propagação da onda. Entretanto, com a redução da área, a vazão mássica RMS também foi reduzida (cerca de 30 %), acarretando numa redução da eficiência de aproximadamente 6,2 %.

Uma análise da equação da potência média disponível, do escoamento sob a placa submersa, realizada a partir dos dados desse estudo de caso, possibilitou identificar que, apesar do significativo aumento da velocidade do escoamento, a contribuição desse incremento de energia cinética do fluido no valor total da potência disponível corresponde a, no máximo, 4 %. O que permitiu compreender a redução de eficiência observada nesse caso.

A segunda avaliação apresentada permitiu analisar a influência do comprimento da placa no desempenho do dispositivo. Os resultados, apresentados em função da relação L/L_P , mostraram a relevância deste parâmetro em relação à magnitude da velocidade do escoamento e ao formato dos perfis de velocidade. Observou-se que para uma relação $L/L_P < 1,50$ a redução da velocidade em valores absolutos ficou em torno de 36 %, além disso, os perfis passaram a apresentar formatos regulares (retilíneos). Em termos de vazão mássica RMS, foi observada uma redução em torno de 30 % a partir da relação $L/L_P < 1,50$ em relação aos valores observados quando $L/L_P = 1,50$ e $L/L_P = 2,00$.

Para as relações de L/L_P estudadas observou-se a ocorrência de um nível de eficiência em torno de 20 % com leves variações para a maior parte das relações, à exceção de $L/L_P = 1,00$ quando ocorreu uma redução em torno de 4 % na eficiência do dispositivo.

A última etapa deste estudo permitiu avaliar os efeitos da variação do período e, conseqüentemente, do comprimento das ondas incidentes, em conjunto com a variação da altura relativa da placa submersa. Os resultados evidenciaram que a potência média da onda incidente (resultante da variação do período de onda) foi determinante sobre as variações dos demais parâmetros analisados, tendo em vista que a faixa de períodos de onda simulada apresentava uma diferença de potência de 100 %, da onda de maior potência em relação à de menor potência.

Verificou-se que para as ondas estudadas, a de maior potência em relação à de menor potência, apresentou uma velocidade de escoamento em torno de 3,5 vezes maior. O que representa um crescimento de 250 % no valor absoluto da velocidade u para os casos em que $83,3 \% < X < 88,3 \%$, enquanto para os casos em que $X = 76,7 \%$ esse crescimento chegou a aproximadamente 460 %. Já em relação à vazão mássica RMS, fazendo-se a mesma comparação, os valores aumentaram em média 350 % para a mesma faixa de períodos de onda. Observou-se ainda a mudança no comportamento das curvas de velocidade com a variação de X quando a relação $L/L_P > 2,27$.

Quanto à eficiência, a maior parte das relações de X estudadas apresentaram resultados em torno de 2,5 vezes maiores para a onda de maior período em relação à de menor período, chegando a valores em torno de 27 %. A exceção ocorreu nos casos em que $X = 88,3$ % quando o aumento foi em torno de três vezes, chegando a 35 %. Além disso, a ocorrência de um valor mínimo de eficiência, observada na primeira avaliação, seguida de um novo aumento à medida que a relação X é reduzida, pode ser percebida também para a onda de $T = 2,00$ s, cujo valor de eficiência diminui para relações até $X = 80,0$ % e volta a aumentar quando $X = 76,7$ %.

Foi observado ainda que para as ondas de período $T = 1,25$ s ($L/L_P < 1,00$) e $T = 3,50$ s ($L/L_P > 3,00$) os valores de eficiência, em relação às variações de X estudadas, apresentaram pouca variação, identificando prováveis valores limites da relação L/L_P .

Por fim, considerando-se os resultados obtidos a partir dos casos estudados, é possível propor que a geometria que confere maior potência disponível, ao escoamento sob a placa submersa, é a que apresenta altura relativa $X = 88,3$ % e comprimento de placa com uma relação $L/L_P > 2,50$.

5.1 CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS

Ao longo do desenvolvimento dessa pesquisa alguns trabalhos foram escritos e publicados em anais de congressos. Algumas apresentações em congressos de grande relevância na área de pesquisa, como XIV ENCIT (Congresso Brasileiro de Ciências Térmicas e Engenharia) e o XXXIV CILAMCE (Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia). Além da apresentação no V SEMENGO (Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica), evento promovido pelo Programa de Pós-Graduação e um dos poucos eventos voltados à área de engenharia costeira e oceânica do Brasil. A Tabela 5.1 apresenta uma relação dos trabalhos publicados em congressos.

Alguns destes trabalhos, posteriormente, foram selecionados para publicação em periódicos. Dentre os trabalhos encaminhados a periódicos, até o momento um encontra-se publicado na Revista Vetor (FURG) enquanto os demais se encontram em processo de avaliação ou revisão. Uma conquista significativa, entre os trabalhos submetidos a periódicos, foi a aceitação de um trabalho submetido ao periódico *China Ocean Engineering* (Qualis B1, Engenharias III, CAPES), o qual encontra-se em processo de publicação. A Tabela 5.2 apresenta a relação de trabalhos submetidos a periódicos.

Tabela 5.1 – Relação de trabalhos publicados em congressos.

Título	Evento	Ano
Análise Numérica da Eficiência do Conversor de Energia das Ondas do Tipo Placa Submersa	XXXIV CILAMCE	2013
Estudo Numérico de um Dispositivo Tipo Placa Submersa Atuando como Quebra-Mar e Conversor de Energia das Ondas	XV Enc. Pós-Grad./XXI MPU	2013
Simulação Numérica Aplicada ao Estudo de Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica	II NAVTEC	2013
Estudo Numérico de um Dispositivo de Placa Submersa para Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica	XIV Enc. Pós-Grad./XI MPU	2012
Computational Modeling of a Submerged Plate Wave Energy Converter	XIV ENCIT	2012
Estudo Numérico de uma Placa Submersa Vista como Quebra-Mar e Conversor de Energia das Ondas	V SEMENGO	2012
Análise Numérica de uma Placa Submersa como Quebra-Mar e Conversor de Energia das Ondas	V MCSul	2012
Estudo Numérico de Conversor de Energia das Ondas do Tipo Placa Submersa	V MCSul	2012

Tabela 5.2 – Relação de trabalhos submetidos a periódicos.

Título	Periódico	Situação / Ano
Computational Modeling Applied to the Study of Wave Energy Converters (WEC) Into Electrical Energy (II NAVTEC)	Marine Systems & Ocean Technology	Aceito / 2014
Computational Modeling of a Submerged Plate Wave Energy Converter (XIV ENCIT)	Computational Thermal Sciences	Submetido / 2014
Numerical Study on the Effect of Submerged Depth on Horizontal Plate Wave Energy Converter	China Ocean Engineering	Aceito / 2013
Análise Numérica de uma Placa Submersa como Quebra-Mar e Conversor de Energia das Ondas (V MCSul)	Vetor	Publicado / 2012

Cabe destacar ainda, algumas colaborações em outros trabalhos desenvolvidos dentro do grupo de pesquisa. A Tabela 5.3 apresenta uma relação de trabalhos de outros membros do grupo nos quais oportunizou-se realizar alguma contribuição.

Tabela 5.3 – Relação de trabalhos publicados em colaboração.

Título	Periódico / Evento	Situação / Ano
Numerical Analysis of an Oscillating Water Column Converter Considering a Physical Constraint in The Chimney Outlet (II NAVTEC)	Marine Systems & Ocean Technology	Aceito / 2014
Constructal Design of Rectangular Fin Intruded Into Forced Convective Lid-Driven Cavity Flows	8th Constructal Law Conference	2013
Análise Numérica de um Dispositivo Coluna de Água Oscilante Considerando uma Restrição Física na Chaminé de Saída	II NAVTEC	2013

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse trabalho foram explorados alguns dos principais parâmetros relacionados à eficiência do dispositivo de placa submersa, entretanto, outros parâmetros ainda necessitam ser avaliados, como, por exemplo, a variação da altura de onda incidente no conversor.

Sendo assim, algumas sugestões para trabalhos futuros relacionados a esse dispositivo, são propostas a seguir:

- avaliação da influência da altura de onda (H) na eficiência do conversor;
- avaliação da influência da profundidade da onda (h) na eficiência do conversor;
- estudo da influência de relações de $X < 76,7$ % na eficiência do conversor;
- desenvolvimento de um modelo 3D, possibilitando a avaliação da largura da placa;
- otimização geométrica do dispositivo pelo método *Constructal Design*;
- avaliação de parâmetros relacionados ao funcionamento da placa submersa como quebra-mar (coeficientes de transmissão e reflexão) e sua relação com a eficiência do conversor;

- avaliação da influência da espessura da placa (e_p) na eficiência do conversor;
- avaliação da influência da inclinação da placa na eficiência do conversor;
- avaliação da eficiência do dispositivo com a incidência de uma onda com características similares ao clima de ondas da região de Rio Grande;
- estudo de um modelo considerando a perda de carga equivalente a uma turbina hidráulica sob a placa;
- avaliação de aspectos estruturais do dispositivo devido a interação fluido-estrutura, como esforços decorrentes da passagem das ondas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília, Brasil: Aneel, 2008. 236p. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>.

BARREIRO, T. Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia. Portugal, 2009. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

BARREIRO, T.; DIDIER, E.; GIL, L.; ALVES, M.. Simulação numérica não linear do escoamento gerado pela interação entre a agitação marítima e conversores pontuais de energia das ondas. In: Proc. III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia, Bragança, Portugal, 2009.

BROSSARD, J.; CHAGDALI, M. Experimental investigation of the harmonic generation by waves over a submerged plate. **Coastal Engineering**, v. 42, n. 1, p. 277-290, 2001.

BROSSARD, J.; PERRET, G.; BLONCE, L.; DIEDHIOU, A. Higher harmonics induced by a submerged horizontal plate and a submerged rectangular step in a wave flume. **Coastal Engineering**, v. 56, n. 1, p. 11-22, 2009.

BULKIN, B. J.; ELLIOTT, D. The Future of Today's Energy Sources. **Issues In Environmental Science And Technology**, v. 19, p. 1-18, 2003.

CALLAWAY, E. To Catch a Wave. **Nature**, v. 450, 08/11/2007.

CARNEIRO, M. L. Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaio de estruturas oceânicas. São Paulo, 2007. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia: Área Mecatrônica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CARTER, R. W. Wave energy converters and a submerged horizontal plate. Manoa, Honolulu, HI, USA, 2005. 273p. Dissertação (Master in Ocean and Resources Engineering), University of Hawai'i.

CEM – Coastal Engineering Manual. U. S. Army Corps of Engineers, Washington, D. C., 2002.

CHOZAS, J. F.; SOERENSEN, H. C. State of the art of wave energy in Spain. In: 3rd Annual Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Montreal, QC, Canada, IEEE, p. 1-6, 2009.

CRUZ, J. M. B. P.; SARMENTO, A. J. N. A. Energia das ondas: Introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais. Alfragide, Portugal: Instituto do Ambiente, 65p., 2004.

DE BRITO, M. G. Simulação Numérica de Tomadas de Água. Lisboa, Portugal, 2010. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 353p., 1991.

DICK, T. M.; BREBNER, A. Solid and permeable submerged breakwaters. In: 11th Coastal Engineering Conference (ASCE 2), pp. 1141-1158, 1968.

DIZADJI, N.; SAJADIAN, S. E. Modeling and optimization of the chamber of OWC system. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 2360-2366, 2011.

FALCÃO, A. F. O. Wave energy utilization: A review of the Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, p. 899-918, 2010.

FLUENT (versão 6.3.26), ANSYS, Inc., 2007.

GAMBIT (versão 2.4.6), ANSYS, Inc., 2006.

GOMES, M. N. Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna D'água Oscilante para a Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica. Rio Grande, 2010. 209p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional), Universidade Federal do Rio Grande.

GRAW, K.-U. The submerged plate as a wave filter: the stability of the pulsating flow phenomenon. In: 23rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Venice, Italy, p. 1153-1160, 1992.

GRAW, K.-U. Shore protection and electricity by submerged plate wave energy converter. In: European Wave Energy Symposium, Edinburgh, UK, p. 379-384, 1993a.

GRAW, K.-U. The submerged plate wave energy converter: A new type of wave energy device. In: International Symposium on Ocean Energy Development (ODEC), Muroran, Hokkaido, Japan, p. 307-310., 1993b.

GRAW, K.-U. Is the submerged plate wave energy converter ready to act as a new coastal protection system? In: XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Napoli, p. 1-9, 1994.

GRAW, K.-U. Vorrichtung zur Erzeugung von Elektrischer Energie aus Wasserwellen. PINA (Patent- und Innovationsagentur des Landes Nordrhein-Westfalen), Deutsches Patentamt, Patent Nr. P 43 24 110, 1995a.

GRAW, K.-U. Wellenenergie – eine hydromechanische Analyse. Bericht Nr. 8 des Lehr- und Forschungsgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft, Bergische Universitaet – Gesamthochschule, Wuppertal, Germany, 1995b.

GRAW, K.-U. Wave energy: need for protection - possible uses. In: Proceedings of Expo' 98 The Oceans, a Heritage for the Future, Lisboa, Portugal, 1998.

HILDEBRANDT, A.; SCHLURMANN, T. Velocity Field Under Propagating Waves Over a Submerged Horizontal Plate and Induced Forces. In: Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering, Darmstadt, p. 24-30, 2008.

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

HORKO, M. CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy converter. Austrália, 2007. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência), Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Western.

HSU, H. H.; Wu, Y. C. Scattering of Water Wave by a Submerged Horizontal Plate and a Submerged Permeable Breakwater. **Ocean Engineering**, v. 26, n. 4, p. 325-341, 1999.

HU, H.; WANG, K. H.; WILLIAMS, A. N. Wave Motion Over a Breakwater System of a Horizontal Plate and a Vertical Porous Wall. **Ocean Engineering**, v. 29, p. 373-386, 2002.

HUGHES, S. A. Physical models and laboratory techniques in coastal Engineering. Vol. 7, World Scientific, Singapura, 550 p., 1993.

IAHNKE, S. L. P. Energia das Ondas: Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento. Rio Grande, 2010. 128p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional), Universidade Federal do Rio Grande.

KINSMAN, B. Wind Waves: Their generation and propagation on the ocean surface. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA, 676 p. 1965.

KRÜGER, E. L. Uma abordagem sistêmica da atual crise ambiental. **Revista Educação & Tecnologia**, n. 6, 2003.

LIU, C.; HUANG, Z.; TAN, S. K. Nonlinear Scattering of Non-breaking Waves by a Submerged Horizontal Plate: Experiments and Simulations. **Ocean Engineering**, v. 36, p. 1332-1345, 2009.

MALISKA, C. R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. Rio de Janeiro: LTC, 453p., 2004.

MCCORMICK, M. E. Ocean Engineering Wave Mechanics. Canada: John Wiley & Sons Inc., 173p., 1973.

MCCORMICK, M. E. Ocean Wave Energy Conversion. Dover Publications, Inc. Mineola, NY, USA, 256p., 1981.

ORER, G.; OZDAMAR, A. An experimental study on the efficiency of the submerged plate wave energy converter. **Renewable Energy**, v. 32, n. 8, p. 1317-1327, 2007.

PATANKAR, S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. McGraw Hill, New York, 196p., 1980.

RAMALHAIS, R. S. Estudo numérico de um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO). Portugal, 2011. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. Boundary-layer theory. Springer, Berlin, 800p., 2000.

SEIBT, F. M. Modelagem Computacional de Conversor de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Placa Submersa. Rio Grande, 2011. 53p. Trabalho de Conclusão (Graduação em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande.

SEIBT, F.M.; COUTO, E. C.; ISOLDI, L. A.; TEIXEIRA, P. R. F.; DOS SANTOS, E. D. Estudo Numérico de Conversor de Energia das Ondas do Tipo Placa Submersa. In: V Conferência Sul em Modelagem Computacional (MCSul), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2012a.

SEIBT, F.M.; COUTO, E. C.; TEIXEIRA, P. R. F.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. Análise Numérica de uma Placa Submersa como Quebra Mar e Conversor de Energia das Ondas. In: V Conferência Sul em Modelagem Computacional (MCSul), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2012b.

SEIBT, F.M.; COUTO, E. C.; TEIXEIRA, P. R. F.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O. Computational Modeling of the Submerged Plate Wave Energy Converter. In: Proceedings of Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), vol. 1, p. 1-7, 2012c.

SEIBT, F.M.; SOUZA, J. A.; DOS SANTOS, E. D.; TEIXEIRA, P. R. F.; ISOLDI, L. A. Análise Numérica da Eficiência do Conversor de Energia das Ondas Tipo Placa Submersa. In: Proceedings of Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), vol. 1, p. 1-13, 2013.

SRINIVASAN, V.; SALAZAR, A. J.; SAITO, K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. **Applied Mathematical Modelling**, v. 35, n. 8, p. 3710-3730, 2011.

THORPE, T. W. An overview of wave energy technologies: status, performance and costs. In: Proceedings International One day Seminar, Institution of Mechanical Engineers, London, UK, 1999.

U. S. ARMY – Coastal Engineering Research Center. Shore Protection Manual. Volume I, Books for Business, New York – Hong Kong, 455p., 1973.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method. Pearson, England. 503p., 2007.

VINING, J. G.; MUETZE, A. Economic factors and incentives for ocean wave energy conversion. **Industry Applications**, IEEE Transactions, v. 45, n. 2, p. 547-554, 2009.