

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

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM DISPOSITIVO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS
EM ENERGIA ELÉTRICA DO TIPO OWC COMPARANDO O REGIME LAMINAR COM
MODELOS DE TURBULÊNCIA

por

Andrei Luís Garcia Santos

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, Agosto de 2018.

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM DISPOSITIVO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS
EM ENERGIA ELÉTRICA DO TIPO OWC COMPARANDO O REGIME LAMINAR COM
MODELOS DE TURBULÊNCIA

Por

Andrei Luís Garcia Santos
Engenheiro Mecânico

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

Área de Concentração: Engenharia Marítima

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Avila Souza

Co-orientador: Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira

PPGEO/FURG

Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes

IFPR

Prof.^a Dr.^a Bianca Neves Machado

UFRGS

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

Rio Grande, 31 de agosto de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha esposa Livia e minha filha Lavínia pelo companheirismo, incentivo, apoio psicológico e por estarem ao meu lado em todos os momentos bons e ruins ao longo dessa jornada na maior parte do tempo. Sem o amor, a presença e a preocupação das duas esse trabalho não teria sido possível.

Agradeço aos meus pais Francisco e Alzimira, minha irmã Lara, seu esposo Bruno e meus sobrinhos Karuna e Vihari que em diversos momentos estiveram presentes e também apoiaram da melhor forma possível.

Agradeço, também, aos meus sogros Luiz Carlos e Márcia, minhas cunhadas Laíse e Letícia, seus respectivos esposos e meus verdadeiros amigos, Paulo e Michael e meus sobrinhos Nicolás e Marcela que, em muitos momentos, estiveram juntos e apoiaram com suas palavras, seus sorrisos ou simplesmente suas presenças nos encontros de família, onde me passaram muita energia positiva, sempre me acolhendo com o ambiente familiar e de amizade, unidos e prontos para ajudar a todo instante.

Agradeço a minha querida “avó de coração”, Maria, que com sua fé e experiência de vida me guiou em muitos momentos de turbulência, assim como comemorou as vitórias em muitas batalhas da vida sempre com carinho e preocupação.

Agradecimento ao meu orientador Prof. Jeferson Avila Souza. Obrigado por me incentivar, me acolher e encorajar a sempre buscar o melhor, me guiando pelas dificuldades científicas, mostrando que com humildade e determinação os resultados são alcançados sempre. Ao meu co-orientador, Prof. Elizaldo Domingues dos Santos pela honestidade, atenção e eficiência na arte de ensinar os caminhos a serem percorridos na busca do melhor resultado.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro ao longo de quase todo período de estudos e incentivo a pesquisa, assim como a Universidade Federal do Rio Grande (FURG) por fornecer excelência no ensino e infraestrutura de qualidade com gratuidade para a realização desse trabalho.

Agradecimentos a todos meus colegas do curso, em especial aos agora já MSc's Filipe Branco Teixeira e Dante Eloy Barbosa que se tornaram grandes amigos e me ajudaram sempre durante os estudos e pesquisas. A todos os professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) que com profissionalismo e grande responsabilidade ministraram as disciplinas que me tornaram capaz de alcançar esse objetivo. Agradeço também a todos os funcionários da instituição e todos os amigos que de alguma forma ajudaram ou forneceram palavras de incentivo que me encorajaram a não desistir. Muito obrigado.

RESUMO

A transformação de energia das ondas em energia elétrica é um assunto bastante recorrente na comunidade científica, onde um número crescente de trabalhos tem envolvido de forma experimental e/ou numérica esse tópico em questão. O presente trabalho propõe o estudo numérico de um domínio que simula um dispositivo conversor de energia das ondas em energia elétrica do tipo *OWC* (*Oscillating Water Column*), comparando os resultados de um escoamento considerando o regime laminar e turbulento com diferentes abordagens numéricas para a turbulência. O princípio físico de conversão do *OWC* aproveita o movimento de uma coluna d'água que oscila dentro de uma câmara parcialmente submersa, gerando uma diferença de pressão e o movimento de entrada e saída de ar através de uma chaminé. Uma turbina instalada nesta chaminé converte a energia cinética do ar em energia elétrica. A simulação é feita através do método dos volumes finitos (*MVF*) utilizando o programa OpenFOAM, versão 2.4.0, de código aberto. Para resolução do problema, o software utiliza o *solver InterFOAM* que aplica a metodologia *Volume of Fluid (VOF)* para o escoamento bifásico de ar e água. O estudo visa analisar as diferenças obtidas nos resultados com o escoamento no regime laminar em comparação com o regime turbulento utilizando a abordagem *RANS (Reynolds Average Navier Stokes)* com os modelos *k-ε*, *k-ω SST* e Spalart-Allmaras e a abordagem *LES (Large Eddy Simulation)* com o modelo submalha dinâmico de Smagorinsky. Essa comparação visa avaliar a real necessidade da utilização dos modelos de turbulência nesse tipo de problema. Os parâmetros utilizados são baseados em um clima de ondas da costa sul do Brasil ($L = 65,4$ m, $H = 1$ m, $h = 10$ m, $T = 7,5$ s), modelado matematicamente com a teoria não linear de Stokes. É observado no presente trabalho que não há diferença nos resultados comparando o regime laminar com os modelos de turbulência *RANS*. Em contrapartida, o modelo *LES* apresentou diferenças significativas nos resultados o que configura a importância desse tipo de comparação realizada para posteriores análises em diferentes abordagens do tema.

Palavras-chaves: OpenFOAM, Energia das Ondas, *OWC*, Modelos de Turbulência.

ABSTRACT

The wave energy conversion into electrical energy is a very common issue in the scientific community, where an increasing number of experimental and/or numerical works have addressed this topic. The present work proposes the numerical study of an OWC (Oscillating Water Column) energy converter device, comparing results of the laminar flow model with some turbulent regime models. This equipment converts wave's energy from a water column that oscillates inside a chamber, generating a pressure difference and air flow (in and out) through the device's chimney. Air kinetic energy is converted into electric energy with a turbine installed in this chimney. Simulation is performed using the finite volume method (MFV) and OpenFOAM, version 2.4.0, open source software. To solve the problem, the software uses the InterFOAM solver which applies the Volume of Fluid (VOF) methodology for the two-phase flow of air and water. The study aims to analyze the differences obtained in results with laminar flow in comparison to the turbulent regime using RANS (Reynolds Average Navier Stokes) approach with $k-\epsilon$, $k-\omega$ and Spalart – Allmaras models and LES (Large Eddy Simulation) Smagorinsky's dynamic submesh model. This comparison aims to evaluate the real needed turbulence models implementation in this type of problem. The parameters used are based on a wave climate from the south coast of Brazil ($L = 65.4$ m, $H = 1$ m, $h = 10$ m, $T = 7.5$ s), mathematically modeled with Stokes' nonlinear theory. It's observed in this work that is no result's difference comparing the laminar flow with RANS turbulence models. On the other hand, the LES model presented significant differences, which constitutes the importance of this comparison type performed for later studies in different approaches.

Keywords: OpenFOAM, Wave Energy, OWC, Turbulence Models

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Motivação	20
1.2. Objetivo.....	20
1.2.1. Objetivos específicos	20
1.3. Estado da Arte	21
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
2.1. Mecânica das Ondas	25
2.1.1. Teoria das ondas lineares de pequena amplitude.....	26
2.1.2. A teoria de Stokes	30
2.2. Modelos numéricos para conversores de energia das ondas.....	31
2.2.1. Equação da fração volumétrica.....	32
2.2.2. Acoplamento Pressão Velocidade.....	34
2.2.3. Equação para o passo de tempo	35
3. MODELAGEM DA TURBULÊNCIA	37
3.1. Modelagem dos escoamentos Turbulentos.....	38
3.1.1. Modelagem Clássica da Turbulência (<i>RANS</i>).....	39
3.1.2. Simulação de Grandes Escalas (<i>LES</i>).....	41
3.2. Modelagem matemática dos modelos RANS	41
3.2.1. Modelos <i>k-ε</i> e <i>k-ω SST</i>	41
3.2.2. Modelo Spalart - Allmaras.....	44
3.3. Modelagem matemática do modelo LES	45
3.3.1. Modelo Smagorinsky.....	45
4. DESCRIÇÃO E VERIFICAÇÃO DO PROBLEMA	46
4.1. Canal de ondas sem dispositivo	47
4.2. Canal de ondas com o dispositivo <i>OWC</i>	51
4.3. Inclusão do efeito de turbina no equipamento <i>OWC</i>	53

5. RESULTADOS.....	60
5.1. Resultados para o tanque com o dispositivo <i>OWC</i>	61
5.2. Resultados para o dispositivo <i>OWC</i> com efeito de turbina.....	69
6. CONCLUSÕES.....	80
7. PROPOSTA DE CONTINUIDADE	82
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Matriz energética brasileira. Fonte: Aneel 2016.	16
Figura 1.2- Ilustração esquemática do equipamento de coluna de água oscilante.....	18
Figura 1.3 - Princípio de funcionamento de um equipamento de galgamento (Overtopping).....	19
Figura 1.4 - Dispositivos corpos oscilantes: (a) absorção pontual submerso; (b) absorção pontual flutuante; (c) absorção pontual submerso – pêndulo; (d) corpo flutuante progressivo.....	19
Figura 2.1- Principais parâmetros das ondas em uma visão bidimensional. Dean; Dalrymple, (1991).	25
Figura 2.2 – Condições de contorno de uma onda monocromática de pequena amplitude.	26
Figura 3.1- Grau de modelagem versus custo computacional dos modelos de turbulência. Adaptado de Rezende (2009).	39
Figura 3.2 - Média temporal de um campo instantâneo: (a) escoamento estacionário e (b) escoamento não estacionário com pequenas variações. Fonte: Dos SANTOS (2011).	40
Figura 4.1- Canal de ondas e suas medidas.	48
Figura 4.2 - Condições de contorno do canal de ondas.	48
Figura 4.3- Malha no domínio completo sem o dispositivo.	49
Figura 4.4 - Detalhe do refinamento na região da interface ar-água.....	50
Figura 4.5- Teste de independência de malha.	51
Figura 4.6 - Canal de ondas com dispositivo OWC e linha de monitoramento (medidas em metros).	52
Figura 4.7 - Condições de contorno referentes ao dispositivo.....	52
Figura 4.8 – Discretização espacial na região do dispositivo.	53
Figura 4.9 - Malha utilizada em GOMES et. al., (2015) importada para código no OpenFOAM: (a) vista frontal e (b) vista em perspectiva.	54
Figura 4.10 - Dimensões do dispositivo OWC reproduzido de GOMES et. al., (2015). Medidas em metros.....	55
Figura 4.11- Comparativo de pressão estática abaixo do obstáculo elíptico.	56
Figura 4.12 - Comparativo da vazão mássica na saída da chaminé.	57
Figura 4.13 - Detalhe da nova malha do dispositivo OWC: (a) dispositivo e seu entorno; (b) detalhe da malha na região do obstáculo elíptico.	58
Figura 4.14 - Dimensões, em metros, do efeito de turbina adaptado.....	59
Figura 5.1 - Sondas de medição de pressão na chaminé do dispositivo OWC.	61
Figura 5.2 - Diferença de pressão na chaminé do dispositivo OWC sem efeito de turbina.	62
Figura 5.3 - Comparativo da vazão mássica de ar na saída da chaminé.	63

Figura 5.4 - Comparativo das curvas de elevação do nível da água no interior da câmara do equipamento.....	64
Figura 5.5 - Instante da maior elevação da água na câmara do dispositivo OWC: (a) laminar, (b) k - ϵ , (c) k - ω SST e (d) Spalart - Allmaras.....	65
Figura 5.6 - Instante da menor elevação da água na câmara do dispositivo OWC: (a) laminar, (b) k - ϵ , (c) k- ω SST e (d) Spalart – Allmaras.....	66
Figura 5.7 - Campo de velocidades no instante da maior elevação da água na câmara do dispositivo OWC: (a) laminar, (b) k- ϵ , (c) k- ω SST e (d) Spalart – Allmaras.....	67
Figura 5.8 - Campo de velocidades no instante da menor elevação da água na câmara do dispositivo OWC: (a) laminar, (b) k- ϵ , (c) k- ω SST e (d) Spalart – Allmaras.....	68
Figura 5.9 - Comparativo de pressão na saída da chaminé do dispositivo OWC.....	70
Figura 5.10 - Comparativo da vazão mássica com efeito de turbina no domínio.....	71
Figura 5.11 - Elevação média da superfície da água com efeito de turbina no domínio.....	71
Figura 5.12 - Maior elevação da superfície livre com efeito de turbina: (a) laminar, (b) k- ϵ , (c) k- ω SST, (d) Spalart – Allmaras e (e) Smagorinsky.....	72
Figura 5.13 - Menor elevação da superfície livre com efeito de turbina: (a) laminar, (b) k- ϵ , (c) k- ω SST, (d) Spalart – Allmaras e (e) Smagorinsky.....	73
Figura 5.14 - Campo de velocidades na maior elevação da superfície livre com efeito de turbina: (a) laminar, (b) k- ϵ , (c) k- ω SST, (d) Spalart – Allmaras e (e) Smagorinsky.....	74
Figura 5.15 - Campo de velocidades na menor elevação da superfície livre com efeito de turbina: (a) laminar, (b) k- ϵ , (c) k- ω SST, (d) Spalart – Allmaras e (e) Smagorinsky.....	75
Figura 5.16 - Linhas de corrente no momento de maior elevação média da superfície livre da água: (a) laminar, (b) k- ϵ , (c) k- ω SST, (d) Spalart – Allmaras e (e) Smagorinsky.....	76
Figura 5.17 - Linhas de corrente para o momento de maior velocidade de descompressão da câmara OWC: (a) laminar, (b) k- ϵ , (c) k- ω SST, (d) Spalart – Allmaras e (e) Smagorinsky.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Coeficientes das equações do modelo $k-\omega$ SST.....	44
Tabela 4.1- Tempo computacional das simulações.	47
Tabela 4.2 - Propriedades da onda utilizada nas simulações.	49
Tabela 4.3- Teste de independência de malha.	50
Tabela 4.4 - Propriedades da onda reproduzida de GOMES et. al., (2015).	55
Tabela 4.5 - Comparativo dos valores médios das propriedades.	57
Tabela 5.1 - Parâmetros de simulação.....	60
Tabela 5.2 - Média RMS das propriedades entre os diferentes regimes de escoamento no período de $T = 32$ s a $T = 52$ s.....	69
Tabela 5.3 - Valores com média RMS das propriedades entre as diferentes discretizações espaciais.	78
Tabela 5.4 - Diferença percentual entre os modelos de turbulência e o regime laminar.....	78

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Distância entre a linha de repouso até a crista da onda [m]
a_1	Constante empírica
a^*	Coefficiente de amortecimento turbulento
b	Forças de corpo por unidade de massa
c_1	Parâmetro de passo de tempo
c_2	Parâmetro de passo de tempo
C	Celeridade [m/s]
C_{b2}	Constante do modelo de turbulência Spalart - Allmaras
C_μ	Coefficiente de amortecimento turbulento
$C_{\epsilon 1}$	Coefficiente do modelo de turbulência $k-\epsilon$
$C_{\epsilon 2}$	Coefficiente do modelo de turbulência $k-\epsilon$
Co	Número de <i>Courant</i>
C_S	Constante do modelo de turbulência Smagorinsky
F	Vetor resultante de força
F_1	Função de mistura do modelo de turbulência $k-\omega$ SST
F_2	Função de mistura do modelo de turbulência $k-\omega$ SST
f	Fração volumétrica
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
G_v	Viscosidade turbulenta de produção
G_ω	Parcela de geração de energia cinética turbulência
h	Profundidade do corpo d'água [m]
H	Altura da onda [m]
H_T	Altura total do tanque de ondas [m]
H_v	Coefficiente do sistema linear dos volumes vizinhos
k	Número de onda [m ⁻¹]

k_T	Energia cinética turbulenta
K_c	Coeficiente de discretização [m^{-1}]
L	Comprimento da onda [m]
L_{ij}	Tensor de Leonard [$N.m^{-2}$]
L_{θ_j}	Fluxo turbulento de Leonard [$W.m^{-2}$]
L_T	Comprimento total do tanque de ondas [m]
\dot{m}	Vazão mássica [kg/s]
\mathbf{n}	Vetor normal à superfície livre
P	Pressão [Pa]
P_{hid}	Pressão hidropneumática [Pa]
S_{face}	Face da superfície de controle
S_{ij}	Tensor deformação
T	Período [s]
t	Tempo [s]
u	Componente de velocidade na direção de x [m/s]
U_{face}	Velocidade da face da superfície de controle [m/s]
v_{ar}	Velocidade do ar [m/s]
V	Vetor resultante de velocidade [m/s]
w	Componente de velocidade na direção de z [m/s]
x	Abscissa [m]
X_l	Distância entre o batedor de ondas e a linha de monitoramento do tanque [m]
Y_v	Destrução da viscosidade turbulenta
Y_ω	Parcela de dissipação de energia cinética turbulenta
z	Ordenada [m]

Símbolos Gregos

Δt	Passo de tempo [s]
------------	--------------------

ε	Parâmetro de perturbação
ε_T	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta
η	Elevação da superfície livre da água [m]
κ_T	Energia cinética turbulenta
ν_t	Viscosidade turbulenta [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
ρ	Massa específica [kg/m^3]
σ	Frequência da onda [1/s]
$\bar{\tau}$	Tensor de tensões [Pa]
φ	Função de escoamento potencial
μ	Viscosidade dinâmica [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]
σ_ε	Coefficiente do modelo de turbulência $k-\varepsilon$
σ_k	Coefficiente do modelo de turbulência $k-\varepsilon$
$\sigma_{\omega,\phi}$	Constante empírica
$\sigma_{k,\phi}$	Constante empírica
$\sigma_{\tilde{\nu}}$	Constante do modelo de turbulência Spalart - Allmaras
β_ϕ^*	Constante empírica
ω	Taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta
ψ	Função corrente

LISTA DE ABREVIATURAS

Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAO	Coluna de Água Oscilante
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>DNS</i>	<i>Direct Numerical Simulation</i>
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
<i>LES</i>	<i>Large Eddy Simulation</i>
MVF	Método dos Volumes Finitos
<i>OWC</i>	<i>Oscillating Water Column</i>
PPGEO	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
<i>RANS</i>	<i>Reynolds Averaged Navier - Stokes</i>
<i>VOF</i>	<i>Volume of Fluid</i>

1. INTRODUÇÃO

Todos os tipos de energia existentes são vitais para a persistência humana no planeta, pois inúmeros fatores que facilitam a vida cotidiana do homem são totalmente dependentes da mesma. A energia elétrica é a modalidade que mais se destaca nesse quesito, pois está inserida na quase totalidade dos meios existentes para que a sociedade possa satisfazer suas necessidades básicas e vitais através das tecnologias.

As fontes de energia podem ser classificadas em duas formas: renováveis e não renováveis. Em ambos os casos, independentemente da forma original da energia, é sempre possível convertê-la em energia elétrica. As fontes não renováveis são representadas pela energia nuclear e os combustíveis fósseis (carvão e petróleo), que são os mais utilizados, na atualidade, pela facilidade de extração. Em contrapartida, o grande impacto ambiental gerado pelas fontes não renováveis motivam diversos estudos para utilização de fontes renováveis de energia, das quais podemos destacar: a biomassa (transformada a partir da matéria orgânica de origem vegetal e animal), energia eólica (que utiliza a força dos ventos), energia solar, energia das ondas, entre outras, Cruz; Sarmiento (2004).

Atualmente, a matriz energética brasileira é composta pelas seguintes fontes, conforme é apresentado na Fig. 1.1:

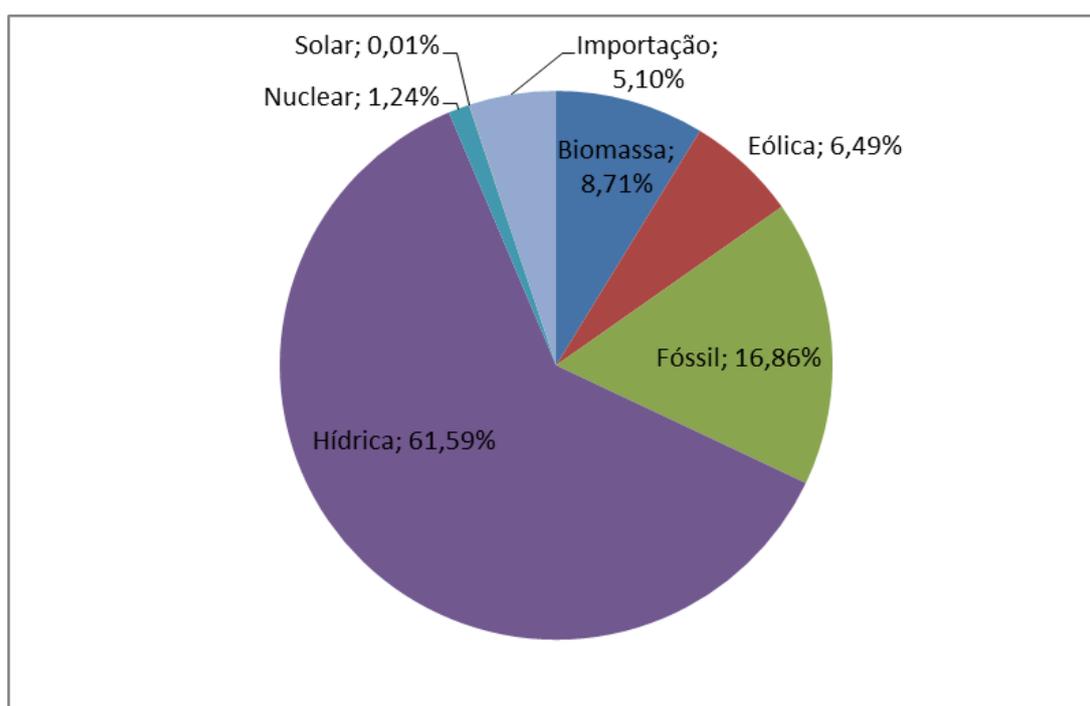


Figura 1.1 - Matriz energética brasileira. Fonte: Aneel 2016.

Essa modalidade de energia significaria uma contribuição favorável como fonte renovável para o país tendo em vista a sua extensa dimensão de costa marítima que pode ser explorada visando esse objetivo.

Nesse sentido, a obtenção da energia oriunda dos oceanos vem sendo estudada com a finalidade de participação na matriz energética mundial, por se tratar de uma fonte abundante e inesgotável.

Existem diferentes meios para a extração da energia dos oceanos: a energia provinda das marés (dado pela interação dos campos gravitacionais do Sol e da Lua); a energia térmica dos oceanos (fruto da radiação solar que incide nas águas); a energia das correntes marinhas (originadas nos gradientes de salinidade e temperatura e nas ações das marés) e a energia das ondas que é o efeito dos ventos na superfície dos oceanos. Após décadas de estudos sobre o tema de conversão da energia das ondas em energia elétrica, foco do presente trabalho, segundo FALCÃO (2010), os dispositivos existentes na atualidade podem ser classificados pela sua localização ou pelo seu princípio de funcionamento.

Segundo a localização, os dispositivos são classificados em:

- Dispositivos costeiros (*onshore*): São os dispositivos que ficam fixados ou até mesmo construídos na orla da costa. Sua vantagem está na maior facilidade de instalação do equipamento, assim como a dispensa de grandes metragens de cabos submarinos para transmissão da energia transformada. Em contrapartida, o potencial de energia das ondas que pode ser absorvida nessa localização é muito baixo, fazendo com que o equipamento aproveite entre 25% a 50% do potencial.
- Dispositivos próximos da costa (*nearshore*): Estes dispositivos ficam em regiões afastadas da costa, em torno de 20 m de profundidades. Sua instalação se dá nas proximidades de molhes e quebra-mares.
- Dispositivos afastados da costa (*offshore*): São dispositivos com finalidade de explorar o potencial de ondas em águas mais profundas, com mais de 40 m, local onde as mesmas são mais energéticas.

Quanto ao princípio de funcionamento, a classificação é obtida conforme o aproveitamento do potencial da onda para a transformação em energia elétrica. Para isso, os dispositivos possuem

três diferentes classes:

- Coluna de água oscilante (OWC – Oscillating water Column): É o dispositivo estudado nesse trabalho. Seu princípio de funcionamento se dá através de uma turbina acionada pelo ar oriundo da diferença de pressão causada dentro de uma câmara devido à oscilação da coluna d'água internamente ao equipamento. Esse movimento causado na turbina, por sua vez, aciona um gerador elétrico, produzindo eletricidade. A Fig. 1.2 apresenta o equipamento em questão:

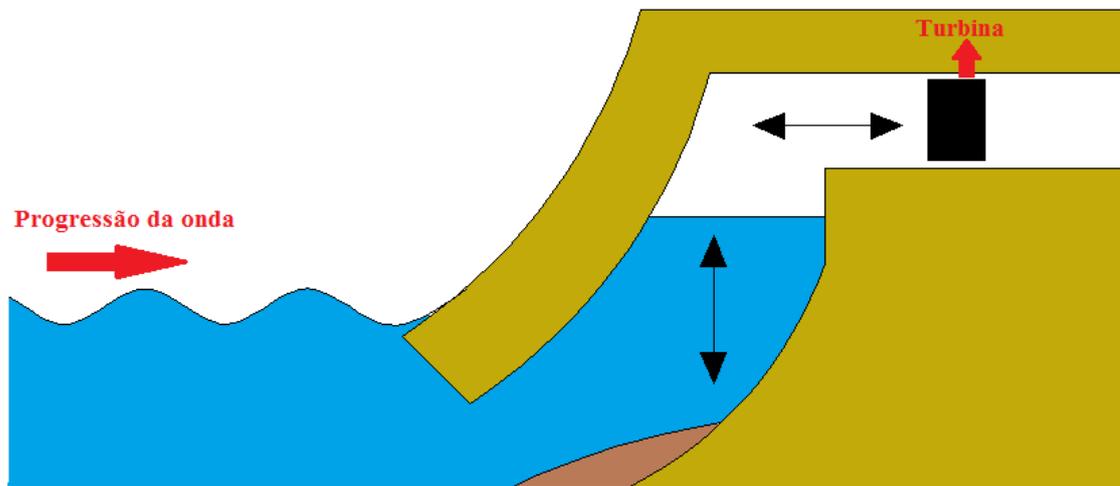


Figura 1.2- Ilustração esquemática do equipamento de coluna de água oscilante.

- Galgamento (Overtopping): Nesses dispositivos, a energia é gerada através de turbinas hidráulicas de baixa queda acionadas pela água transportada pelas ondas. Após o armazenamento em um recipiente posicionado acima do nível médio do mar, a quantidade de água que ingressa no mesmo é controlada através de uma rampa com declividade em relação à interface ar-água que faz a dosagem adequada dessa inserção para que o equipamento possa transformar a queda da água em energia elétrica. A passagem da água força o movimento de rotação do rotor da turbina, que, por sua vez, transmite o movimento para um gerador elétrico que produzirá eletricidade. A Fig. 1.3 ilustra o princípio de funcionamento de um dispositivo do tipo galgamento:

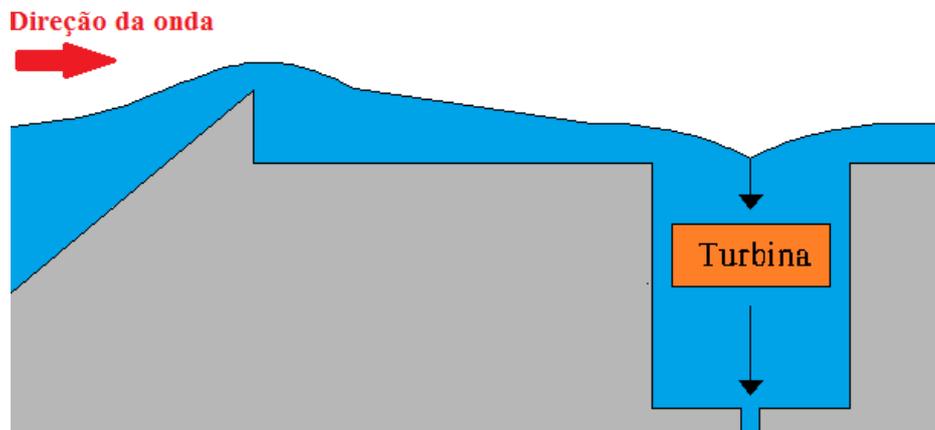


Figura 1.3 - Princípio de funcionamento de um equipamento de galgamento (Overtopping).

- Corpos oscilantes: Este tipo de equipamento gera energia pelo movimento de motores hidráulicos, turbinas hidráulicas ou geradores elétrico-lineares devido à oscilação do equipamento com a passagem da onda por eles. A Fig. 1.4 descreve diferentes equipamentos que se utilizam desse princípio de funcionamento:

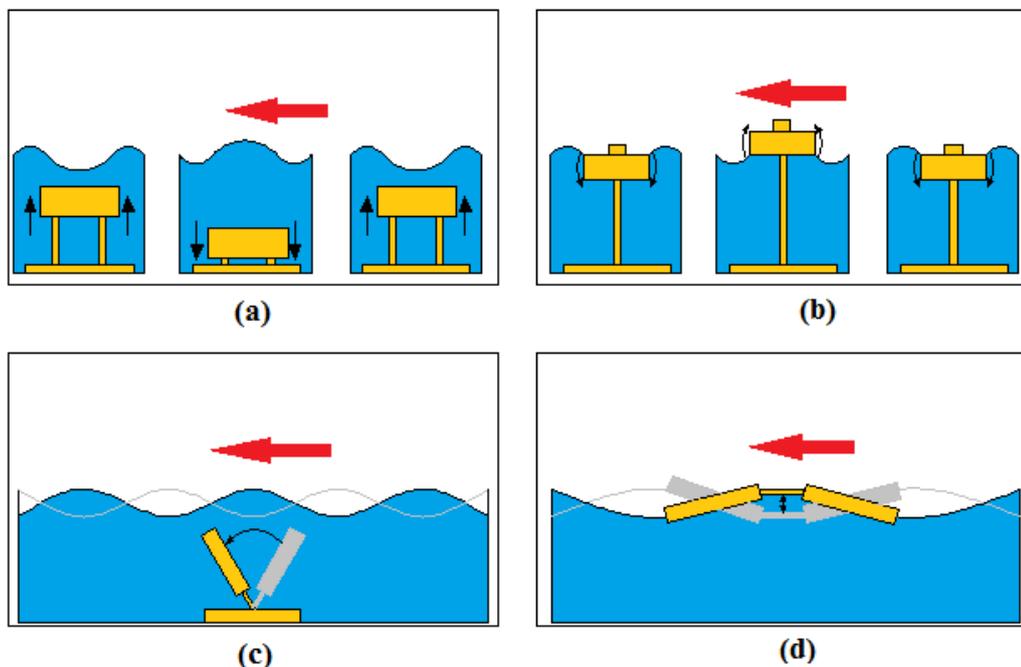


Figura 1.4 - Dispositivos corpos oscilantes: (a) absorção pontual submerso; (b) absorção pontual flutuante; (c) absorção pontual submerso – pêndulo; (d) corpo flutuante progressivo.

1.1. Motivação

A motivação do presente trabalho é analisar as diferenças nos resultados das simulações realizadas com escoamento no regime laminar e com modelos de turbulência para a potência pneumática disponível na região da turbina de um *OWC*, assim como o campo de pressões e velocidades do ar e da água no interior da câmara do mesmo dispositivo. Ao longo do período onde se tem estudado estes tipos de abordagem numérica, para o tema energia das ondas, são observados modelos que utilizam formulação em regime laminar e em outros casos em regime turbulento, porém, até então, não se observam propostas em que ocorra a análise da verdadeira necessidade, ou não, de utilizar a formulação turbulenta nas averiguações científicas dessa linha de pesquisa, comparando resultados entre as duas diferentes abordagens.

1.2. Objetivo

O objetivo desse estudo é analisar o comportamento do escoamento do ar e da água no interior do dispositivo *OWC* (câmara e chaminé), comparando os resultados das diferentes modelagens do escoamento (regime laminar e modelos de turbulência *RANS* e *LES*). Busca-se verificar a necessidade, ou não, nesse estudo, da utilização de um modelo de turbulência para a solução do problema.

1.2.1. Objetivos específicos

- a) Simular e verificar o escoamento laminar em um canal de ondas sem equipamento conversor;
- b) Simular e verificar o escoamento laminar em um canal de ondas contendo o dispositivo *OWC*;
- c) Simular e verificar o escoamento turbulento, para diferentes modelos, em um canal contendo o dispositivo *OWC*;
- d) Comparar os campos de velocidades, pressão e potência disponível para as diferentes abordagens do escoamento (laminar, *RANS* e *LES*);
- e) Incluir o efeito da turbina na chaminé do dispositivo e estudar a conversão de energia obtida com os diferentes modelos utilizados.

1.3. Estado da Arte

Ao longo dos anos, diversos trabalhos sobre o dispositivo conversor de energia das ondas em energia elétrica do tipo *OWC* (*Oscillating Water Column*) de forma experimental ou numérica foram realizados pela academia científica ao redor do mundo. Na maior parte dos artigos estudados até então, a abordagem da turbulência não vem sendo o destaque dos temas. Desta forma, na sequência são apresentados alguns trabalhos que abordaram o tema sobre o dispositivo *OWC*.

LÓPEZ et al. (2014) fizeram um estudo numérico bidimensional para otimização da turbina de um dispositivo *OWC*, utilizando um modelo de turbulência RANS – $k-\varepsilon$ e *VOF*. Para a simulação, os autores utilizaram o software STAR-CCM+. O estudo foi validado através de um modelo físico de um canal com um sistema de geração de ondas regulares e irregulares, variando os valores da altura da onda gerada. Os testes para otimização da turbina foram feitos numericamente para diferentes coeficientes de amortecimento da onda, captados através do modelo experimental. Resultados satisfatórios para o coeficiente de amortecimento foram alcançados para o modelo computacional desse estudo.

ITURRIOZ et al. (2015) fizeram a validação de um código compilado no OpenFOAM, no qual foi criado um solver intitulado por eles como *IHFOAM*. O mesmo foi aplicado à solução tridimensional do movimento da água e do ar através de um dispositivo *OWC*. O código utilizado pelos autores resolve as equações através do método *VOF* com a abordagem de turbulência *RANS*. O estudo foi validado com um modelo físico feito em laboratório em escala reduzida. A pressão de água e de ar, as velocidades, assim como a evolução da elevação da superfície livre, tanto fora quanto dentro da câmara do dispositivo obtiveram bons resultados na comparação com o modelo experimental.

Em LORENZINI et al. (2015) foi feito um estudo de otimização geométrica de um dispositivo *OWC* empregando as técnicas da Teoria Construtal de Adrian Bejan em um modelo computacional. O objetivo do trabalho foi encontrar o arranjo dimensional que converte a energia da onda incidente no equipamento na máxima potência elétrica ao variar e analisar a influência de três graus de liberdade: H_1/L (relação entre a altura e o comprimento da câmara do dispositivo *OWC*), H_2/l (relação entre a altura e o comprimento da chaminé do dispositivo *OWC*) e H_3 (submersão relacionada com a câmara e a chaminé do dispositivo, ou seja, a localização do equipamento segundo a profundidade do corpo d'água). Além dessas dimensões que foram variadas, são fixados como valores constantes os parâmetros: área total da câmara e a área total do dispositivo em si. O domínio computacional desse estudo consistiu em um dispositivo *OWC* inserido em um tanque onde foram geradas ondas regulares em escala real. A malha computacional

do sistema foi gerada com o programa comercial *ANSYS ICEM*[®] e o código *CFD* (dinâmica de fluidos computacional) do programa comercial *ANSYS FLUENT*[®] foi utilizado para calcular a solução através do método dos volumes finitos. O modelo multifásico (*VOF*) foi aplicado para avaliar a interação entre o ar e a água no sistema no regime laminar. Os resultados encontrados pelos autores levaram a uma recomendação teórica de maximização do desempenho do dispositivo, uma vez que uma variação da geometria do *OWC* e uma variação no valor da sua submersão podem melhorar os resultados inerentes a potência hidropneumática de 10,7 W até 190,8 W para variações das relações de $H_1/L = 0,135$, $H_2/l = 6$ e $H_3 = 9,5$ m em um clima de ondas incidentes com período de 5 segundos e comprimento de onda de 37,6 m. Para a realização deste trabalho os autores utilizaram o regime laminar para o escoamento.

GOMES et al. (2015) fizeram uma comparação entre dois tipos de restrições físicas aplicadas no interior da chaminé de um dispositivo *OWC*, com objetivo de representar numericamente a queda de pressão, imposta pela presença de uma turbina, no escoamento de ar no interior do dispositivo. Ao exemplo do que ocorre no presente trabalho, as equações de conservação da massa, quantidade de movimento e transporte da fração volumétrica são resolvidas pelo método dos volumes finitos, no regime laminar, assim como a interação entre ar e água utiliza, da mesma forma, o modelo multifásico (*VOF*). Inicialmente, nesse trabalho, foi introduzida uma restrição assimétrica em forma de corpo rombudo na saída da chaminé do equipamento, para assim investigar os efeitos sobre o escoamento. Subsequentemente, foi proposta uma segunda estratégia, onde uma restrição simétrica com formato elíptico foi aplicada no lugar do anterior, porém localizando-se no centro da chaminé. Como resultado, foi observado que o tipo de restrição aplicada ao modelo afeta os valores de potência, assim como o comportamento transiente da vazão mássica dentro da câmara do dispositivo. Por um lado, a restrição em formato elíptico aplicado ao centro da chaminé resultou em magnitudes de vazão mássica e queda de pressão semelhante tanto na exaustão quanto na sucção de ar para dentro da câmara. Por outro lado, na restrição em formato de corpo rombudo, aplicado na saída da chaminé, a pressão no interior da câmara se comportou de forma assimétrica, com maiores magnitudes de queda de pressão na exaustão do que na sucção do ar através da chaminé.

ELHANAFI et al. (2016) fizeram uma análise numérica, comparando com resultados de um modelo experimental de um dispositivo *OWC* utilizando os modelos de turbulência *RANS* – $k-\epsilon$, $k-\omega$ *SST* e *RSM*. O modelo *CFD* foi utilizado em testes para quantificar a relevância de alguns parâmetros de projeto, como a altura da onda que incide no equipamento e o amortecimento pneumático da turbina para caracterizar o desempenho hidrodinâmico e a capacidade de conversão de energia das ondas do equipamento. Para captar o campo de vazão mássica dentro da câmara do

OWC com melhor concordância, os autores realizaram um refinamento de malha adicional no local. Desta forma, os autores observaram que os modelos numéricos obtiveram desempenhos satisfatórios para a análise do escoamento na parte interna do dispositivo, assim como a captação dos vórtices formados nas bases da câmara do dispositivo.

MAHNAMFAR; ALTUNKAYNAK (2017) fizeram um estudo comparativo de um dispositivo *OWC* em um tanque de ondas experimental sediado em Istanbul, Turquia, com um modelo numérico simulado com um código comercial chamado *FLOW-3D*. Assim como no presente trabalho, no estudo numérico feito na universidade da Turquia, também foi utilizado um modelo de turbulência, a fim de comparar os resultados do campo de velocidade do ar na saída da chaminé do equipamento com os resultados obtidos no modelo físico real de um dispositivo *OWC* clássico e um modelo físico modificado do mesmo equipamento.

SHALBY et al. (2017) realizaram um modelo numérico através do software Matlab/Simulink e validaram o estudo de um dispositivo *OWC* através de um modelo experimental em escala de um equipamento que contém quatro câmaras. O modelo numérico proposto analisa a eficiência hidrodinâmica, o nível da superfície da água, a velocidade do ar no interior da câmara e a pressão do ar como índice de avaliação da eficiência da captura de energia do equipamento em uma única câmara. A teoria das ondas lineares foi empregada para o estudo com condições de ondas regulares de pequena amplitude, no regime laminar. Para o estudo não foram considerados no modelo os efeitos de difração, dos vórtices e dos efeitos viscosos. Os autores encontraram concordância aceitável do modelo numérico em relação aos dados experimentais de tal modo que consideraram o modelo como uma ferramenta para futuros estudos de desenvolvimento do dispositivo em condições de ondas irregulares, ou seja, em condições reais de utilização do equipamento.

BRUSCA et al. (2017) fizeram um estudo experimental do desempenho de um dispositivo *OWC* em função das características das ondas incidentes e da potência gerada pelo amortecimento da tomada de ar do equipamento, através de um furo com diâmetro variável. O estudo foi realizado através de um tanque de ondas em pequena escala com frequência e altura de ondas variáveis. Um método ótico, baseado em uma técnica de velocimetria por imagem de partículas foi utilizado para medir a altura da onda, a velocidade e a pressão do ar dentro e fora da câmara do equipamento. Os resultados obtidos pelos autores evidenciaram que ao utilizarem uma frequência de onda de entrada de 1 Hz, uma onda correspondente de 1 Hz foi obtida, enquanto uma frequência de entrada de 2 Hz levou a uma frequência de aproximadamente 1,6 Hz. Foi observado, dessa forma, que a mudança de frequência é constante conforme a modificação do diâmetro do furo que conduz ao amortecimento da tomada de ar do dispositivo. Segundo os autores o canal de ondas em escala reduzida utilizado

para esse estudo e os métodos de medição ótica podem ser implementados em futuros estudos que avaliem o comportamento geral dos sistemas de conversores de energia das ondas sob condições controladas.

RAJ et al. (2018) fizeram uma investigação experimental da hidrodinâmica de um dispositivo conversor de energia das ondas em energia elétrica com o princípio de água oscilante (*OWC*), onde o mesmo contém paredes portuárias na sua estrutura. Os autores denominaram esse tipo de dispositivo como *OWCH*. As paredes inseridas à estrutura do equipamento funcionam como um quebra mar que conduz a água em movimento oscilatório das ondas para o interior do dispositivo. O trabalho teve como objetivo analisar o efeito da ressonância e o ângulo de abertura das paredes integradas ao dispositivo em um estado aleatório do movimento das ondas para analisar o desempenho do dispositivo sobre condições controladas. A presença dessas paredes melhorou as características de desempenho do dispositivo *OWC*. Com a variação do comprimento e da inclinação das paredes, foi obtida uma largura de captura relativa (*RCW*), que é a relação da potência de saída pela potência de entrada, 75% maior do que um dispositivo sem as paredes.

ASHLIN et al. (2018) investigaram de forma experimental o desempenho hidrodinâmico de um conjunto de dispositivos de água oscilante (*OWC*) integrados com quebra – mar offshore destacado (*ODBW*). Um modelo em escala 1:20 do quebra – mar foi construído para integrar cinco dispositivos semelhantes e uma série de experimentos foi realizada em um tanque de ondas. Os autores variaram o espaçamento entre os dispositivos alocados ao quebra – mar com o objetivo de analisar o fator de amplificação da onda, a pressão do ar adimensional, a largura de captura e a largura de captura relativa. Foram considerados para o experimento três espaçamentos entre centro dos dispositivos diferentes, ou seja, o espaçamento de uma, duas e três vezes a largura do modelo *OWC*. Como resultado, os autores concluíram que o sistema com três vezes a largura do espaçamento do modelo obtém um melhor desempenho. A convergência das ondas em frente aos dispositivos, devido à obstrução do quebra – mar construído com cascalho para ondas progressivas aumenta a concentração de energia na frente do conjunto dos dispositivos e isso, segundo os autores, facilita a absorção de uma quantidade de energia pelo sistema cerca de 2,2 vezes a potência de entrada dada na frequência natural do sistema.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os modelos matemáticos e numéricos para os conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica, assim como a teoria de mecânica das ondas que alicerça todo o estudo mostrado no presente trabalho. Dentro da metodologia matemática, é descrito o modelo multifásico *VOF (Volume of Fluid)* que aborda a solução da equação do transporte de fração volumétrica da mistura entre água e ar, assim como a resolução das equações de conservação da massa e da quantidade de movimento através do método dos volumes finitos (MVF). Na metodologia numérica são apresentados os códigos responsáveis por solucionar as equações mencionadas através do *software* OpenFOAM.

2.1. Mecânica das Ondas

Segundo DEAN; DALRYMPLE (1991), o objetivo da mecânica das ondas é estudar os fenômenos que ocorrem na água devido à presença das ondas de superfície durante as fases de geração, propagação e rebentação.

As ondas são uma manifestação de forças que agem em um fluido com a tendência de deformá-lo. Os principais fatores que as geram são:

- rajadas de vento;
- abalos sísmicos;
- movimentação de embarcações nos corpos d'água;

A Figura 2.1 indica os principais parâmetros em duas dimensões dos quais uma onda é formada.

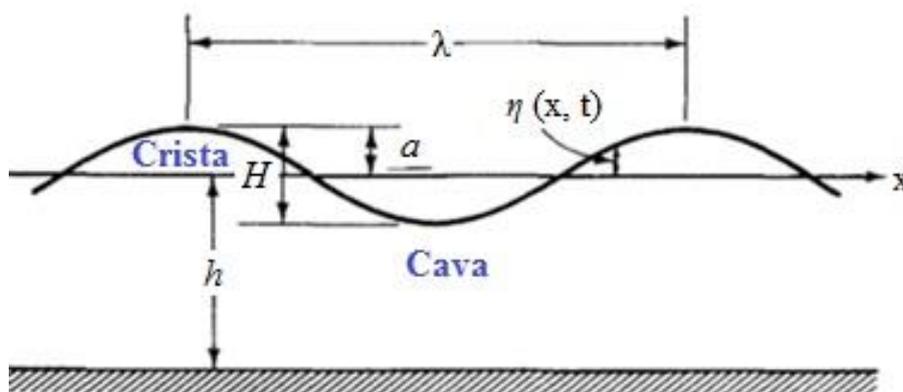


Figura 2.1- Principais parâmetros das ondas em uma visão bidimensional. Dean; Dalrymple, (1991).

Conforme ilustrado na Fig. 2.1, os principais parâmetros de uma onda bidimensional são:

- λ : comprimento da onda em [m];
- H : altura total da onda, medida entre uma cava e uma crista em [m];
- h : profundidade do corpo d'água em [m];
- a : amplitude da onda, medida entre a linha de repouso até a crista [m];
- η : elevação da superfície livre da água em função do tempo e de uma posição no espaço modelado;
- T : período da onda [s].

Denomina-se celeridade a velocidade de propagação de uma onda, que é calculada conforme a Eq. 2.1:

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad (2.1)$$

2.1.1. Teoria das ondas lineares de pequena amplitude

Conforme DEAN; DALRYMPLE (1991), essa teoria foi formulada por George Biddell Airy, onde é suposto que a altura da onda é pequena em relação ao seu comprimento e à profundidade do corpo d'água. Dessa maneira, podem-se linearizar as condições de contorno de superfície livre, fazendo com que as mesmas sejam satisfeitas em uma superfície média ao invés da própria superfície livre.

Para analisar as ondas de pequenas amplitudes, as condições de contorno para o problema são indicadas na Fig. 2.2:

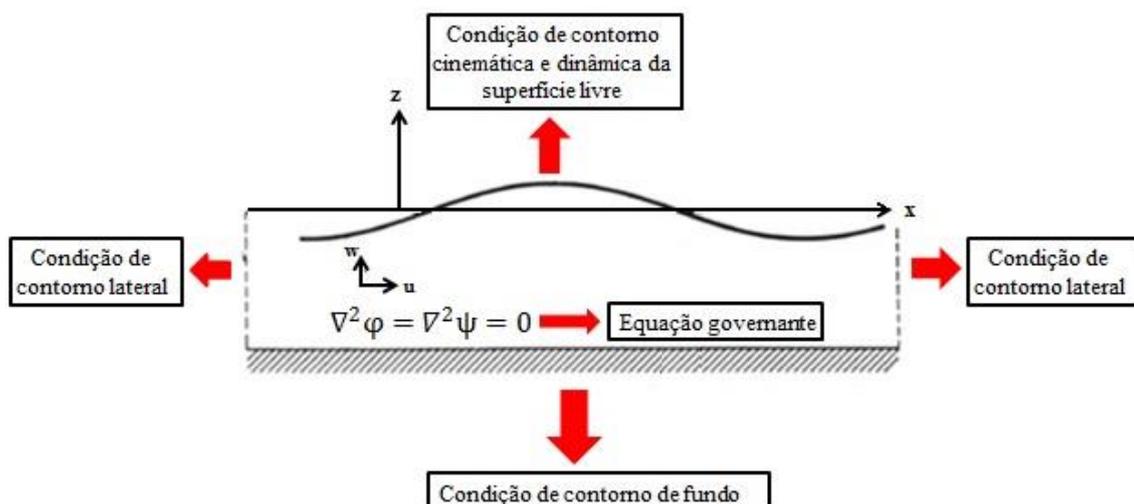


Figura 2.2 – Condições de contorno de uma onda monocromática de pequena amplitude.

Para estudar a região de contorno, primeiramente, é estabelecida a região de interesse a ser analisada e especificada a equação diferencial que melhor representa a região. A expressão matemática para a condição de contorno cinemática pode ser derivada a partir da equação que descreve a superfície limite. Qualquer superfície, sendo fixa ou em movimento pode ser expressa a partir de uma equação matemática do tipo $F(x, y, z, t)$, dada por:

$$\frac{DF(x,y,z,t)}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

ou, também:

$$-\frac{\partial F}{\partial t} = u \cdot \nabla F = u \cdot \mathbf{n} |\nabla F| \quad (2.3)$$

onde \mathbf{n} é o vetor normal á superfície livre, dado por:

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla F}{|\nabla F|} \quad (2.4)$$

Rearranjando a Eq. 2.3, tem-se:

$$u \cdot \mathbf{n} = -\frac{\partial F / \partial t}{|\nabla F|} \quad (2.5)$$

onde:

$$|\nabla F| = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2} \quad (2.6)$$

Ocorre uma implicação da Eq. 2.5, quando a componente da velocidade normal é relacionada à velocidade local da superfície. Se a superfície não se altera no tempo, $u \cdot \mathbf{n} = 0$, ou seja, $\mathbf{n} = 0$.

Com isso, as condições de contorno do problema são dadas por:

- Condição de contorno de fundo. O fundo é considerado impermeável e sem atrito, logo, $u \cdot \mathbf{n} = 0$.

- Condição de contorno cinemática da superfície livre. A superfície livre de uma onda pode ser escrita como $F(x, y, z, t) = 0 = z - \eta(x, y, t)$, onde $\eta(x, y, t)$ é o deslocamento da superfície livre sobre o plano horizontal a partir de $z = 0$. Logo, a expressão para essa condição de contorno é dada por:

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = \frac{\partial \eta / \partial t}{\sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y}\right)^2 + 1}} \quad (2.7)$$

A Eq. 2.7 resulta em:

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (2.8)$$

- Condição de contorno dinâmica da superfície livre. Uma superfície livre tal como a interface ar-água não pode suportar variações de pressão. Dessa forma, a pressão é considerada uniforme. Nesse sentido, é aplicada a equação de Bernoulli para valores de pressão constante na superfície $z = \eta(x, t)$:

$$-\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)^2 \right] + \frac{p}{\rho} + gz = \text{constante} \quad (2.9)$$

onde g é a aceleração da gravidade [m/s^2], ρ é a massa específica [kg/m^3] e p é a pressão [Pa].

- Condição de contorno lateral. Para as ondas que são periódicas no espaço e no tempo, as expressões que descrevem essa condição são dadas pelas Eqs. 2.10 e 2.11:

$$\varphi(x, t) = \varphi(x + L, t) \quad (2.10)$$

$$\varphi(x, t) = \varphi(x, t + T) \quad (2.11)$$

É importante frisar que são estabelecidas além das condições de contorno do problema, condições iniciais, que são o ponto específico inicial $x_0 = 0$ e o tempo inicial $t_0 = 0$.

Ainda segundo DEAN; DALRYMPLE (1991), o divergente do gradiente de Laplace (bidimensional) é dado por:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.12)$$

Para escoamentos não divergentes e irrotacionais, a equação de Laplace também se aplica nas linhas de corrente, representadas na Fig. 2.2 pela função corrente $\nabla^2 \psi$.

Neste sentido, uma das soluções da Eq. 2.12 fica definida como a função potencial de velocidade, dada por:

$$\varphi(x, z, t) = -\frac{H \cdot g \cdot \cosh[k(h+z)]}{2 \cdot \sigma \cdot \cosh(kh)} \text{sen}(kx - \sigma t) \quad (2.13)$$

onde k é o número de onda [1/m], que denota a periodicidade dimensional da onda e σ é a frequência da onda [1/s], que representa a periodicidade da onda no tempo.

A elevação da superfície livre, na presente teoria é dada pela Eq. 2.14:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.14)$$

A frequência da onda, σ , pode ser obtida a partir da equação de dispersão:

$$\sigma^2 = g \cdot k \cdot \tanh(kh) \quad (2.15)$$

As Equações 2.16 e 2.17 denotam a relação para o cálculo de k e σ :

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (2.16)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (2.17)$$

Com as equações apresentadas, a teoria de Airy classifica um corpo como águas rasas, profundas ou intermediárias através das seguintes relações:

- Águas rasas: $kh < \frac{\pi}{10}$ ou $\frac{h}{L} < \frac{1}{20}$;

- Águas profundas: $kh > \pi$ ou $\frac{h}{L} > \frac{1}{2}$;
- Águas intermediárias: $\frac{\pi}{10} < kh < \frac{\pi}{2}$ ou $\frac{1}{20} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2}$.

As componentes, horizontal e vertical, da velocidade de uma onda bidimensional linear são calculadas, respectivamente, pelas Eq. 2.18 e 2.19:

$$u = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{H \cdot \sigma \cdot \cosh[k(h+z)]}{2 \sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.18)$$

$$w = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{H \cdot \sigma \cdot \sinh[k(h+z)]}{2 \sinh(kh)} \sin(kx - \sigma t) \quad (2.19)$$

2.1.2. A teoria de Stokes

Conforme apontado por DEAM; DALRYMPLE, (1991), a teoria de Stokes é considerada como de carácter não linear e periódica. Esta teoria é utilizada em ondas de superfície que se propagam em profundidades médias e profundas (águas intermediárias e profundas).

O estudo dessa teoria é obtido através do método das perturbações, no qual se tem como objetivo encontrar a solução aproximada de um problema cuja solução exata é desconhecida, comparando com outro problema com solução conhecida próxima da solução do problema real, ou seja, à solução da teoria linear são acrescentados termos não lineares. Desta forma, os termos de primeira ordem apresentam carácter linear, fazendo com que a cada aumento de grau ocorra o aumento da não linearidade.

Para o presente trabalho é utilizado uma onda de Stokes de segunda ordem, onde o interesse está no formato das equações para as propriedades η , φ , u e w , onde, é acrescentado um parâmetro de perturbação $\varepsilon \ll 1$, uma ordem acima da teoria da onda linear de Airy. Nesse sentido, as mesmas são expressas por:

$$\eta = \eta_1 + \varepsilon \eta_2 = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{H^2 k \cosh(kh)}{16 \sinh^3(kh)} (2 + \cosh(2kh)) \cos[2(kx - \sigma t)] \quad (2.20)$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varepsilon \varphi_2 = -\frac{H g \cosh[k(h+z)]}{2 \sigma \cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t) - \frac{3 H^2 \sigma \cosh[2k(h+z)]}{32 \sinh^4(kh)} \sin[2(kx - \sigma t)] \quad (2.21)$$

$$u = -\frac{\partial\varphi}{\partial x} = \frac{H g k \cosh[k(h+z)]}{2 \sigma \cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3 H^2 \sigma k \cosh[2k(h+z)]}{16 \sinh^4(kh)} \cos[2(kx - \sigma t)] \quad (2.22)$$

$$w = -\frac{\partial\varphi}{\partial z} = \frac{H g k \sinh[k(h+z)]}{2 \sigma \cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t) + \frac{3 H^2 \sigma k \sinh[2k(h+z)]}{16 \sinh^4(kh)} \sin[2(kx - \sigma t)] \quad (2.23)$$

Ao fazer a análise de segunda ordem da teoria de Stokes, como resultado obtém-se mudanças na amplitude da crista da onda, fazendo com que a mesma cresça e reduza a amplitude da cava. Comparando com a teoria da onda linear de Airy, destacam-se as seguintes diferenças:

- Quanto ao formato da onda. Na teoria linear, a onda tem formato senoidal, onde a elevação máxima da crista é igual a elevação máxima da cava. Diferentemente, na teoria de Stokes, o termo não linear dá um caráter de crista mais fechada e cava mais achatada, fazendo com que a elevação da crista seja maior que a elevação da cava.
- Quanto ao deslocamento da partícula. Na teoria linear a partícula apresenta trajetória elíptica fechada, sem ocorrência de transporte de massa. Na teoria de Stokes, ocorre o transporte de massa, pois a trajetória não apresenta formato elíptico fechado.
- Quanto à velocidade de propagação. Em ondas lineares, a velocidade de propagação horizontal da qual obedece a uma trajetória elíptica é igual para a crista e para a cava. De forma diferente, na onda de Stokes, o termo de segunda ordem aumenta a velocidade, mas não de forma uniforme, mantendo velocidades maiores sobre a crista e menores na cava.

2.2. Modelos numéricos para conversores de energia das ondas

Neste subitem do são apresentados os modelos numéricos responsáveis pela solução das equações diferenciais que regem o tema do presente estudo. O termo *Computational Fluid Dynamics*, CFD (Dinâmica de Fluidos Computacional) é empregada para nomear a técnica de solução de equações com a utilização de computadores. As ferramentas computacionais denotam um grande auxílio nesse quesito, pois com o avanço tecnológico crescente das tecnologias no campo da informática, garante a possibilidade de solucionar os mais diversos problemas de engenharia que não apresentam solução analítica ou de solução muito complexa de ser obtida. De

acordo com MALISKA (2004), a versatilidade e generalidade dos métodos numéricos para a simulação e sua relativa simplicidade de aplicação dessas técnicas são outros fatores motivadores para seu uso na área científica. Ainda segundo o autor, existem três ferramentas para análise e desenvolvimento de um projeto: métodos analíticos, métodos numéricos (experimentação numérica) e experimentação em laboratório. Os dois primeiros são classificados como métodos teóricos, pois visam fazer a solução das equações diferenciais que regem o modelo físico a ser analisado. Em problemas de maior complexidade, os métodos analíticos são aplicáveis apenas a problemas cujas hipóteses simplificativas se desviam de forma demasiada do fenômeno real. Esses métodos são aplicados, de forma geral, a geometrias e condições de contorno simples. Porém, não devem ser descartadas, pois uma das suas importantes aplicações é na verificação numérica dos modelos computacionais e auxílio no desenvolvimento de métodos numéricos mais robustos.

No que se refere aos experimentos de laboratório, a vantagem é o fato de se tratar com uma configuração real do problema a ser resolvido. Entretanto, o elevado custo dos materiais para construção do modelo e a dificuldade em reproduzir as condições ideais e exatas do ambiente acabam inviabilizando o estudo.

A utilização dos métodos numéricos não apresentam restrições de uso, pois, basicamente, são capazes de solucionar problemas de maior complexidade, apresentando resultados com maior rapidez que os demais métodos. Nesse sentido, os custos de projeto podem apresentar sensíveis reduções.

O objetivo principal dos métodos numéricos de *CFD* é aproximar as equações da fração volumétrica e de conservação da massa e da quantidade de movimento através de um sistema de equações algébricas. As principais equações de conservação são apresentadas nos próximos itens.

2.2.1. Equação da fração volumétrica

Para o desenvolvimento do presente estudo, é necessária a resolução da equação da fração volumétrica do fluido, onde as equações de conservação são resolvidas para a mistura entre água e ar. Essa resolução é efetuada através do método *VOF (Volume of Fluid)*, conforme HIRT; NICHOLS (1981). Este método é aplicado em escoamentos multifásicos, onde existem dois ou mais fluidos imiscíveis. As fases consideradas são bem definidas, onde uma fase não pode ser ocupada pela outra. O conceito de fração volumétrica, f , é utilizado para representar cada fase do escoamento dentro de um único volume de controle. Para isso, é suposto que cada fração é contínua no espaço e no tempo e sua soma é sempre igual a um. Dessa forma, pode-se definir que f é a fração volumétrica

da água em cada célula computacional e a fração volumétrica do ar é calculada fazendo a relação $1 - f$. Nesse sentido, pode-se afirmar:

- para $f = 0$, a célula conterá apenas a fase ar;
- para $0 < f < 1$, a célula contém quantidades das duas fases (ar e água);
- para $f = 1$, a célula contém apenas a fase água.

Um único conjunto de equações de conservação da massa e conservação da quantidade de movimento é resolvido para as duas fases do problema. Na equação da conservação da massa (ou continuidade), na forma integral, seguindo o teorema do transporte de Reynolds, segundo FERZIGER; PERIC (2002) é dada pela Eq. 2.24:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{S(VC)} \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (2.24)$$

onde, VC é o volume de controle, $S(VC)$ é a superfície que envolve o volume de controle e \mathbf{n} é o vetor unitário ortogonal a esta superfície. Desta forma, ao aplicar o teorema de divergência de Gauss no termo advectivo, a integral de superfície é transformada em uma integral de volume, descrita, na forma diferencial, pela Eq. 2.25:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (2.25)$$

onde ρ é a massa específica [kg/m^3], t é o tempo [s] e \mathbf{V} é o vetor velocidade [m/s].

A equação da conservação da quantidade de movimento é descrita pela Eq. 2.26:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \mathbf{v} dV + \int_{S(VC)} \rho \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \sum F \quad (2.26)$$

onde F são as forças externas ao volume de controle [N/m^3].

O lado direito da igualdade pode ser expresso por propriedades intensivas como forças de superfície (pressões, tensões superficiais, normais ou de cisalhamento) ou, também, por forças de campo (gravidade, força eletromagnética, força centrífuga, entre outras). O tensor de tensões $\bar{\mathbf{\tau}}$,

levando-se como hipótese o escoamento como newtoniano é dado pela Eq. 2.27:

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = -\left(P + \frac{2}{3}\mu\nabla \cdot \boldsymbol{v}\right)\boldsymbol{I} + 2\mu\boldsymbol{D} \quad (2.27)$$

onde, \boldsymbol{I} é o tensor identidade, μ é a viscosidade do fluido [Pa.s] e \boldsymbol{D} é a taxa de deformação [N/m²] dada pela Eq. 2.28:

$$\boldsymbol{D} = \frac{1}{2}[\boldsymbol{grad} \boldsymbol{v} + (\boldsymbol{grad} \boldsymbol{v})^T] \quad (2.28)$$

Desta maneira, a forma diferencial da equação da conservação da quantidade de movimento é expressa pela Eq. 2.29:

$$\frac{\partial(\rho\boldsymbol{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\boldsymbol{v}\boldsymbol{v}) = \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}} + \rho\boldsymbol{b} \quad (2.29)$$

onde, \boldsymbol{b} são as forças de corpo por unidade de massa.

Uma equação de transporte advectivo é adicionada para a fração volumétrica da água em cada célula computacional do domínio para que seja feita a delimitação da interface água-ar, obtida pela Eq. 2.30:

$$\frac{\partial(\rho f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho f \boldsymbol{V}) = 0 \quad (2.30)$$

A massa específica média para os dois fluidos em todo domínio computacional é calculada pela Eq. 2.31, conforme pode ser visto em SRINIVASAN et al. (2011):

$$\rho = f\rho_{\text{água}} + (1 - f)\rho_{\text{ar}} \quad (2.31)$$

A viscosidade média para as duas fases é calculada pela Eq. 2.32:

$$\mu = f\mu_{\text{água}} + (1 - f)\mu_{\text{ar}} \quad (2.32)$$

2.2.2. Acoplamento Pressão Velocidade

Para realizar o acoplamento de pressão e velocidade, deve-se escrever uma formulação

semidiscretizada para a equação da conservação da quantidade de movimento, Eq. 2.29 vista anteriormente. Ao fazer o processo, cujo detalhamento é descrito em MALISKA (2004), resulta a seguinte expressão:

$$A_P v_P = H(v) - \nabla P - \rho g \nabla P + \sigma \nabla \cdot n \nabla f \quad (2.33)$$

onde, o termo $H(v)$, conforme JASAK (1996) e BARBOSA (2016), possui duas partes, que são os coeficientes dos volumes vizinhos ao volume analisado que é multiplicado pelas suas velocidades e um termo fonte. Ao substituir a velocidade na equação da continuidade, a expressão para pressão (Equação de Poisson) é descrita como a Eq. 2.34:

$$\nabla \cdot [[A_P]^{-1} \nabla P_{face}] = \nabla \cdot [[A_P]^{-1} H(v) - \nabla P - \rho g \nabla P + \sigma \nabla \cdot n \nabla f] \quad (2.34)$$

Para resolver as equações de conservação (massa e quantidade de movimento) e da fração volumétrica descritas, anteriormente, foi utilizado o algoritmo inserido no programa OpenFOAM chamado *PIMPLE*, OpenFOAM Foundation (2018), que é uma combinação do algoritmo *PISO* (*Pressure Implicit With Splitting of Operators*) com o algoritmo *SIMPLE* (*Semi-Implicit Method for Pressure – Linked Equations*), o qual resultou em boas aproximações e convergências de todas as simulações realizadas no presente trabalho.

2.2.3. Equação para o passo de tempo

Segundo BARBOSA (2016), para obter estabilidade na solução do problema é utilizada a variável do programa OpenFOAM chamada *self-adapting time step* em que o passo de tempo é adaptado a cada ciclo iterativo da resolução numérica do modelo. Essa adaptação é dada através do chamado número de *Courant* (*Courant Number*) através da Eq. 2.35:

$$Co = \frac{U_{face} S_{face}}{d S_{face}} \Delta t \quad (2.35)$$

onde d é um vetor entre dois pontos, S_{face} é a face da superfície de controle e U_{face} é a velocidade da superfície de controle.

Para obter o número de *Courant* local máximo são utilizados os valores de velocidade da superfície de controle e a variação do passo de tempo da iteração anterior. Dessa forma, um novo passo de tempo é calculado através da expressão dada pela Eq. 2.36:

$$\Delta t = \min \left(\frac{Co_{m\acute{a}x}}{Co^0} \Delta t^0, \left(1 + C_1 \frac{Co_{m\acute{a}x}}{Co^0} \right) \Delta t^0, c_2 \Delta t^0, \Delta t_{m\acute{a}x} \right) \quad (2.36)$$

onde $\Delta t_{m\acute{a}x}$ e $Co_{m\acute{a}x}$ são valores pré determinados pelo programador e c_1 e c_2 são valores em duas das funções que podem definir o passo de tempo.

Instabilidades podem ocorrer ao decorrer da simulação, devido valores pequenos para o passo de tempo. Para evitar essa situação é utilizado a Eq. 2.37 para avaliar valores intermediários:

$$\Delta t = \min \left(\frac{Co_{m\acute{a}x}}{Co^0} \Delta t_{inicial}, \Delta t_{m\acute{a}x} \right) \quad (2.37)$$

3. MODELAGEM DA TURBULÊNCIA

De acordo com SILVEIRA NETO (2002), a maioria dos escoamentos na natureza é turbulenta. Dentro das suas características, pode se dizer que são instáveis e contém flutuações que são dependentes do tempo e da posição no espaço, destacando-se, também, a multiplicidade de escalas que os caracterizam. As maiores estruturas (baixas frequências) são controladas pela geometria que fazem a geração e as menores estruturas (altas frequências) são controladas pela viscosidade do fluido.

Segundo BEJAN (2004), em um ponto de vista teórico, as equações de conservação que regem os escoamentos turbulentos e incompressíveis são as mesmas que descrevem os escoamentos para o regime laminar. A turbulência está presente na ocorrência de forças de inércia significativas em relação às forças viscosas do fluido.

A resolução analítica para as equações de conservação se tornam complexas, sendo viável, somente, após hipóteses simplificadoras e para poucos casos de natureza real. Além disso, o problema se torna mais complexo na medida em que ocorre a presença de outros fenômenos físicos que afetam a turbulência, tais como o empuxo e os domínios rotacionais, FERZIGER (1993). Para possibilitar a resolução desse tipo de problema são empregadas técnicas experimentais e numéricas para, assim, obter o fechamento matemático das equações com a finalidade de predizer os escoamentos em estudo.

No presente trabalho é utilizada a abordagem numérica com o auxílio da modelagem computacional para observar a necessidade, ou não, da aplicação dos modelos de turbulência em comparação com o regime laminar no estudo da ação das ondas em um dispositivo *OWC*.

Para o estudo foram utilizados os modelos de turbulência $k-\varepsilon$, $k-\omega$ *SST*, Spalart-Allmaras e Smagorinsky. Os três primeiros modelos, como já citado, são classificados na literatura como modelos RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), que são baseados na média temporal do escoamento. A modelagem, nessa situação, é realizada sobre todo o escoamento e é feita uma estimativa dos campos de velocidade e pressão médios do escoamento. O último modelo recebe a classificação de *LES* (*Large Eddy Simulation*). Essa abordagem se baseia em um processo de filtragem espacial, onde as grandes escalas são resolvidas de forma direta e as pequenas escalas são modeladas. Em comparação ao modelo RANS, o modelo *LES* requer um maior esforço computacional. Um maior detalhamento das teorias dos modelos de turbulência pode ser encontrado em MÖLLER; SILVESTRINI (2004) e SAUGAT (2006). É importante observar, também, que o modelo $k-\omega$ *SST* é uma fusão dos modelos $k-\varepsilon$ e $k-\omega$ clássicos, onde o primeiro é mais recomendado

para a modelagem de corrente livre e o segundo para as regiões nas proximidades de paredes.

3.1. Modelagem dos Escoamentos Turbulentos

As análises de forma numérica utilizando os modelos de turbulência contribuem para os estudos de uma forma geral devido ao seu baixo custo e possibilidade de observar o escoamento sobre inúmeros tipos de geometria, além de, possibilitar a análise do fenômeno em locais de difícil acesso para realização de estudos experimentais. Sua simulação requer atenção na predição adequada, assim como nos experimentos de laboratório, pois a imposição inadequada das condições iniciais e de contorno no problema podem gerar diferenças determinantes para os campos de velocidade e pressão comparados aos medidos no experimento físico real, Dos SANTOS (2011). Segundo ROGALLO; MOIN (1984), a maior dificuldade dos estudos com turbulência está na especificação de condições de contorno que dependem da condição desconhecida fora do domínio, desta forma, as mesmas devem ser impostas com finalidade de diminuir a propagação de erros oriundos das perturbações do escoamento. Conforme DESCHAMPS (2002), outra observação importante a ser considerada na simulação de escoamentos turbulentos está associada à discretização espacial do domínio, em especial, nas regiões onde ocorre a maior intensificação dos gradientes de velocidades (próximo a paredes e escoamentos sob efeito de estratificação). Em contrapartida, essa maior discretização espacial do domínio acaba por aumentar a quantidade de equações a serem solucionadas de forma simultânea, elevando consideravelmente o tempo computacional do problema a ser analisado. Para a redução deste tempo, segundo DESCHAMPS (2002) e Dos SANTOS (2011), a inserção de funções de parede é empregada para diminuir a requisição de malha nestas regiões.

Há três metodologias comumente utilizadas para solução numérica dos escoamentos turbulentos: modelagem clássica da turbulência (*RANS*), Simulação de Grandes Escalas (*LES*) e Simulação Numérica Direta (*DNS*), LESIEUR et al. (2005).

Segundo REZENDE (2009), tendo em vista que a turbulência é qualificada por um grande número de escalas temporais e espaciais, elevando-as conforme o aumento do número de Reynolds, a simulação com o modelo *DNS* torna-se inviável em um ponto de vista prático, levando-se em consideração o extremo esforço computacional, tornando, assim, os modelos *RANS* e *LES* alternativas mais favoráveis para predição numérica dos fenômenos que envolvem turbulência. A Fig. 3.1 mostra o nível percentual do grau de modelagem de cada um dos três modelos em relação ao custo computacional empregado em cada um deles.

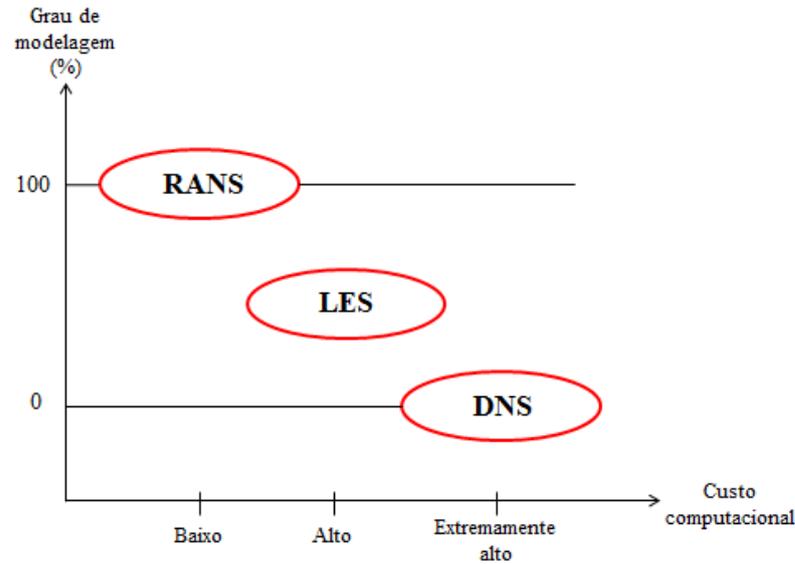


Figura 3.1- Grau de modelagem versus custo computacional dos modelos de turbulência.

Adaptado de Rezende (2009).

No presente trabalho, foram utilizados modelos baseados nas duas primeiras metodologias citadas, a qual é feita uma sucinta revisão na sequência do capítulo.

3.1.1. Modelagem Clássica da Turbulência (*RANS*)

Nesta metodologia, segundo WILCOX (2004) e Dos SANTOS (2011) é feita uma média temporal sobre as equações de conservação que descrevem o escoamento estudado, onde as variáveis do problema (velocidade e pressão) são decompostas em uma parcela média e outra flutuante no tempo. Ao ser aplicado o operador média temporal no equacionamento, novas incógnitas surgem em função da parcela advectiva da equação da quantidade de movimento não ser linear. Os termos que surgem são chamados de tensão de Reynolds e contribuem para a determinação dos campos turbulentos médios. Dessa maneira o número de equações de conservação permanece inalterado, porém há inserção de mais incógnitas nas equações o que dá origem ao problema do fechamento dessas equações. Essa abordagem é aplicável para escoamentos estacionários ou que contenham pequenas variações no tempo, conforme é ilustrado na Fig. 3.2.

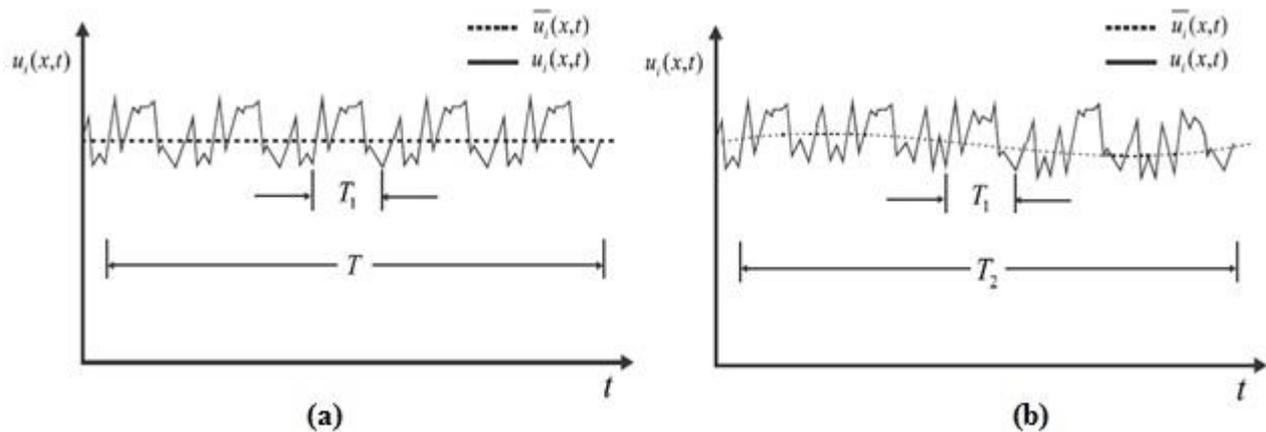


Figura 3.2 - Média temporal de um campo instantâneo: (a) escoamento estacionário e (b) escoamento não estacionário com pequenas variações. Fonte: Dos SANTOS (2011).

A variável instantânea ao longo de um intervalo de tempo é integrada com a finalidade de obter as variáveis temporais médias. Para escoamentos estacionários (Fig. 3.2 a), o período de tempo (T) deve ser muito maior do que o das flutuações de velocidades (T_1), onde $T \gg T_1$. Para os escoamentos onde há pequenas variações temporais (Fig. 3.2 b), além do período de integração ser muito maior do que o das flutuações das variáveis, o mesmo deve ser muito menor do que as escalas de tempo que são características das pequenas variações temporais, não associadas com a turbulência do escoamento (T_2), ou seja: $T_1 \ll T \ll T_2$.

Para ser possível a resolução do problema de fechamento das equações de conservação com as novas incógnitas inseridas a elas são aplicados modelos de turbulência, que são novas equações inseridas ao modelo em estudo com intuito de igualar a quantidade de incógnitas à quantidade de equações que descrevem o problema. Estes modelos, segundo HINZE (1975), são classificados em modelos dependentes ou independentes do conceito de viscosidade turbulenta de Boussinesq.

Nos modelos que são dependentes da viscosidade turbulenta, há a classificação quanto ao número de equações diferenciais adicionais ao sistema de equações de conservação. São exemplos de modelos, o modelo com zero equação (comprimento de mistura de Prandtl), modelos com uma equação (Spalart – Allmaras) e modelos com duas equações (κ - ϵ , κ - ω e suas variações).

Estes modelos podem apresentar dificuldades na predição de escoamentos afastados da condição de equilíbrio, como em modelagem de dutos com secção transversal não circular e escoamentos sobre superfícies curvas, fazendo-se assim necessário a utilização de constantes no desenvolvimento do modelo. Sua vantagem sobre os demais modelos (*LES* e *DNS*) é a não necessidade de um refinamento acentuado na discretização espacial e temporal do problema, o que

diminui o tempo e o esforço computacional da solução do problema.

3.1.2. Simulação de Grandes Escalas (*LES*)

Com intuito inicial de simular apenas as grandes escalas de escoamentos atmosféricos, tendo em vista a impossibilidade da simulação de um espectro por completo, o modelo *LES* (*Large Eddy Simulation*), segundo LESIEUR et al. (2005) introduz a viscosidade submalha de Smagorinsky para realizar o fechamento das equações de conservação da quantidade de movimento. Esse tipo de modelagem não obteve o sucesso esperado para o tipo de escoamento citado, pois ocorrem diversas dissipações das grandes escalas, porém, o modelo de Smagorinsky tem sido largamente utilizado no âmbito industrial.

De acordo com FERZIGER (1993), a classificação das estruturas dos escoamentos em pequenas ou grandes escalas é definida conforme a característica local do escoamento, onde as grandes escalas são as que dominam a dinâmica local do escoamento e são as determinantes principais dos parâmetros analisados. Esta categoria também inclui os vórtices responsáveis pelo transporte da quantidade de movimento e energia (se incluso no estudo), assim como da produção da turbulência do escoamento em si. É importante frisar, também, que as dimensões dessas escalas variam de acordo com a aplicação do escoamento, ou seja, para exemplificar pode-se fazer a observação de que a grande escala de um escoamento atmosférico é muito maior do que a de um escoamento em um canal de dimensões pequenas.

A simulação de grandes escalas (*LES*) possui características similares ao modelo *DNS* (Simulação Numérica Direta), pois em ambos se faz possível a coleta de campos instantâneos de velocidades, pressão e temperatura e fazer a predição estatística adequada da turbulência, assim como fazer a captura coerente dos escoamentos, LESIEUR et al. (2005) e Dos SANTOS (2011).

Através de um processo de filtragem espacial, esse método propõe a eliminação das pequenas escalas, obtendo equações de evolução para as grandes escalas para resolução direta, onde a dimensão do filtro é caracterizada pela discretização espacial do domínio e os efeitos das pequenas escalas são estimados pelos denominados modelos de submalha.

3.2. Modelagem matemática dos modelos RANS

Nesse item são demonstrados os principais equacionamentos dos modelos *RANS* que foram abordados no estudo.

3.2.1. Modelos *k-ε* e *k-ω SST*

De acordo com LAUNDER; SPALDING (1974), WILCOX (2004), VERSTEEG;

MALALASEKERA (2007) e FERRAZ et al. (2015), para os modelos *RANS* $k-\varepsilon$ e $k-\omega$ uma viscosidade turbulenta é calculada através das Eqs. 3.1 e 3.2:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k_T^2}{\varepsilon} \quad (3.1)$$

$$\nu_t = \alpha^* \frac{k_T}{\omega} \quad (3.2)$$

onde, $C_\mu = 0,09$ e α^* é o coeficiente de amortecimento turbulento que faz uma correção numérica para valores de baixo número de Reynolds. Ainda, segundo os autores, a equação da energia cinética turbulenta, expressa por k_T em ambos os modelos é calculada pela Eq. 3.3:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial k_T}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{k_T}} \right) \frac{\partial k_T}{\partial x_j} \right] - \varepsilon \quad (3.3)$$

Por sua vez, a energia de dissipação, “ ε ”, para o modelo $k-\varepsilon$ é dada pela Eq. 3.4:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k_T} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k_T} \quad (3.4)$$

onde $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$ e $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

No modelo $k-\omega$ é calculada uma taxa específica da energia cinética turbulenta, ω , dada pela Eq. 3.5:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega \quad (3.5)$$

onde $\sigma_k = 2,0$, $\sigma_\omega = 2,0$ e os termos G_ω e Y_ω são, respectivamente, a parcela de geração e de dissipação do termo “ ω ”.

As constantes empíricas do modelo $k-\omega$ SST são obtidas da mescla das constantes dos modelos clássicos já citados. Sabendo que ϕ é constante do modelo $k-\omega$ SST, ϕ_1 e ϕ_2 , sendo, respectivamente, as constantes dos modelos $k-\omega$ e $k-\varepsilon$, essa mescla é obtida através da Eq. 3.6:

$$SST = F_1(k - \omega) + (1 - F_1)(k - \varepsilon) \quad (3.6)$$

onde F_1 é denominada função de mistura.

A equação para energia cinética turbulenta é a mesma utilizada no modelo $k-\varepsilon$, todavia, a dissipação da energia cinética por energia cinética unitária, ω , é dada pela Eq. 3.7:

$$\frac{D}{Dt}(\rho\omega) = \nabla \cdot (\rho D_\omega \nabla \omega) + \frac{\rho\gamma_\Phi G}{\nu} - \frac{2}{3}\rho\gamma_\Phi\omega(\nabla \cdot \mathbf{u}) - \rho\beta_\Phi\omega^2 - \rho(F_1 - 1)CD_{k\omega} + S \quad (3.7)$$

A viscosidade turbulenta do modelo SST, ν_t é expressa pela Eq. 3.8:

$$\nu_t = \frac{a_1 k_T}{\max(a_1 \omega; SF_2)} \quad (3.8)$$

onde, $a_1 = 0,31$ é uma constante empírica e S é módulo do tensor deformação do escoamento médio, expresso por S_{ij} dado pela Eq. 3.9:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.9)$$

As funções F_1 e F_2 são denominadas de funções de mistura da viscosidade turbulenta e são expressas, respectivamente, pelas Eqs. 3.10 e 3.11:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k_T}}{\beta_\Phi^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right); \frac{4\rho\sigma_\omega \phi k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (3.10)$$

$$F_2 = \tanh \left[\max \left(\frac{\sqrt{k_T}}{\beta_\Phi^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right)^2 \right] \quad (3.11)$$

onde β_ϕ^* e $\sigma_{\omega,\phi}$ são constantes empíricas e y é a distância da parede. O termo $CD_{k\omega}$ é a parcela positiva do termo de difusão cruzada, definida pela Eq. 3.12:

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega,\phi}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k_T}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-10}\right) \quad (3.12)$$

Para calcular a taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta, ω , utiliza-se a Eq. 3.13:

$$\omega = \frac{k_T^{0,5}}{C_\mu^{0,25}l} \quad (3.13)$$

A Tabela 3.1 indica os coeficientes utilizados nas equações apresentadas:

Tabela 3.1 – Coeficientes das equações do modelo $k-\omega$ SST.

Coeficiente	$\Phi_1(k-\omega)$	$\Phi_2(k-\varepsilon)$
β_ϕ^*	0,0900	0,0900
β_ϕ	0,0750	0,0828
γ_ϕ	0,5532	0,4403
$\sigma_{\omega,\phi}$	2,0000	1,1680
$\sigma_{k,\phi}$	1,1760	1,0000

3.2.2. Modelo Spalart - Allmaras

No modelo de Spalart-Allmaras é resolvida uma equação extra para o problema dado, segundo ANSYS (2007) e SPALART; ALLMARAS (1992) pela Eq. 3.14:

$$\frac{\partial v_t}{\partial t} + \frac{\partial v_t}{\partial x_i} u_i = G_v + \frac{1}{\sigma_{\bar{v}}}\left[\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{(v + v_t)\frac{\partial v_t}{\partial x_j}\right\} + C_{b2}\left(\frac{\partial v_t}{\partial x_j}\right)^2\right] - Y_v \quad (3.14)$$

onde, v_t é a viscosidade cinemática turbulenta, exceto para regiões próximas a paredes. Y_v é a destruição da viscosidade turbulenta que ocorre em uma região próxima a parede, G_v é a viscosidade turbulenta de produção, $\sigma_{\bar{v}} = 2/3$ e $C_{b2} = 0,622$ são constantes do modelo em questão.

3.3. Modelagem matemática do modelo LES

No presente item é mostrado o equacionamento principal do modelo de turbulência *LES* utilizado para solucionar o problema.

3.3.1. Modelo Smagorinsky

No modelo *LES* Smagorinsky, uma constante $C_S(x, t)$ e o número de Prandtl turbulento Pr_{sgs} são dinamicamente computados. Segundo Saugat (2006), para esse cálculo são utilizados filtros espaciais de diferentes comprimentos, os quais computam a transferência de energia entre as escalas do movimento. A constante de Smagorinsky é expressa, pela Eq. 3.15.

$$C_S(x, t) = -\frac{1}{2} \frac{L_{ij} M_{ij}}{M_{ij} M_{ij}} \quad (3.15)$$

onde:

$$L_{ij} = \langle \bar{v}_i \bar{v}_j \rangle - \langle \bar{v}_i \rangle \langle \bar{v}_j \rangle \quad (3.16)$$

$$M_{ij} = \langle \bar{\Delta} \rangle^2 \langle |\bar{S}| \rangle \langle \bar{S}_{ij} \rangle - \bar{\Delta}^2 \langle |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \rangle \quad (3.17)$$

$$|\langle \bar{S} \rangle| = \sqrt{2 \langle \bar{S}_{ij} \rangle \langle \bar{S}_{ij} \rangle} \quad (3.18)$$

$$\langle \bar{S}_{ij} \rangle = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \langle \bar{v}_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle \bar{v}_j \rangle}{\partial x_i} \right) \quad (3.19)$$

4. DESCRIÇÃO E VERIFICAÇÃO DO PROBLEMA

O presente trabalho realiza a modelagem computacional de um dispositivo conversor de energia das ondas em energia elétrica do tipo *OWC*. Para a elaboração do domínio computacional e o desenvolvimento da geometria e da malha na etapa de pré-processamento foi utilizado o *software* de código livre *GMSH*. Com este programa há possibilidade de moldar livremente, o refinamento da malha em localizações pontuais de interesse na geometria desenhada.

Para a etapa de processamento do problema, onde são solucionadas as equações de conservação, o programa utilizado foi o OpenFOAM, versão 2.4.0. Trata-se, também, de um software livre. O solver utilizado no código do programa se chama *interFOAM*. Este trata da resolução de problemas incompressíveis e bifásicos utilizando o modelo *VOF (Volume of Fluid)*.

Na etapa de pós-processamento, por sua vez, o programa utilizado chama-se *VisIt*. Trata-se, também, de um software livre, com interface gráfica intuitiva para geração de gráficos, gradientes e vídeos das simulações dos problemas.

Os resultados mostrados nesse trabalho foram gerados no Laboratório de Simulações Numéricas (Labsin2), que é localizado na escola de engenharia da Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Para execução das simulações foi utilizado um computador com processador i7 – 5930K de 3,5 GHz. O equipamento suporta até 12 processos executados de forma simultânea, o que possibilitou a simulação de três casos, paralelos, sem a diminuição do desempenho da máquina e por consequência do aumento excessivo no tempo total de convergência em cada processo executado.

Os tempos de convergência das simulações em cada etapa do estudo são apresentados de forma resumida pela Tab. 4.1. É importante frisar que para as simulações onde foi adicionado o efeito de uma turbina no interior da chaminé do equipamento, resultados para o modelo de turbulência *LES* não são observados para as simulações com malha computacional de 426885 elementos. Esse fato ocorre devido à discretização não atender ao critério de discretização espacial que deve ser aplicado no modelo citado. Cada etapa do estudo, assim como o critério adotado para discretização espacial do modelo *LES* são detalhados nos próximos itens do trabalho.

Tabela 4.1- Tempo computacional das simulações.

Etapa	Período Simulado [s]	Modelo	Tempo Computacional [h]
1ª (apenas canal)	70	Laminar	1,5
2ª (<i>OWC</i> sem efeito turbina)	70	Laminar	2,5
2ª (<i>OWC</i> sem efeito turbina)	70	<i>RANS</i>	4
3ª (<i>OWC</i> com efeito de turbina) malha 426.885 elementos	70	Laminar	36
3ª (<i>OWC</i> com efeito de turbina) malha 426.885 elementos	70	<i>RANS</i>	48
3ª (<i>OWC</i> com efeito de turbina) malha 1.477.778 elementos	70	Laminar	150
3ª (<i>OWC</i> com efeito de turbina) malha 1.477.778 elementos	70	<i>RANS</i>	210
3ª (<i>OWC</i> com efeito de turbina) malha 1.477.778 elementos	70	<i>LES</i>	260

4.1. Canal de ondas sem dispositivo

Neste item é apresentada a análise de um canal de ondas sem o dispositivo *OWC*, com a finalidade de verificar os resultados das simulações computacionais comparando à solução analítica do problema. Um teste de independência de malha foi realizado para comparar a elevação da superfície da água para um canal com comprimento total $L_T = 327$ m, altura total $H_T = 14$ m e profundidade do corpo d'água de $h = 10$ m. Uma linha de monitoramento foi posicionada a 100 m do batedor de ondas, conforme pode ser visualizado na Fig. 4.1.

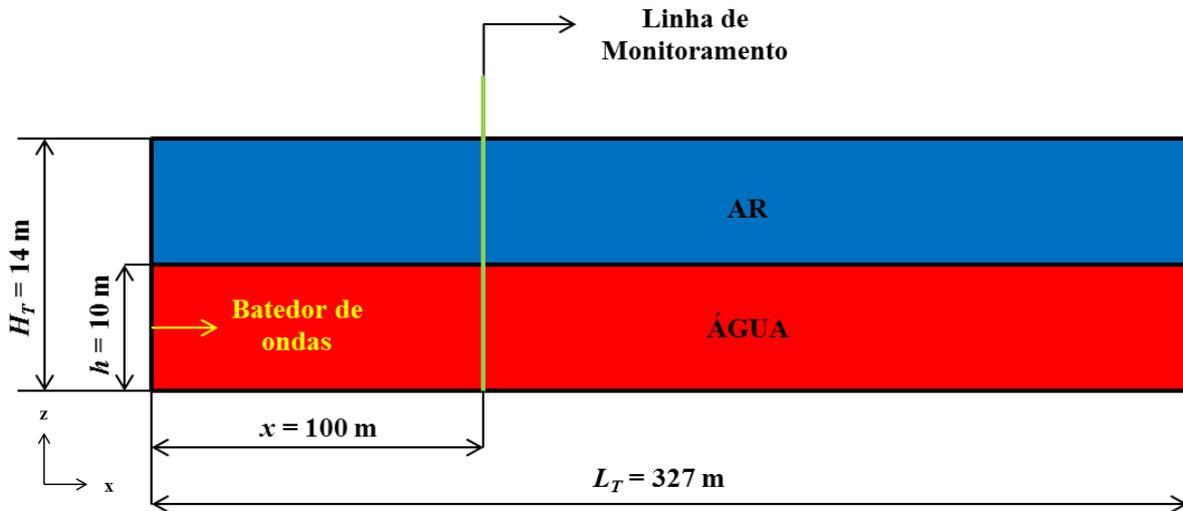


Figura 4.1- Canal de ondas e suas medidas.

As condições de contorno e iniciais para o mesmo canal da Fig. 4.1 são ilustradas na Fig. 4.2.

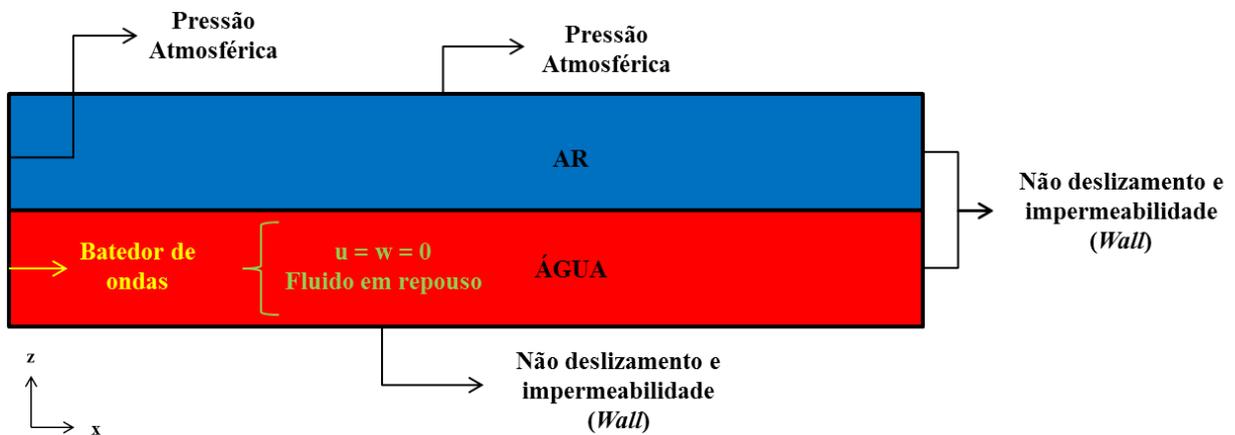


Figura 4.2 - Condições de contorno do canal de ondas.

A condição de contorno *Wall* estabelece velocidade igual a zero nos locais definidos (borda direita e o fundo do canal). A parte superior do canal e a lateral esquerda, logo a cima da região do batedor de ondas, são definidas como condição de pressão atmosférica, ou seja, $P = 0$. Na condição do batedor de onda, as Eqs. (2.22) e (2.23) são especificadas como velocidade prescrita. Com relação à fração volumétrica, no batedor de ondas $f = 1$ enquanto que em todas as outras superfícies (*wall* e atmosfera) a condição de zero gradiente (derivada nula) é especificada.

Consideraram-se como condições iniciais do problema as velocidades prescritas nulas nas duas direções (x e z), ou seja, o fluido em repouso e o corpo d'água possuindo profundidade $h = 10$ m.

Quanto às características da onda utilizada na etapa presente do estudo, a Tab. 4.2 descreve os parâmetros simulados, de acordo com valores encontrados para ondas na costa sul brasileira.

Tabela 4.2 - Propriedades da onda utilizada nas simulações.

Propriedade	Valor	Unidade
Comprimento	65,4	m
Amplitude	0,5	m
Profundidade	10	m
Período	7,5	s

A solução analítica foi obtida através da curva plotada com a Eq. 2.20 e dessa forma comparou-se aos resultados da solução numérica do problema no regime laminar. Este teste visou aproximar ao máximo, ambas as soluções, a partir de refinamentos sucessivos da malha computacional.

A verificação numérica apresentada tem como premissa a observação da confiabilidade do código numérico, através da convergência do mesmo. Para a geração da malha no canal de ondas, um maior refinamento localizado na interface ar-água foi feito com a finalidade de obter melhores resoluções no pós-processamento, tendo em vista que ocorre a maior variação do parâmetro f do modelo *VOF*, que indica a quantidade de água, de ar e da mistura de ambos os elementos contidos na região. As demais regiões do canal (fundo e ar atmosférico) mantêm um refinamento menos acentuado devido a não ocorrência de fenômenos de maior importância nas análises. A Fig. 4.3 mostra a malha no domínio completo de simulação e a Fig. 4.4 detalha o local de maior refinamento.

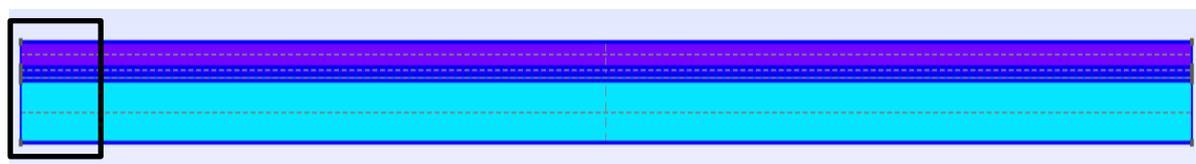


Figura 4.3- Malha no domínio completo sem o dispositivo.

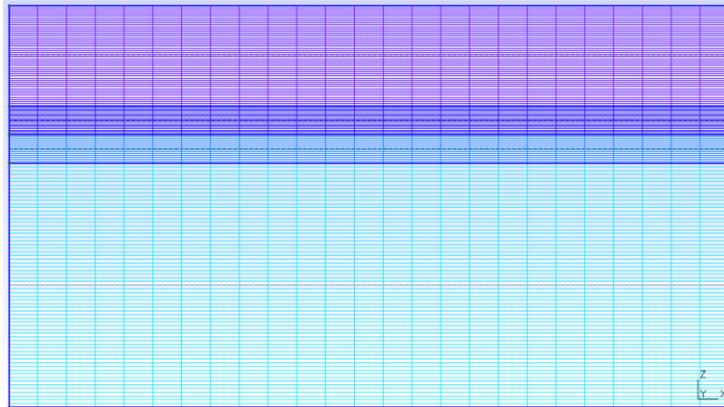


Figura 4.4 - Detalhe do refinamento na região da interface ar-água.

A Tabela 4.2 mostra o teste de refinamento de malha para o canal sem o dispositivo *OWC*.

Tabela 4.3- Teste de independência de malha.

n	Elementos	η [m]	erro %
1	104652	0,449687958	$1,40 \times 10^{-1}$
2	112518	0,449057579	6,86
3	139536	0,482107162	1,20
4	150024	0,487980843	$6,57 \times 10^{-1}$
5	182856	0,484794617	-

Critério de erro % = $100(\eta^{n+1} - \eta^n)/\eta^{n+1} \leq 1$

A malha considerada independente é a de número 4, pois apresentou a maior aproximação da medida da elevação da superfície da água a 100 metros de afastamento da região do batedor de ondas em um período de 28,5 segundos (primeiro período com maior crista de onda na região). A diferença em relação à solução analítica foi de 0,31%. Na discretização do domínio foram utilizados 400 pontos para dividir as linhas horizontais do tanque e 67 pontos na linha vertical abaixo da região com maior refinamento. Na localização da interface ar-água, a linha vertical da primeira região mais inferior foi dividida em 16 pontos e a subsequente, logo acima, foi dividida em 20 pontos. A região mais acima do domínio teve sua linha vertical dividida em 48 pontos. Essa

configuração de divisão dos elementos de malha, denominada de *stretched* foi observada em MAVRIPILIS (1997) e GOMES (2014), onde a divisão dos volumes é equivalente a $H/20$ referente à altura da onda e de $L/50$, referente ao comprimento da onda. A Fig. 4.5 apresenta as curvas dos resultados obtidos na verificação numérica do problema para a altura da superfície livre da água em função do tempo.

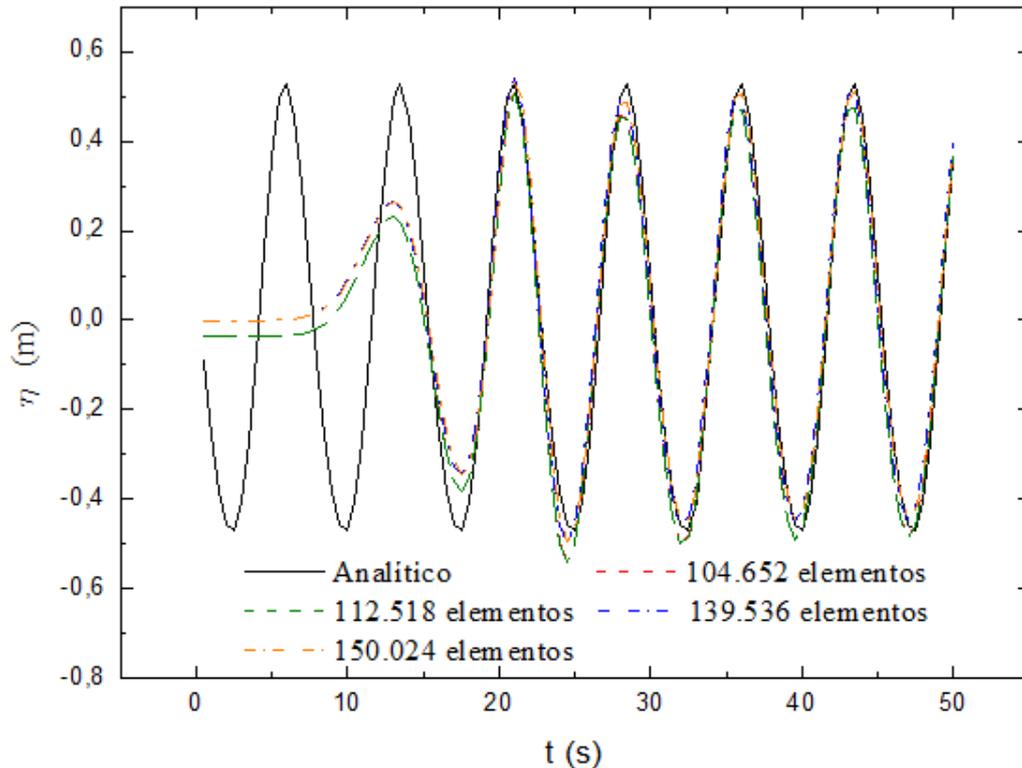


Figura 4.5- Teste de independência de malha.

4.2. Canal de ondas com o dispositivo *OWC*

Neste processo, a estrutura do dispositivo *OWC*, é adicionada ao canal de ondas. Com essa nova configuração da geometria, faz-se a comparação entre os resultados da simulação em regime de escoamento laminar e com os modelos de turbulência adicionados ao problema. Em uma primeira análise, a elevação da superfície livre da água é monitorada na sonda de análise, a uma distância de 204,5 m em relação ao bater de ondas. A vazão mássica de ar foi mensurada na saída da chaminé do equipamento, a fim de observar as diferenças entre os dois regimes de escoamento. A Fig. 4.6 ilustra a geometria do equipamento inserida ao tanque de ondas com a linha de monitoramento.

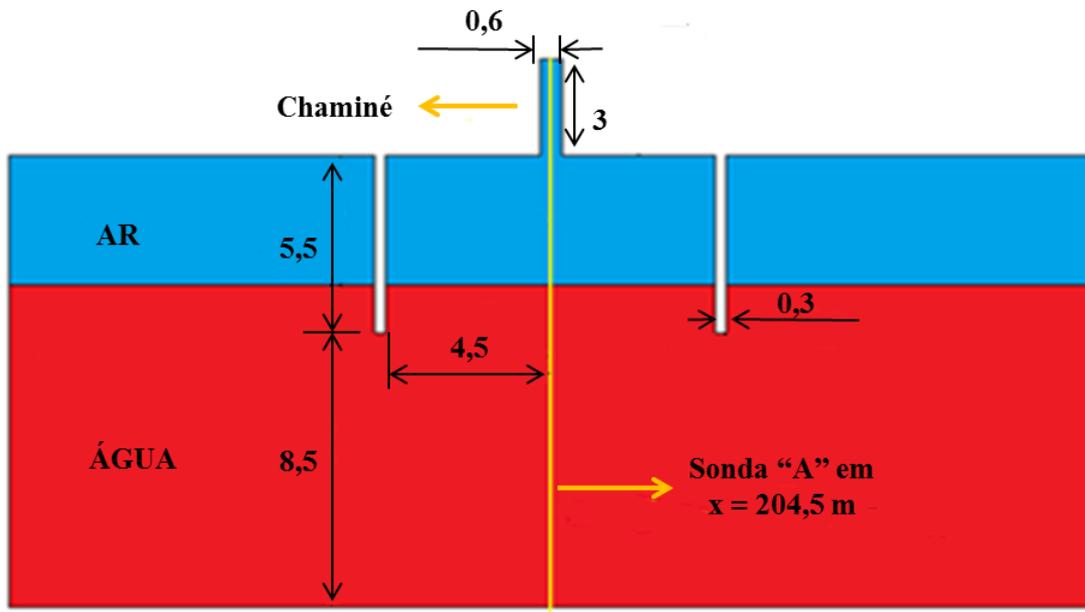


Figura 4.6 - Canal de ondas com dispositivo *OWC* e linha de monitoramento (medidas em metros).

A Fig. 4.7 ilustra as condições de contorno adicionais para a mesma geometria apresentada na Fig. 4.6.

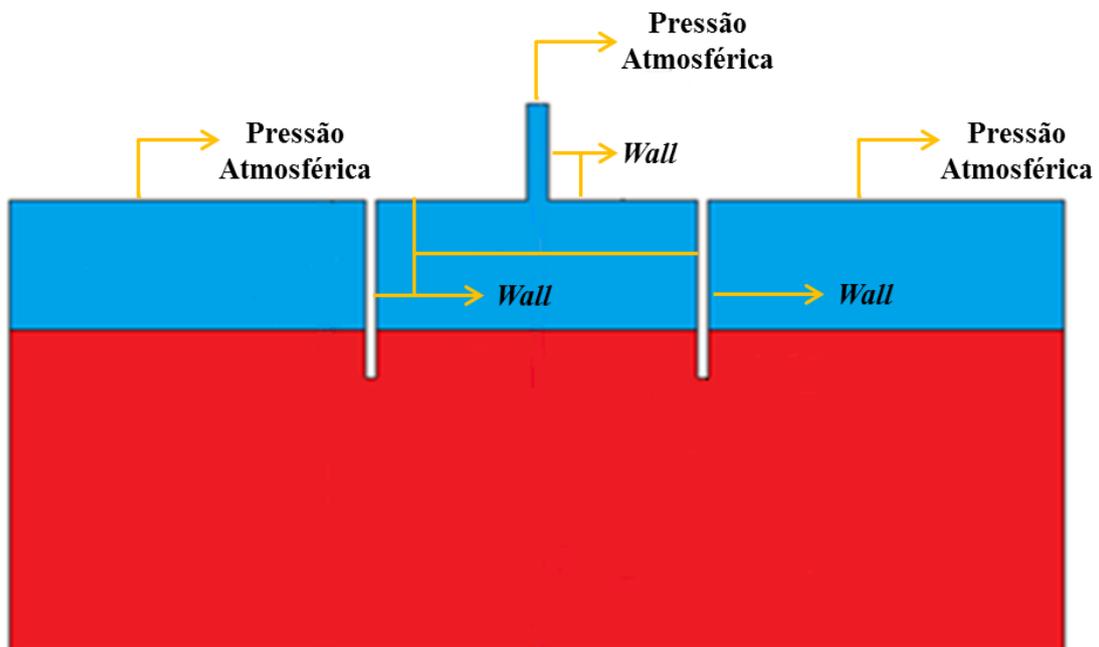


Figura 4.7 - Condições de contorno referentes ao dispositivo.

As condições de contorno referentes às extremidades laterais do tanque são iguais às mostradas na Fig. 4.2, em um canal sem equipamento.

Com essa nova configuração da geometria e utilizando o mesmo critério de discretização espacial da etapa anterior, resultou-se em uma malha com total de 426885 elementos, conforme pode ser visto na Fig. 4.8:

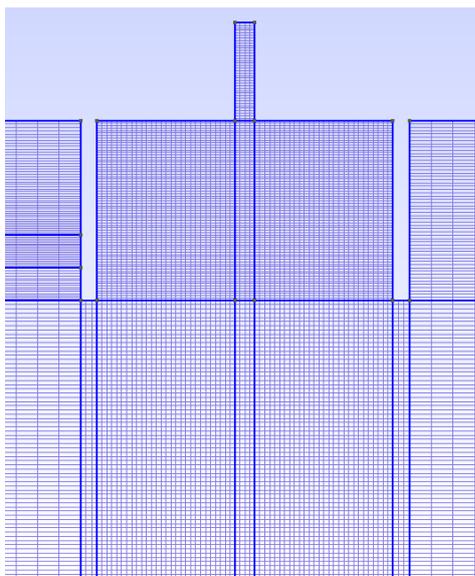


Figura 4.8 – Discretização espacial na região do dispositivo.

Ainda na Figura 4.8, observa-se, também a não utilização de um maior refinamento de malha na região da interface ar-água após a localização do dispositivo. Essa diferença na quantidade total de elementos de malha se dá devida a maior quantidade disposta no interior do equipamento (região onde são feitas as medições das propriedades em estudo).

4.3. Inclusão do efeito de turbina no equipamento *OWC*

Nesta etapa do trabalho foi adicionado o efeito de turbina na chaminé do dispositivo conversor, com intuito de simular uma condição mais real da passagem do ar pela chaminé do equipamento e, desta maneira, considerar a perda de carga no modelo computacional.

Para verificação do modelo feito no presente item foi reproduzido um caso estudado no trabalho de GOMES et al. (2015), onde a geometria e a malha utilizadas no artigo foram importadas do software utilizado pelos autores para possibilitar a funcionalidade das mesmas no código do programa OpenFOAM. Nesse estudo, os autores analisam as diferenças de potência atingida pelo

equipamento *OWC* com duas configurações distintas de efeito de turbina inserido ao modelo. No presente trabalho apenas o obstáculo em formato elíptico é verificado, por se tratar do formato mais semelhante com as turbinas reais. A Fig. 4.9 mostra duas vistas da malha de GOMES et al. (2015) já importada para operar no programa do presente trabalho:

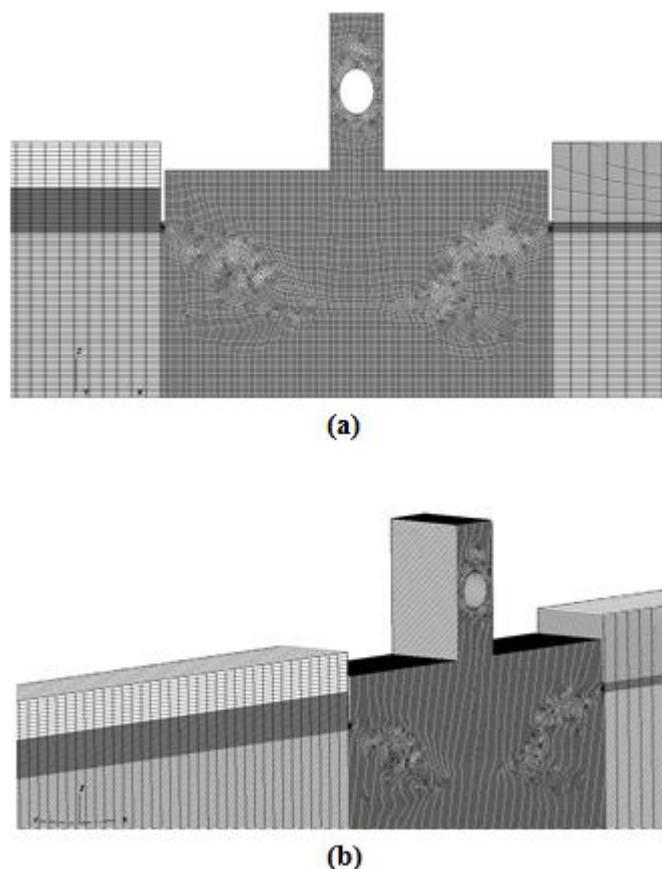


Figura 4.9 - Malha utilizada em GOMES et. al., (2015) importada para código no OpenFOAM: (a) vista frontal e (b) vista em perspectiva.

Na figura 4.9 observa-se que, na vista (b), a geometria possui três dimensões. Esse fato se dá devido ao software só possibilitar simulações de domínios tridimensionais, onde o próprio algoritmo de conversão do programa obtém a profundidade da geometria mantendo as condições de contorno que antes eram nas linhas do domínio bidimensional, agora em faces do domínio convertido em tridimensional. É importante frisar que essa tridimensionalidade se dá devido a uma restrição do programa OpenFOAM, ou seja, o problema é solucionado em duas dimensões (eixos x e z), sendo a terceira dimensão (eixo y) existente apenas para possibilitar os cálculos através do programa utilizado. O movimento das ondas nesse domínio se dá apenas nas direções horizontal e vertical, não ocorrendo diferença no movimento ao longo da terceira dimensão. As dimensões do dispositivo *OWC* dessa etapa são vistas na Fig. 4.10:

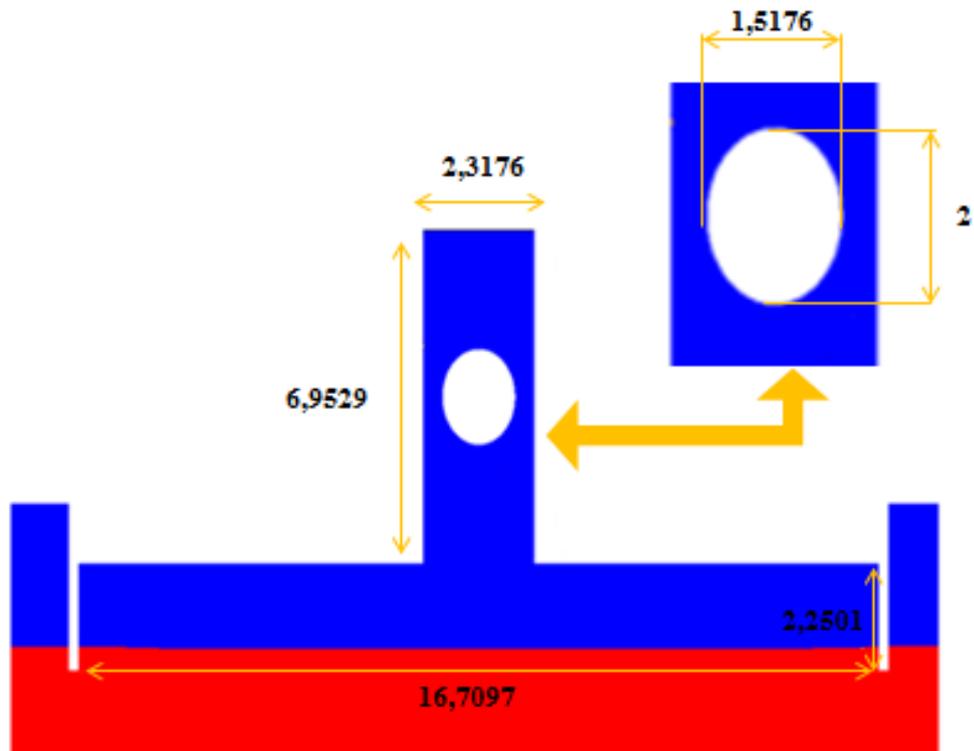


Figura 4.10 - Dimensões do dispositivo *OWC* reproduzido de GOMES et. al., (2015). Medidas em metros.

O comprimento total do canal onde está inserido o dispositivo é de 188 m, sua altura é de 13 m e a profundidade do domínio, referente à terceira dimensão obtida na importação do arquivo original é de 1,5 m. É válido ressaltar, que esse valor é definido pelo próprio programa OpenFOAM, onde o mesmo não interfere na análise bidimensional do estudo.

Para a realização da verificação entre os modelos, a Tab. 4.4 aponta as características da onda simulada conforme o estudo de GOMES et al. (2015).

Tabela 4.4 - Propriedades da onda reproduzida de GOMES et. al., (2015).

Propriedade	Valor	Unidade
Comprimento	37,5	m
Amplitude	0,5	m
Profundidade	10	m
Período	5	s

A verificação do caso foi realizada no regime laminar. Curvas de pressão abaixo do obstáculo elíptico foram plotadas para uma distância de 1 metro do vértice inferior do eixo maior da elipse. A vazão mássica foi medida na saída da chaminé do dispositivo, assim como a pressão média RMS (*Root Mean Square*). Segundo GOMES (2014) e MARJANI et al. (2006) essa média é indicada para problemas transientes e é dada pela Eq. 4.1:

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (4.1)$$

Para o cálculo da potência hidropneumática a Eq. 4.2 é utilizada.

$$P_{hid} = \left(P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (4.2)$$

onde P_{ar} é a pressão estática na chaminé do dispositivo, ρ_{ar} é a massa específica do ar, v_{ar} é a velocidade do ar e \dot{m} é a vazão mássica de ar.

As Figuras 4.11 e 4.12 abordam, respectivamente, o comparativo entre as pressões na região abaixo do obstáculo elíptico e a vazão mássica na saída do ar da chaminé do dispositivo *OWC*.

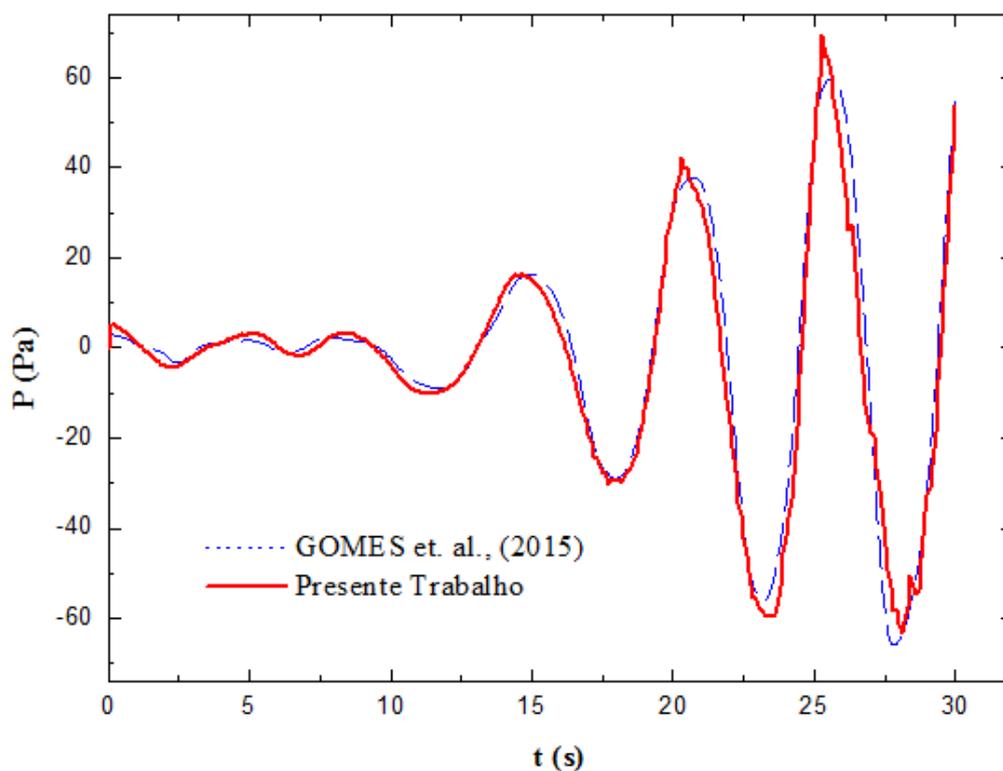


Figura 4.11- Comparativo de pressão estática abaixo do obstáculo elíptico.

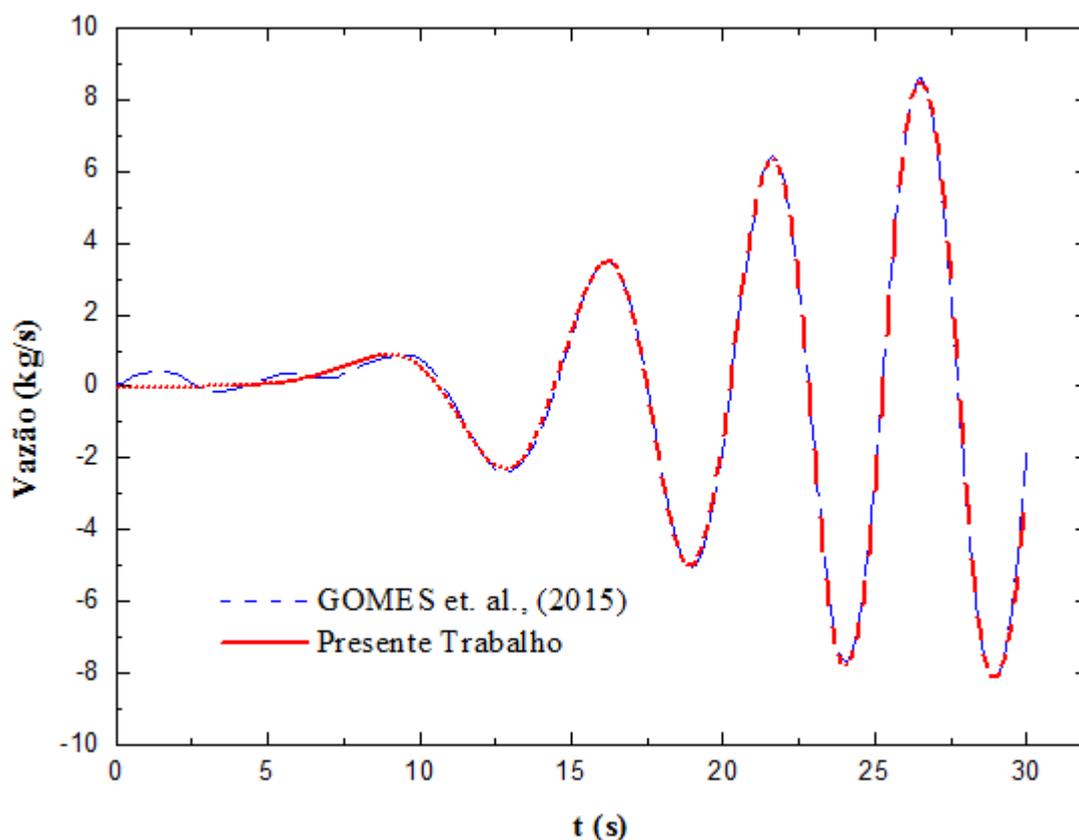


Figura 4.12 - Comparativo da vazão mássica na saída da chaminé.

Na sequência, a Tab. 4.5 apresenta os valores médios comparativos de vazão mássica, pressão e potência.

Tabela 4.5 - Comparativo dos valores médios das propriedades.

Propriedade	GOMES et. al., (2015)	Presente trabalho	Diferença (%)
Vazão mássica [kg/s]	15,3519	15,5352	1,1939
Pressão [Pa]	114,1982	117,4892	2,8818
Potência [W]	426,3089	439,2023	3,0244

Pode – se observar que ocorre uma diferença de 2,88% nos valores mensurados da pressão, de 1,19% na curva de vazão e de 3,02% na potência comparativa entre as simulações. Estas diferenças são devidas aos distintos algoritmos numéricos utilizados para simulação dos casos,

tendo em vista que GOMES et. al., (2015) utilizaram o programa comercial *ANSYS FLUENT* e no presente trabalho foi utilizado o OpenFOAM. É importante salientar que, com os resultados obtidos, o código utilizado no presente trabalho se mostrou capaz de solucionar o problema com tal complexidade inserida, sendo possível dar sequência no estudo com os modelos de turbulência, mostrados na sequência do capítulo.

Após a reprodução da simulação no regime laminar, conforme foi feito originalmente pelos autores do artigo mencionado, uma geometria com o dispositivo *OWC* contendo as dimensões vistas na Fig. 4.6 foi produzida e um obstáculo elíptico foi adaptado para as dimensões reduzidas do domínio procurando manter a proporcionalidade no posicionamento dentro da chaminé, tendo como referência o modelo utilizado em GOMES et. al., (2015). Essa nova geometria tem objetivo de manter o padrão inicial do estudo. A Fig. 4.13 ilustra o detalhe de uma das malhas geradas no equipamento e seu entorno:

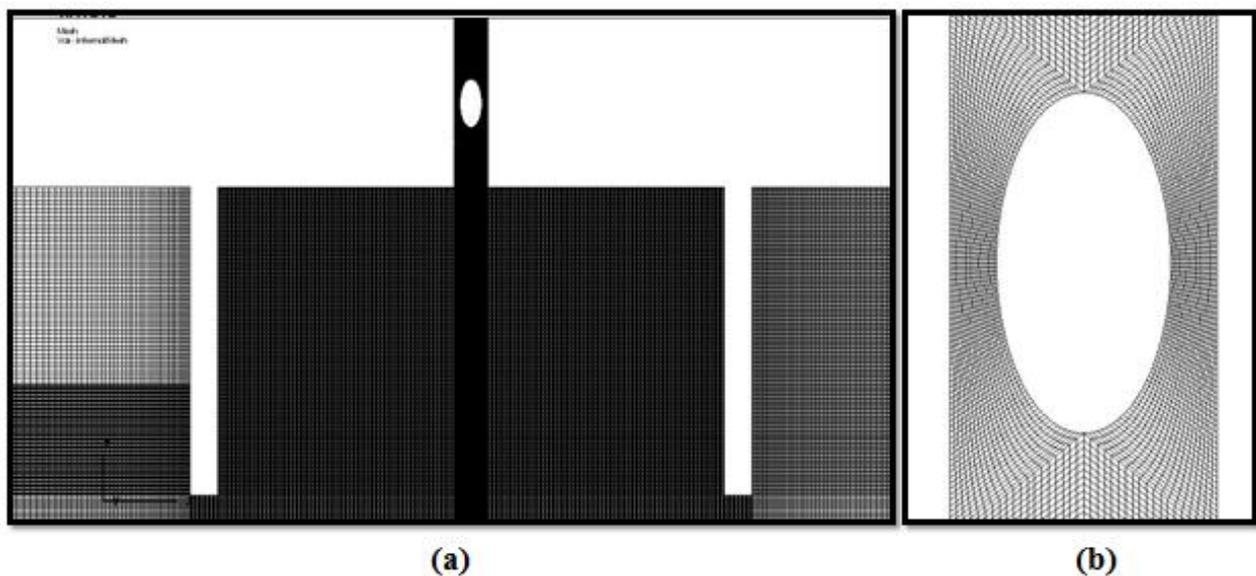


Figura 4.13 - Detalhe da nova malha do dispositivo *OWC*: (a) dispositivo e seu entorno; (b) detalhe da malha na região do obstáculo elíptico.

Na Figura 4.14 podem ser observadas as dimensões da elipse responsável pelo efeito de turbina no modelo.

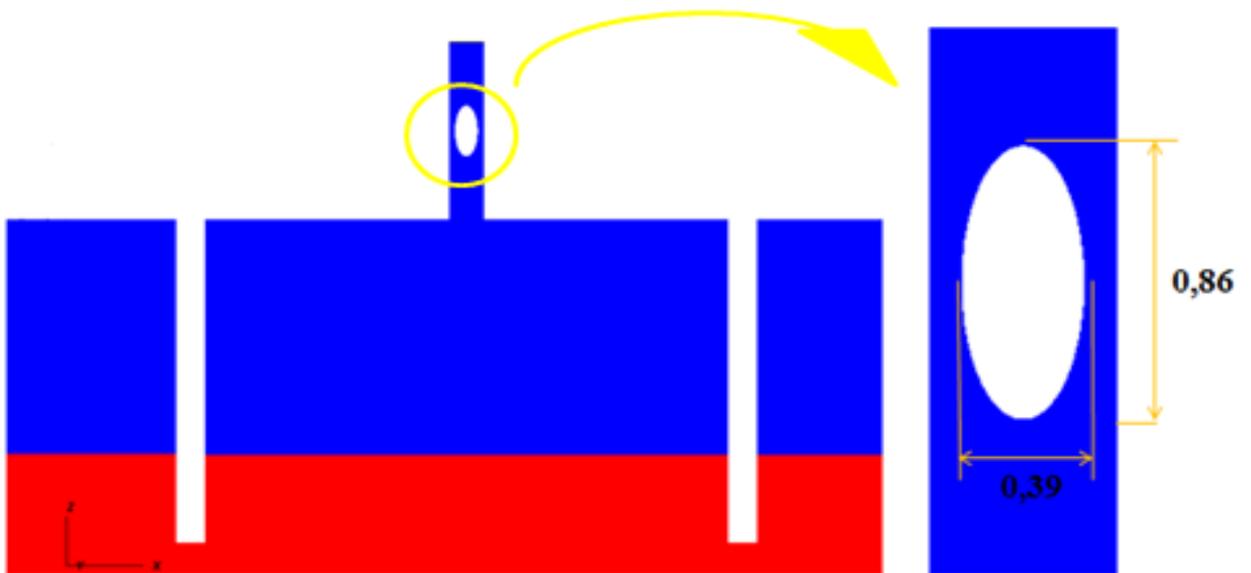


Figura 4.14 - Dimensões, em metros, do efeito de turbina adaptado.

5. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos ao longo do estudo. Em um primeiro momento serão exibidas as curvas de pressão, velocidade e vazão mássica na saída da chaminé do dispositivo *OWC* sem efeito de turbina, comparando os resultados transientes nos pontos de monitoramentos atingidos no regime laminar com as simulações feitas com os modelos de turbulência *RANS*: $k-\varepsilon$, $k-\omega$ *SST* e Spalart – Allmaras. É exibida, também, a comparação dos resultados qualitativos das topologias de velocidade e posição da coluna de água que oscila na câmara do dispositivo em cada um dos regimes de escoamento estudados.

Na sequência, com o modelo contendo o obstáculo elíptico adaptado as dimensões do dispositivo, os mesmos resultados do caso anterior são ilustrados. Nessa etapa, além dos modelos de turbulência *RANS* utilizados anteriormente, são expostos os resultados para a abordagem *LES* com modelo dinâmico de Smagorinsky.

É importante reforçar que o estudo não tem a intenção de fazer a análise da melhor geometria para obter os melhores resultados possíveis e sim destacar a real necessidade de utilizar os modelos de turbulência nesse tipo de problema.

Para realização de todas as simulações, os parâmetros utilizados no código do programa OpenFOAM são descritos na Tab. 5.1:

Tabela 5.1 - Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Nome
Solver	InterFOAM
Acoplamento Pressão - Velocidade	PIMPLE
Função de Interpolação	Upwind
gradSchemes	leastSquares
ddtSchemes	Euler
divSchemes	Gauss linearUpwind
Courant Number (Co)	0,5 a 1
Δt inicial	1×10^{-8}
$\Delta t_{\text{máx}}$	1×10^{-3} a 1

Para as condições de contorno nos modelos de turbulência foi utilizado o algoritmo *kqRWallFunction* que é responsável por adicionar as equações para o fechamento das equações de conservação.

5.1. Resultados para o tanque com o dispositivo *OWC*

Através de duas sondas posicionadas internamente a chaminé do dispositivo *OWC*, conforme visto na Fig. 5.1, onde uma está próxima à base do local (sonda “B”), com coordenadas ($x = 204.2$ m e $z = 4,9$ m) e a segunda se encontra na saída da chaminé (sonda “C”), com coordenadas ($x = 204,8$ m e $z = 7$ m), sem a presença do efeito de turbina.

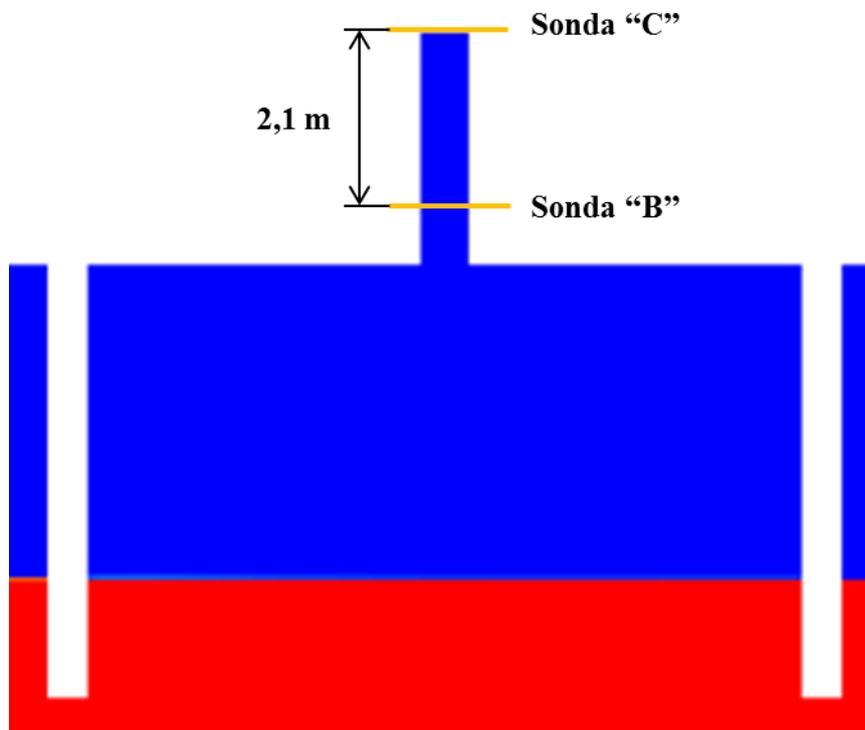


Figura 5.1 - Sondas de medição de pressão na chaminé do dispositivo *OWC*.

Com as sondas inseridas na chaminé do equipamento, os resultados para a diferença de pressão hidropneumática absoluta foram plotados na Fig. 5.2.

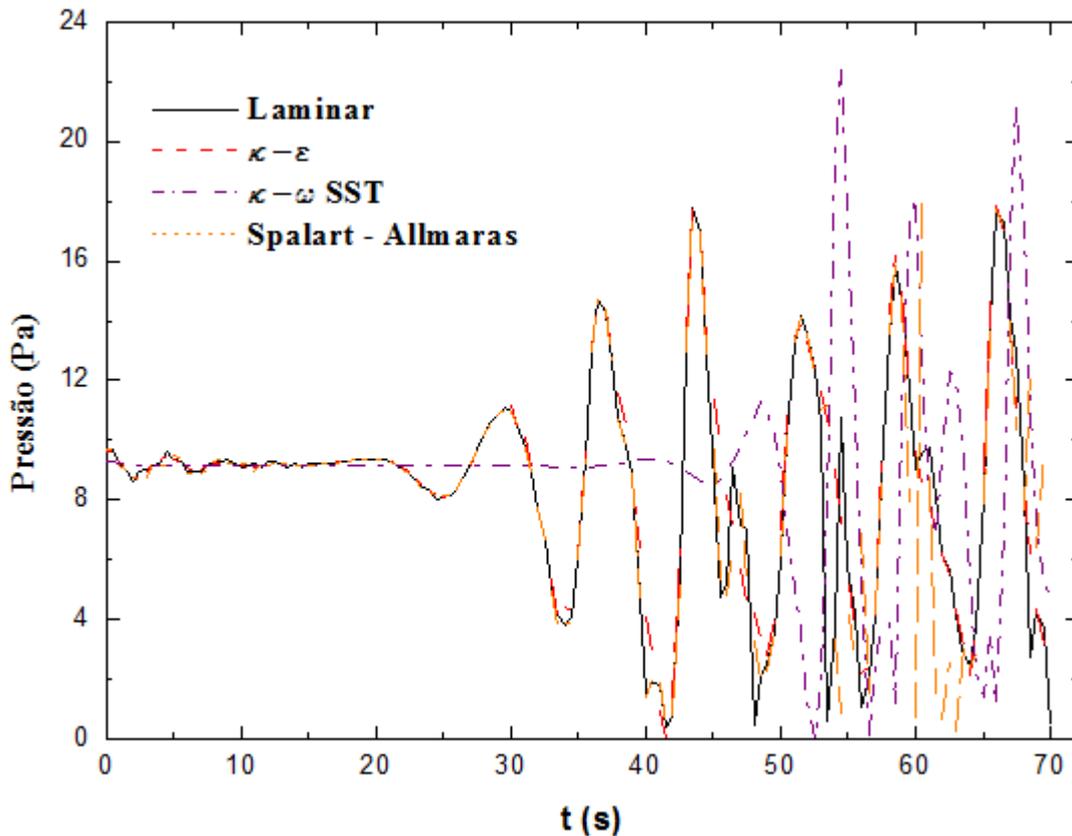


Figura 5.2 - Diferença de pressão na chaminé do dispositivo *OWC* sem efeito de turbina.

Pode-se observar na Fig. 5.2 uma grande disparidade dos resultados atingidos pelo modelo de turbulência $k-\omega$ SST, tanto na tendência da curva em relação ao modelo com escoamento laminar, assim como os picos de máximo e mínimo da pressão hidropneumática. Em contrapartida, os demais modelos de turbulência analisados mantiveram a mesma tendência da curva em relação ao modelo laminar, no período de estabilidade da onda dentro do dispositivo ($32 \text{ s} \leq t \leq 52 \text{ s}$). Pode-se observar, também, que o modelo Spalart-Allmaras apresentou disparidade de tendência e de valores de máximo e mínimo no período após a estabilidade da onda dentro do dispositivo *OWC*. Vale destacar, que após esse período estável da onda ocorrem efeitos de reflexão da mesma sobre a estrutura do equipamento.

A figura 5.3, apresentada na sequência, exhibe o comparativo das curvas de vazão mássica de ar na saída da chaminé.

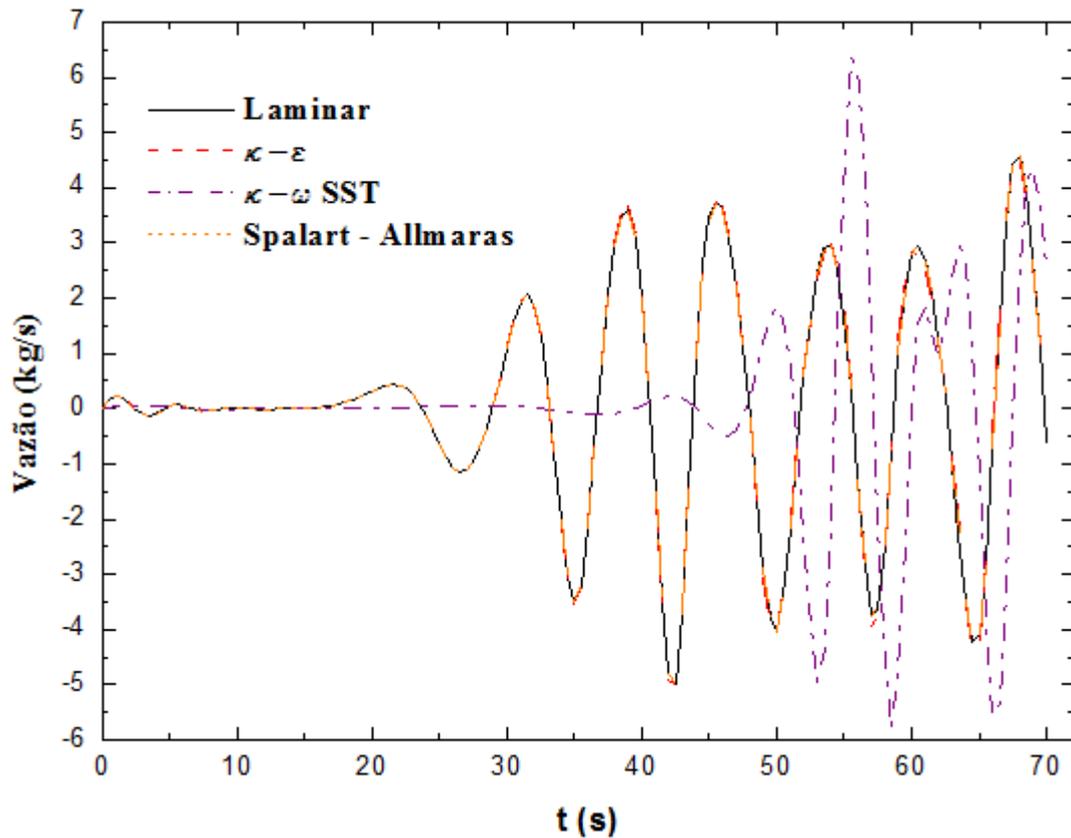


Figura 5.3 - Comparativo da vazão mássica de ar na saída da chaminé.

Ao comparar as curvas para vazão mássica de ar na saída da chaminé observa-se o mesmo panorama dos resultados da pressão hidropneumática, ou seja, a tendência da curva e os valores obtidos pelo modelo turbulento $k-\omega$ SST divergem em relação aos demais modelos de turbulência utilizados e ao regime laminar. O mesmo desvio é observado na Fig. 5.4 para a elevação média da água dentro da câmara do dispositivo OWC, que foi medida através da sonda “A”, já referida na Fig. 4.6 do capítulo anterior.

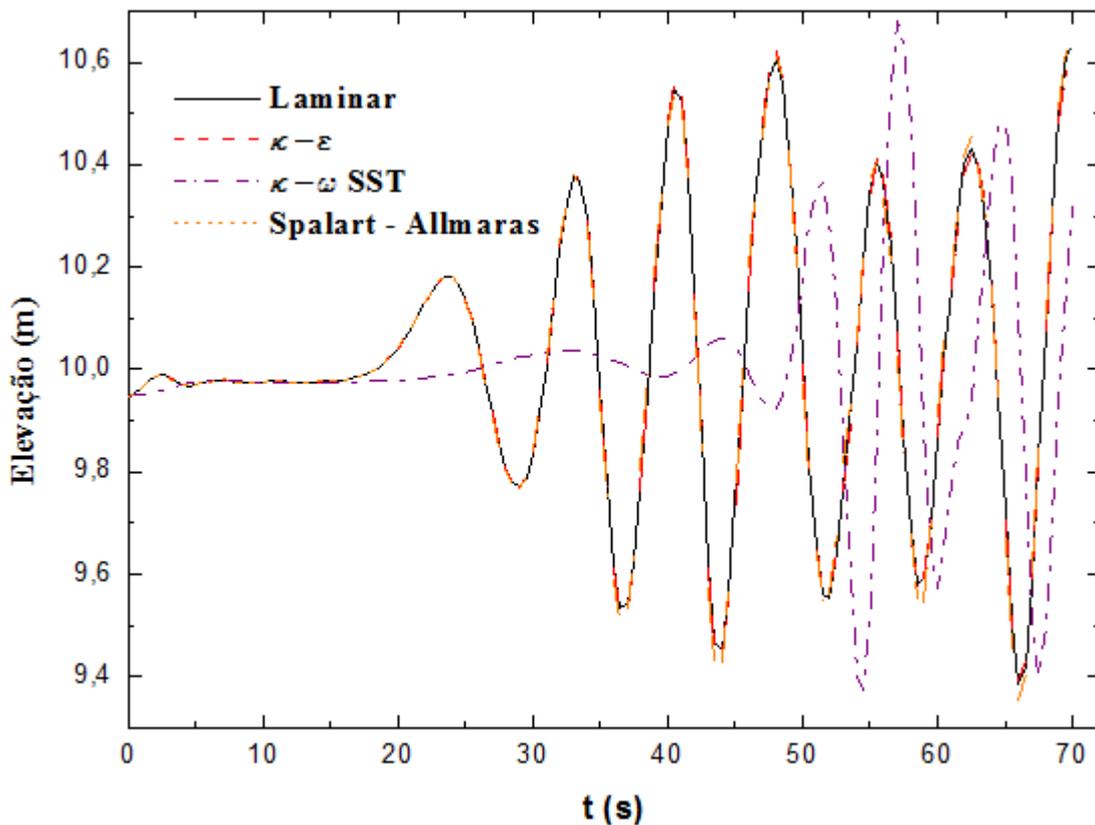


Figura 5.4 - Comparativo das curvas de elevação do nível da água no interior da câmara do equipamento.

Analisando os resultados atingidos para os diferentes regimes de escoamento abordados fica notória a ocorrência de uma disparidade de valores do modelo de turbulência $k-\omega$ SST em relação aos demais modelos e ao regime laminar. Este modelo obteve maior dificuldade na convergência da simulação, sendo o único a utilizar variações dos parâmetros do *Courant Number* e do $\Delta t_{\text{máx}}$. Em contrapartida, os demais modelos de turbulência convergiram satisfatoriamente assim como obtiveram resultados semelhantes em relação ao regime laminar. Pode-se observar, também, que as soluções são praticamente iguais tanto para a região do domínio que contém água (câmara) e a região que contém ar (chaminé).

Desta forma, tendo sido alcançados praticamente os mesmos resultados (com exceção do modelo $k-\omega$ SST, como já referido), o tempo computacional maior para os modelos de turbulência (cerca de 4 horas) em relação ao modelo laminar (2 horas e meia) não foi determinante para uma diferenciação plausível entre os diferentes modelos nessa primeira etapa.

Com isso, na sequência são apresentados os resultados qualitativos obtidos através das topologias das maiores e menores elevações médias da água dentro da câmara *OWC*, assim como da

magnitude de velocidade no mesmo local para os mesmos instantes em cada abordagem simulada. Na Figura 5.5 são ilustrados os momentos de maior elevação da superfície livre da água dentro da câmara.

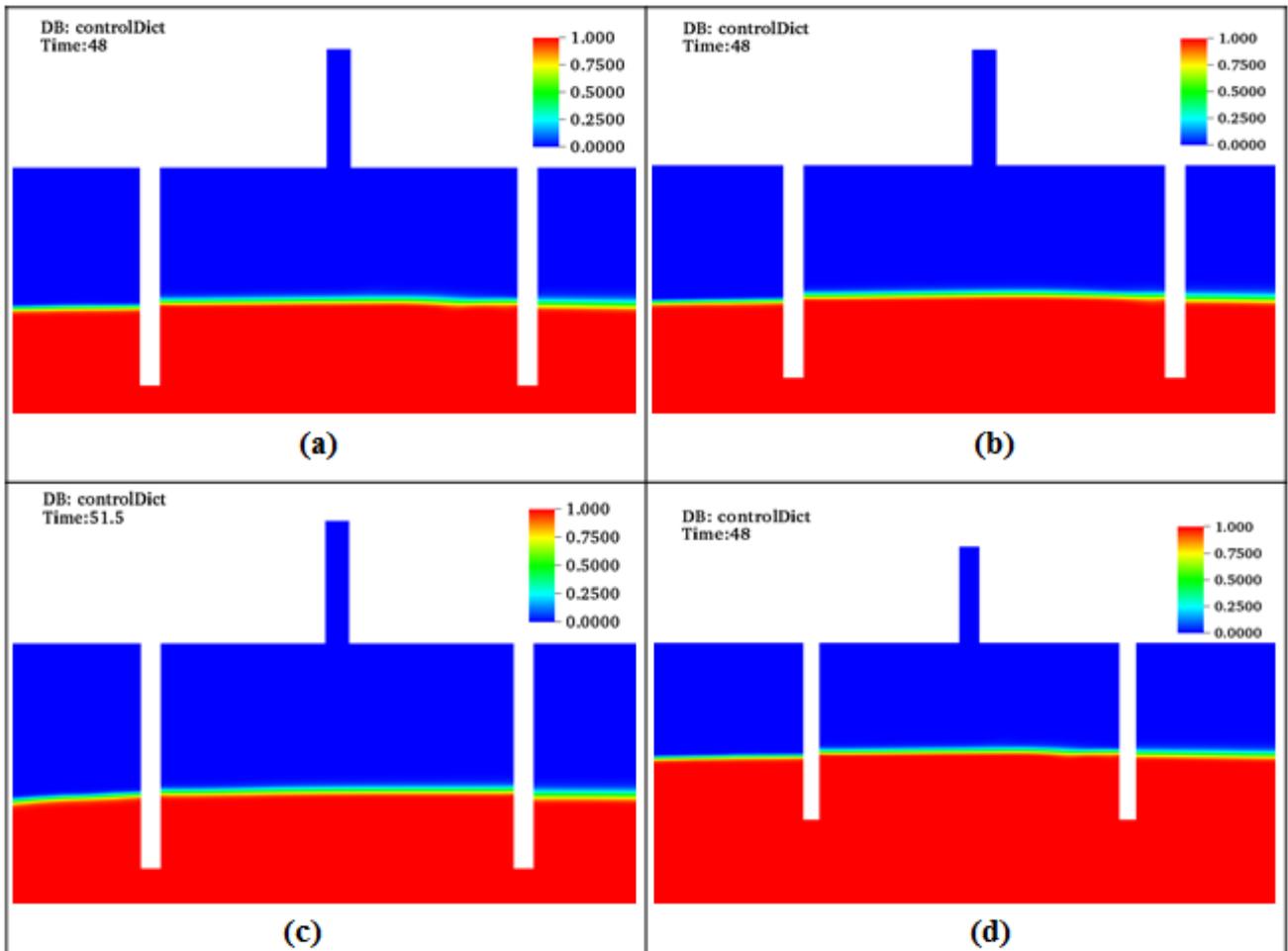


Figura 5.5 - Instante da maior elevação da água na câmara do dispositivo *OWC*: (a) laminar, (b) $k - \epsilon$, (c) $k - \omega SST$ e (d) Spalart - Allmaras.

Observa-se na Fig. 5.5 que não ocorrem diferenças significativas ao comparar as topologias, exceto no tempo em que o modelo $k - \omega SST$ obtém o instante em questão (51,5 segundos), mostrando que há um atraso de 3,5 segundos para a obtenção do nível mais alto médio da elevação da água em relação aos demais modelos.

Na sequência, através da Fig. 5.6 é analisado o instante da menor elevação média da superfície livre da água de cada modelo estudado.

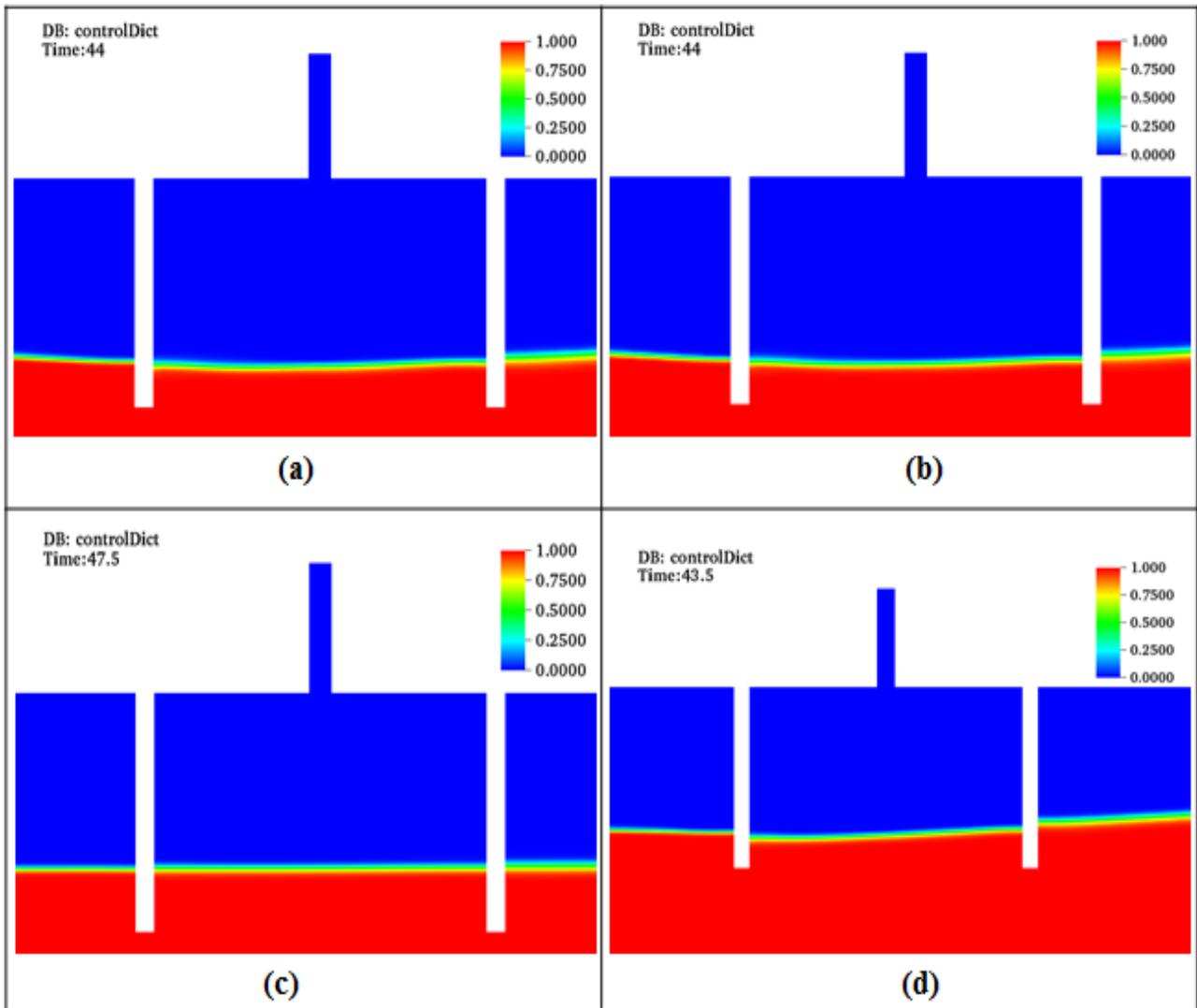


Figura 5.6 - Instante da menor elevação da água na câmara do dispositivo *OWC*: (a) laminar, (b) $k-\varepsilon$, (c) $k-\omega SST$ e (d) Spalart – Allmaras.

Da mesma forma como observado na Fig. 5.5, nos instantes mostrados em cada modelo estudado para a menor elevação da elevação da superfície livre da água, ocorre um atraso de 3,5 segundos para o modelo $k-\omega SST$ obter o instante e um adiantamento de 0,5 segundos para o resultado do modelo Spalart – Allmaras.

Na Figura 5.7 são avaliados os campos de velocidade para o instante de maior elevação média do nível da água no interior do dispositivo.

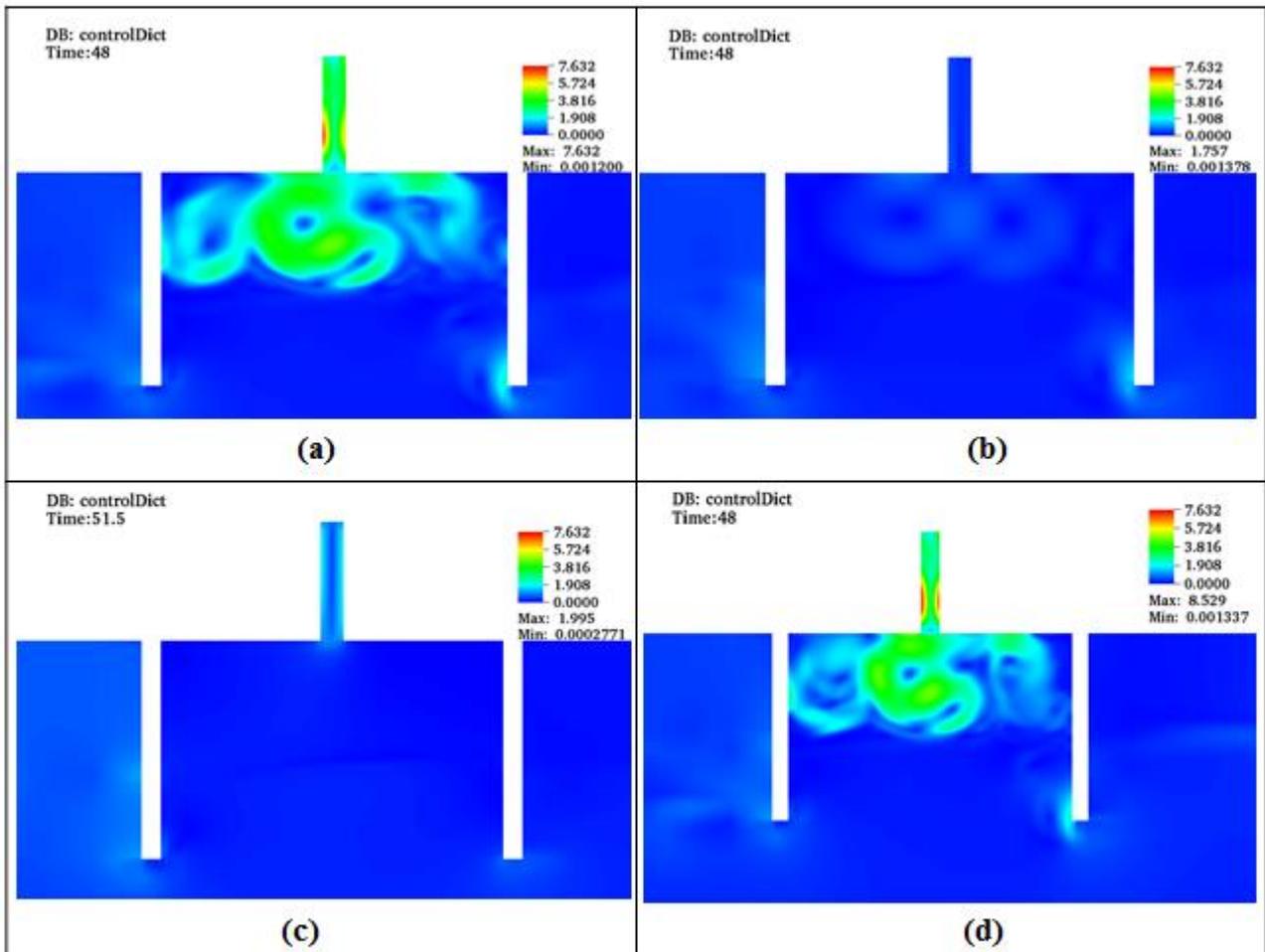


Figura 5.7 - Campo de velocidades no instante da maior elevação da água na câmara do dispositivo *OWC*: (a) laminar, (b) $k-\epsilon$, (c) $k-\omega SST$ e (d) Spalart – Allmaras.

Pode-se observar pelos campos de velocidade obtidos na maior elevação do nível da água uma grande diferença das topologias dos modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega SST$ em relação ao regime laminar. Em contrapartida, o modelo Spalart-Allmaras apresentou a maior semelhança da sua topologia em relação ao regime laminar, podendo-se notar um desenvolvimento levemente maior dos vórtices mais próximos à parede lateral interna da direita e superior na posição à esquerda da chaminé do dispositivo.

A Figura 5.8 aborda, da mesma forma, o campo de velocidades, porém, para o instante de menor elevação da superfície da água no interior do dispositivo.

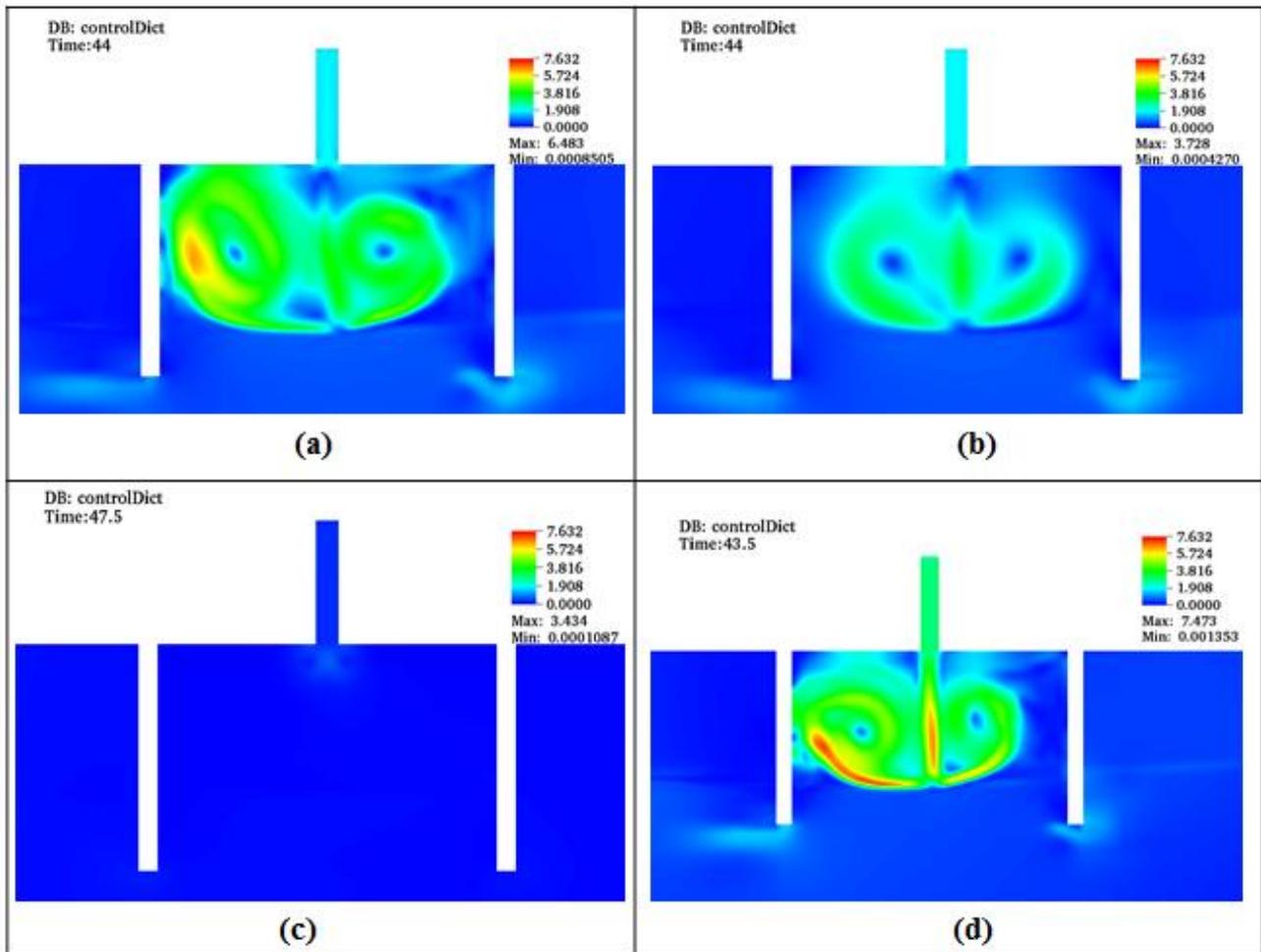


Figura 5.8 - Campo de velocidades no instante da menor elevação da água na câmara do dispositivo *OWC*: (a) laminar, (b) $k-\epsilon$, (c) $k-\omega$ SST e (d) Spalart – Allmaras.

Da mesma forma como visto na Fig. 5.7, para o instante de menor elevação da água na câmara do dispositivo *OWC*, da Fig. 5.8, a topologia do modelo de Spalart-Allmaras é o mais semelhante ao modelo no regime laminar, com algumas poucas diferenças na formação de vórtices na parede lateral esquerda da parte interna do dispositivo e amplitude de velocidade no maior vórtice na região central mais deslocada para região esquerda do mesmo local.

Entre as topologias desta etapa, pode-se observar uma diferença maior dos resultados do modelo $k-\omega$ SST, assim como nas curvas das propriedades avaliadas. Os períodos em que ocorrem maiores e menores elevações da superfície livre da água, no modelo em questão, também são discrepantes em relação aos demais. O comparativo dos valores médios *RMS* das propriedades avaliadas são observadas na Tab. 5.2.

Tabela 5.2 - Média RMS das propriedades entre os diferentes regimes de escoamento no período de $T = 32$ s a $T = 52$ s.

Propriedade	Laminar	$k-\varepsilon$	$k-\omega$ SST	Spalart-Allmaras
Vazão mássica [kg/s]	3,8601	3,9138	0,9559	3,8566
Pressão [Pa]	49,2553	49,1290	44,1631	49,2273
Potência [W]	110,8073	112,6281	24,5153	110,4797
Diferenças em relação ao regime laminar (%)				
Propriedade	Laminar	$k-\varepsilon$	$k-\omega$ SST	Spalart-Allmaras
Vazão mássica [kg/s]	-	1,39	75	0,09
Pressão [Pa]	-	0,25	10,34	0,05
Potência [W]	-	1,64	77,87	0,29

Ao avaliar os resultados, observa-se uma grande diferença entre o modelo $k-\omega$ SST em relação aos alcançados pelo regime laminar e uma grande similaridade dos valores atingidos pelo modelo Spalart-Allmaras, assim como apontam os resultados das topologias do campo de velocidades e da elevação média maior e menor da superfície livre da água.

5.2. Resultados para o dispositivo OWC com efeito de turbina

Nessa etapa, além dos modelos de turbulência já avaliados no item anterior, é incluída, também, a abordagem LES com o modelo dinâmico de Smagorinsky. O domínio utilizado é o mesmo, porém com a adição de um obstáculo de formato elíptico ao centro da chaminé do equipamento, conforme visto na Fig. 4.14 do capítulo anterior.

Para esse estudo, além da malha construída, segundo os critérios abordados por GOMES et. al., (2015), foi realizada uma nova discretização espacial do modelo numérico. Um maior refinamento da malha foi aplicado, respeitando o critério abordado no trabalho de Dos SANTOS, et. al., (2011), onde ao simular um escoamento interno em um canal utilizando o modelo de turbulência LES Smagorinsky, calcula-se o coeficiente de discretização K_c com a Eq. 5.1.

$$K_c = \frac{\pi}{\Delta x_{max}} \quad (5.1)$$

onde, Δx_{max} é o valor máximo aceitável de volume do maior elemento de malha discretizado no domínio, calculado pela Eq. 5.2.

$$\Delta x_{max} = \sqrt[3]{\Delta x_i} \quad (5.2)$$

onde, Δx_i é o valor do maior volume presente em um elemento.

Para a discretização respeitar o critério apresentado é necessário que $K_c \geq 537 \text{ m}^{-1}$. Para o presente estudo, a malha que atendeu ao critério especificado resultou em uma quantidade de 1.477.778 de elementos, enquanto a malha requerida para os casos anteriores possui 248.519 elementos.

Na sequência são apresentadas curvas de vazão mássica na saída da chaminé e elevação média da superfície livre da água no interior da câmara do dispositivo *OWC* para a malha com maior refinamento. As referentes topologias são apresentadas também. Em seguida, os valores médios *RMS* de pressão, vazão mássica e potência são avaliados para as duas malhas utilizadas nessa etapa.

A figura 5.9 mostra as curvas comparativas da pressão na saída da chaminé do equipamento para as diferentes abordagens estudadas.

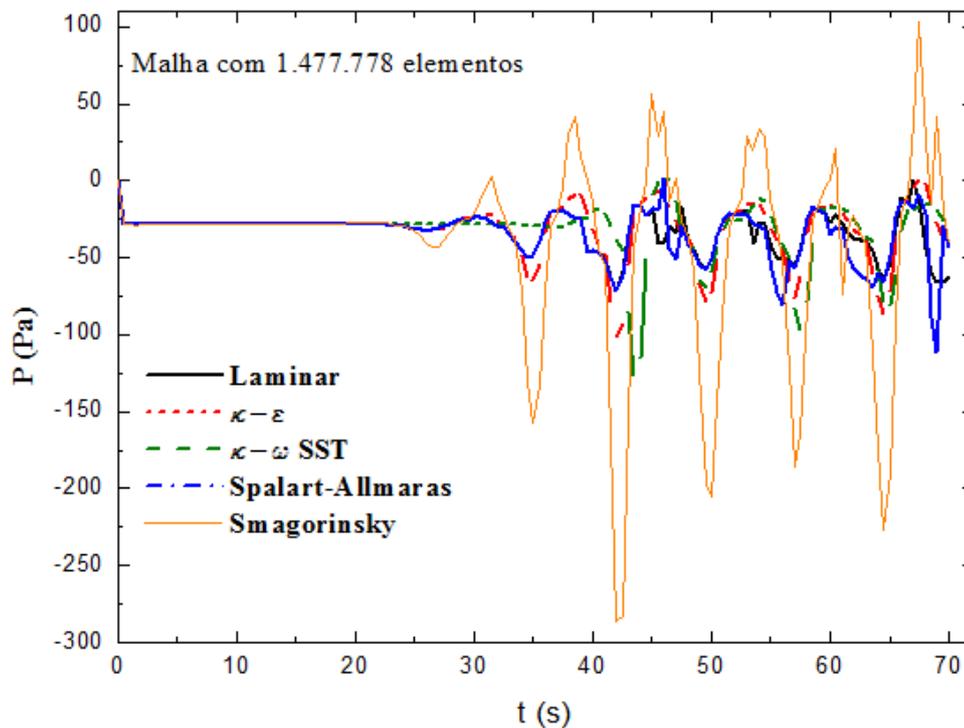


Figura 5.9 - Comparativo de pressão na saída da chaminé do dispositivo *OWC*.

Na Figura 5.10 são plotadas as curvas comparativas da vazão mássica do ar na saída da chaminé do dispositivo *OWC*.

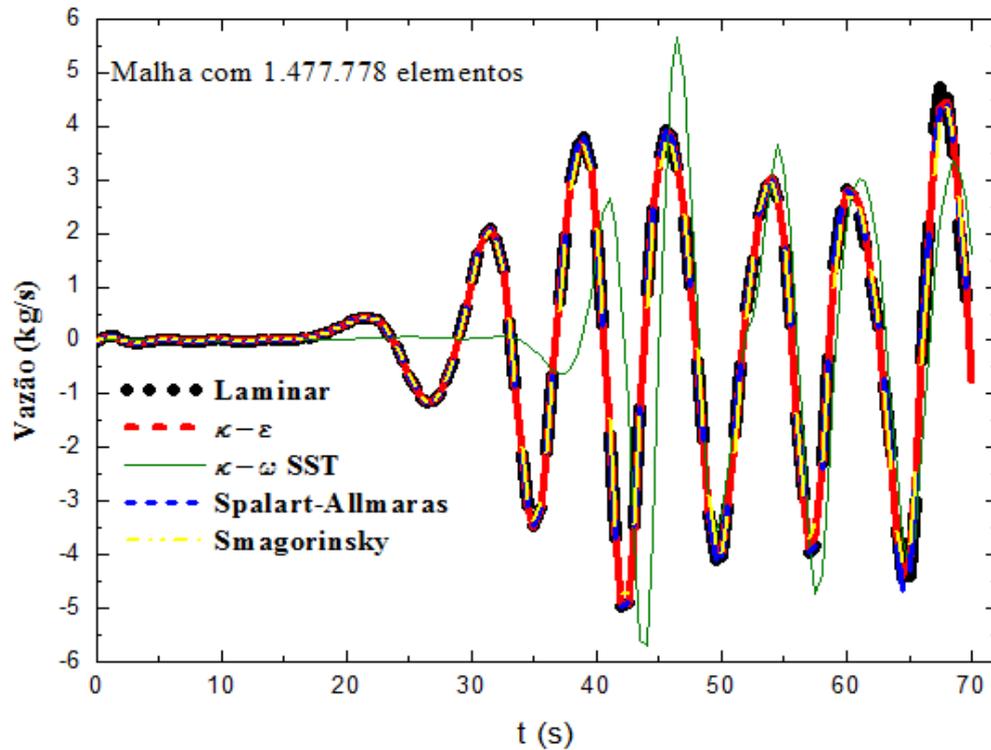


Figura 5.10 - Comparativo da vazão mássica com efeito de turbina no domínio.

A figura 5.11 ilustra as curvas para a elevação da superfície livre da água dentro da câmara *OWC*:

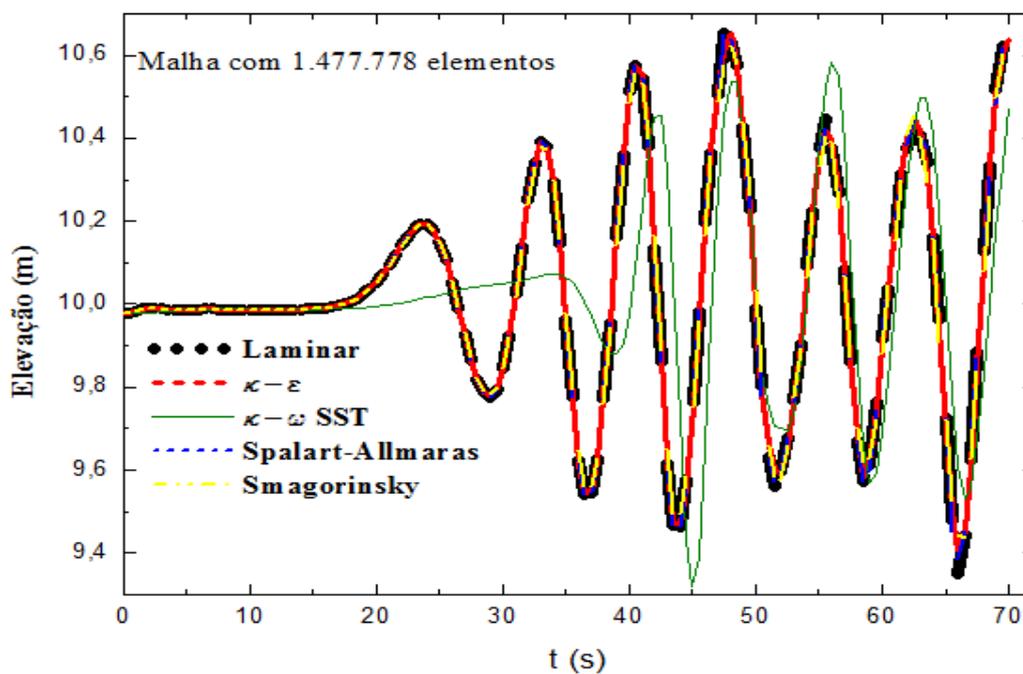


Figura 5.11 - Elevação média da superfície da água com efeito de turbina no domínio.

Ao observar os gráficos apresentados pelas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11, relativos ao equipamento *OWC* contendo o efeito de turbina, ao exemplo da etapa anterior, o modelo de turbulência *k- ω SST* apresentou disparidades significativas nas tendências das curvas de todas as propriedades observadas. O modelo dinâmico Smagorinsky, por sua vez, apresentou coerência nos resultados para vazão e elevação de água, mostrando uma diferença nos pontos de máxima e mínima da curva de pressão. Levando-se em consideração que a abordagem *LES* possui um código mais robusto em relação aos demais modelos, além de necessitar uma discretização espacial bruscamente refinada, o comportamento da curva de pressão é um ponto diferencial do estudo e aponta uma análise importante para futuras avaliações.

As topologias das máximas elevações da superfície livre da água no interior da câmara para todas as abordagens são analisadas na Fig. 5.12.

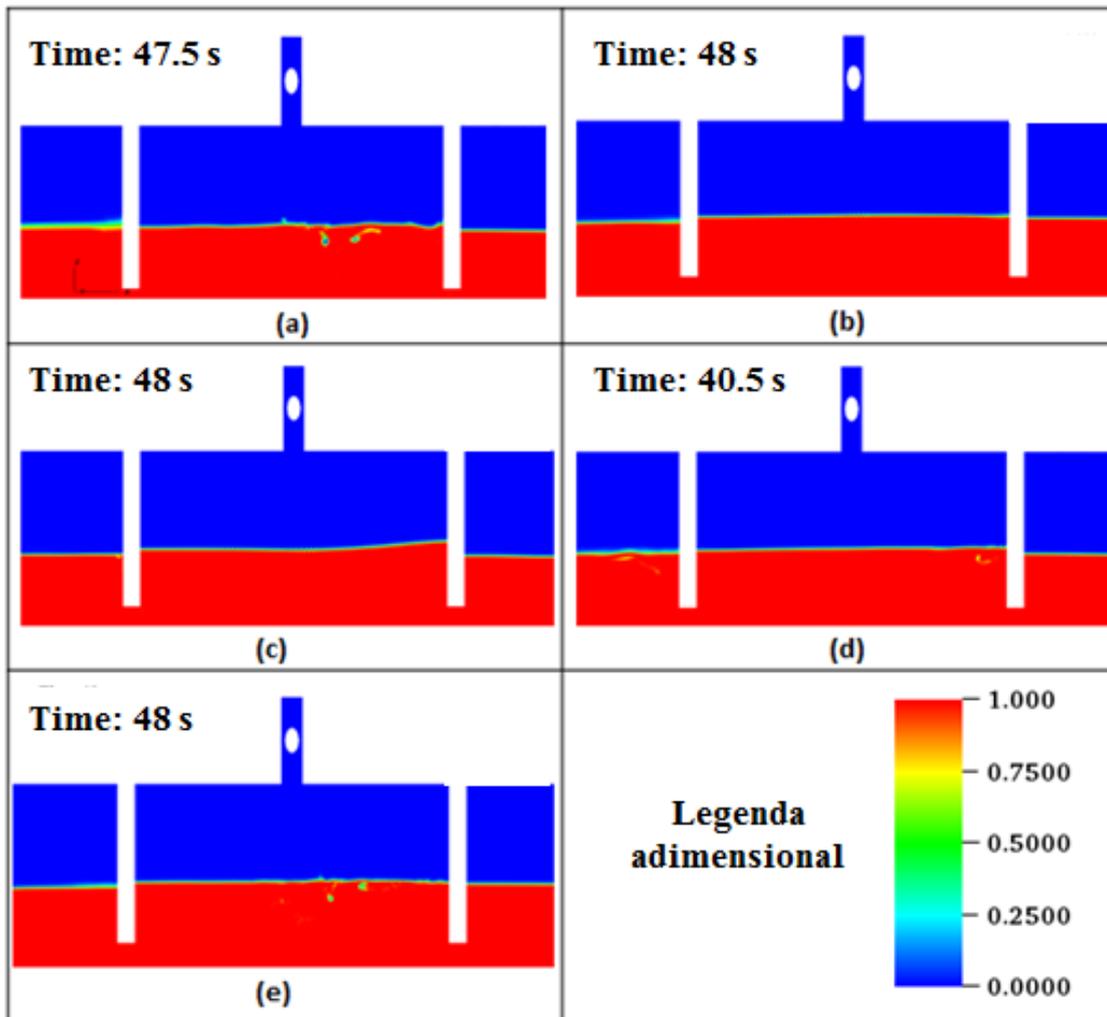


Figura 5.12 - Maior elevação da superfície livre com efeito de turbina: (a) laminar, (b) *k- ϵ* , (c) *k- ω SST*, (d) Spalart – Allmaras e (e) Smagorinsky.

Pode-se observar, para as topologias da maior elevação da superfície livre da água dentro da câmara do dispositivo *OWC*, a ocorrência de uma semelhança maior do modelo dinâmico Smagorinsky em relação ao modelo no regime laminar, com o aparecimento de recirculações de ar na região da água ao centro da câmara. Esse fato reforça a ideia de que a abordagem *LES* Smagorinsky se destaca entre os modelos de turbulência estudados, pois mantém coerência nos resultados em relação ao regime laminar. Na sequência, através da Fig. 5.13 é observada a mesma comparação para o momento de menor elevação média da elevação da superfície livre dentro da câmara do dispositivo.

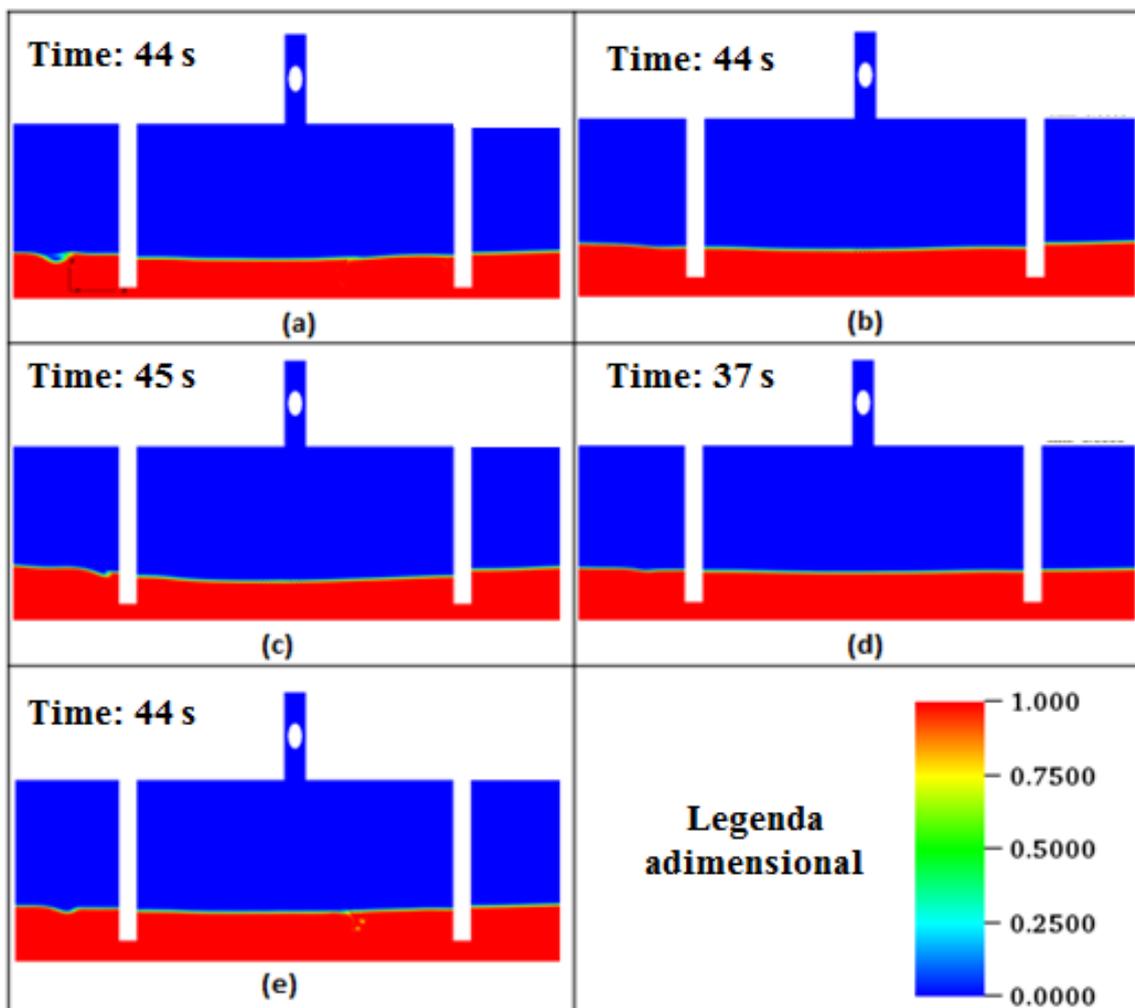


Figura 5.13 - Menor elevação da superfície livre com efeito de turbina: (a) laminar, (b) $k-\epsilon$, (c) $k-\omega$ SST, (d) Spalart – Allmaras e (e) Smagorinsky.

Com os resultados da Fig. 5.13, observa-se similaridade de todos os modelos turbulentos em relação ao modelo no regime laminar. Contudo, a maior semelhança da topologia, assim como no tempo em que o modelo atingiu a menor elevação da superfície livre da água se dirige à abordagem

LES com o modelo dinâmico de Smagorinsky, conforme ocorrido na análise anterior.

É possível observar, também, o surgimento de bolhas de ar oriundas da reflexão da onda nas paredes internas e externas do dispositivo *OWC* em todos os modelos simulados, com exceção do modelo $k-\varepsilon$. Nesse sentido pode-se afirmar que o maior refinamento da malha nesta situação apresentou a captura de fenômenos diferentes em relação aos estudos dos itens anteriores que possuem a malha com menor refinamento. A Fig. 5.14 faz a abordagem do campo de velocidades para a maior elevação da superfície livre da água dos modelos estudados.

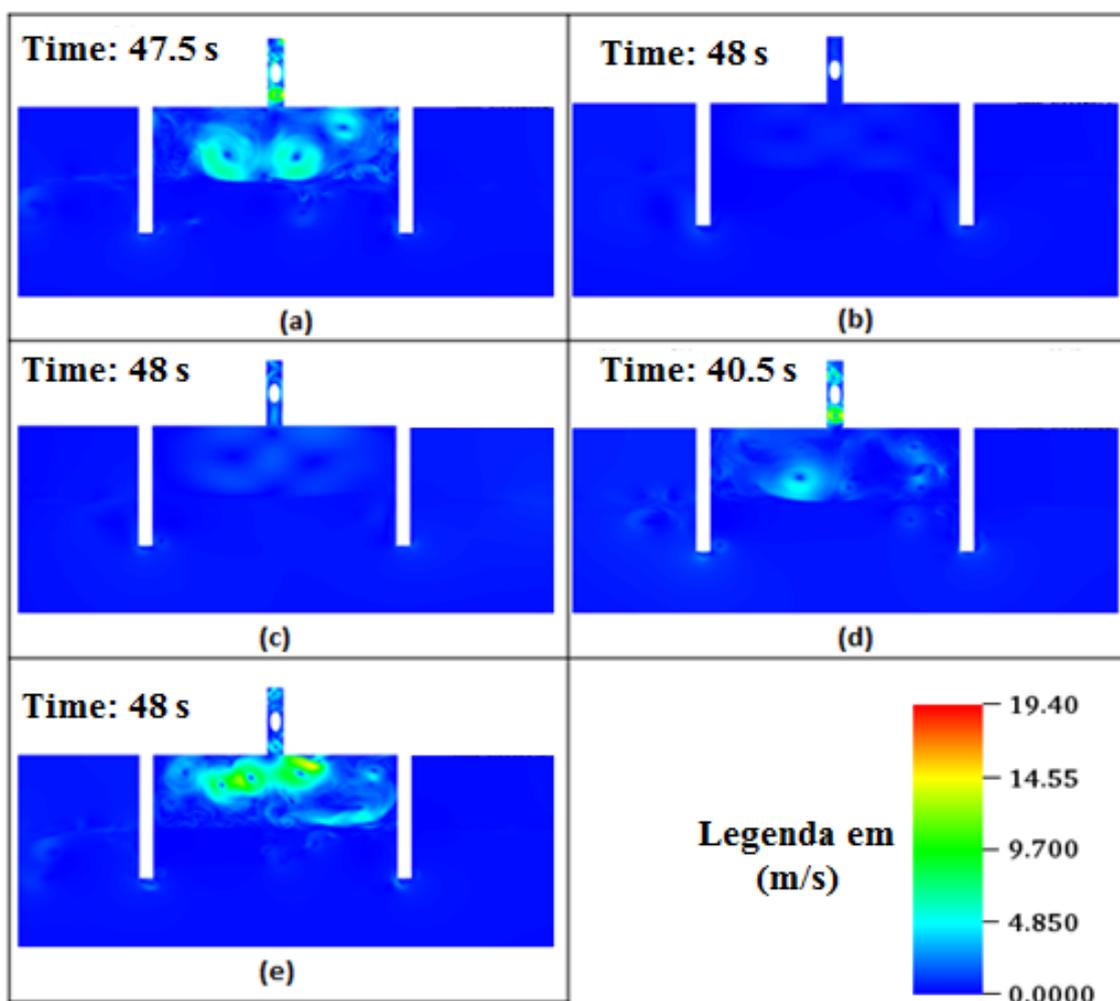


Figura 5.14 - Campo de velocidades na maior elevação da superfície livre com efeito de turbina: (a) laminar, (b) $k-\varepsilon$, (c) $k-\omega$ SST, (d) Spalart – Allmaras e (e) Smagorinsky.

Na Figura 5.14 podem-se observar muitas diferenças nas topologias de cada modelo, onde o modelo Smagorinsky apresentou uma quantidade maior de vórtices formados dentro da câmara e uma maior regularidade no movimento do ar dentro da chaminé do equipamento. Os modelos $k-\varepsilon$ e

$k-\omega$ SST, por sua vez, obtiveram menores amplitudes da magnitude de velocidades, apresentando, assim, pouca ou quase nenhuma formação de vórtices nas simulações.

Na Figura 5.15 é ilustrado o campo de velocidades para o momento da menor elevação da superfície livre da água dentro da câmara do dispositivo *OWC*.

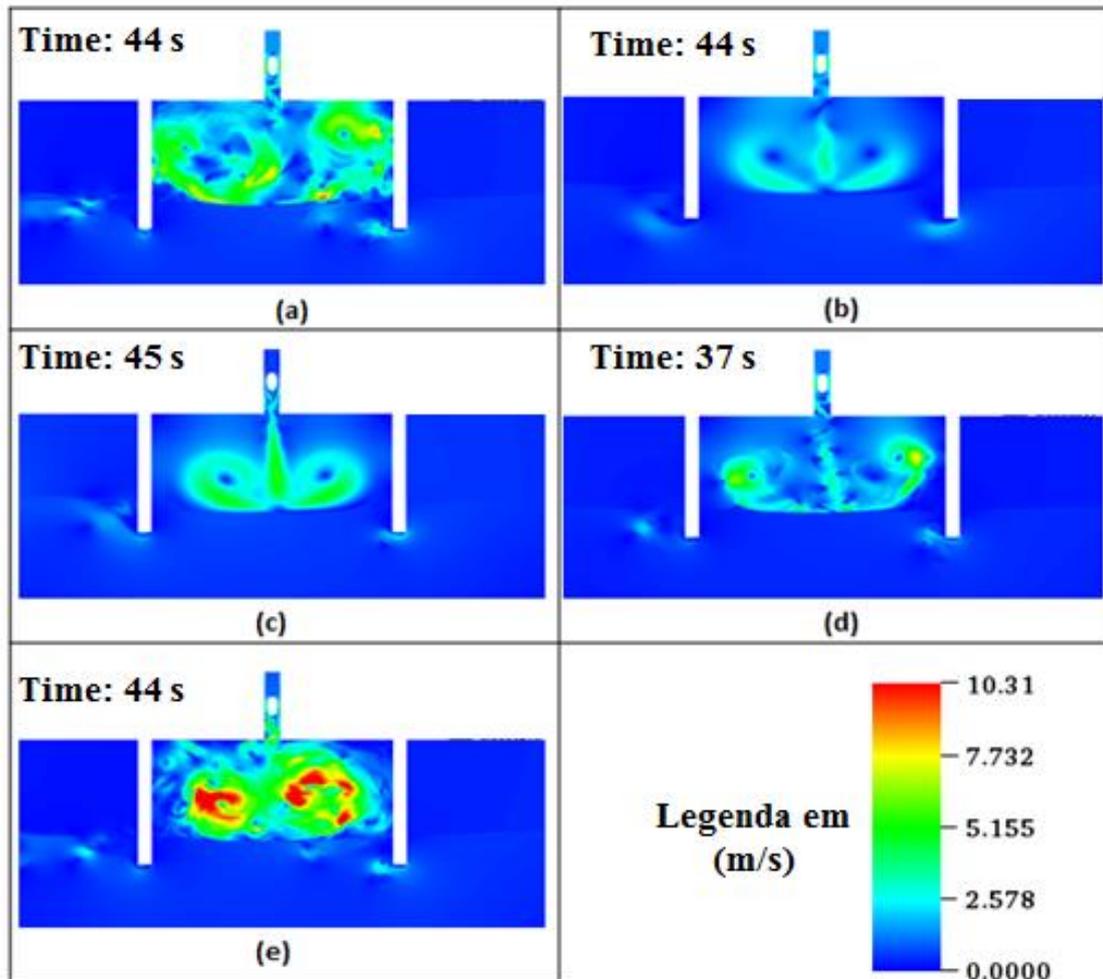


Figura 5.15 - Campo de velocidades na menor elevação da superfície livre com efeito de turbina: (a) laminar, (b) $k-\epsilon$, (c) $k-\omega$ SST, (d) Spalart – Allmaras e (e) Smagorinsky.

Da mesma forma como observado no período da maior elevação da superfície livre da água, os modelos obtiveram distintos campos para velocidade no momento de menor elevação, onde, mais uma vez se destaca o modelo dinâmico de Smagorinsky com a formação de maiores quantidades de vórtices na câmara, mais próximo do que ocorre no regime laminar, assim como maior similaridade da grandeza na magnitude máxima da velocidade no período avaliado.

Na sequência, a Fig. 5.16 ilustra as linhas de corrente para o instante da maior elevação média da superfície livre da água dentro da câmara, onde as escalas de todos os modelos foram

ajustadas conforme as máximas amplitudes de velocidade obtidas possam tornar visíveis as respectivas topologias.

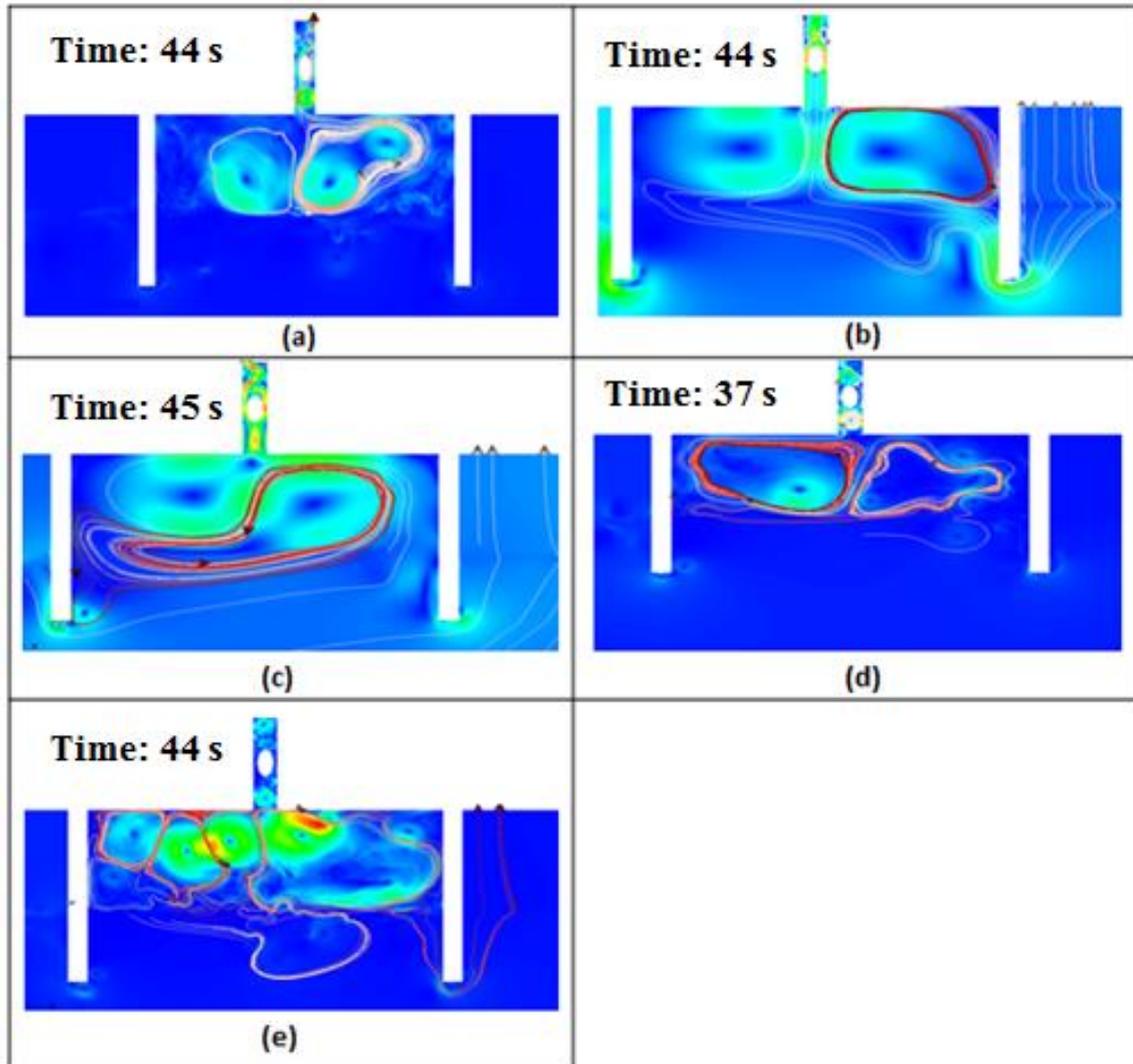


Figura 5.16 - Linhas de corrente no momento de maior elevação média da superfície livre da água: (a) laminar, (b) $k-\varepsilon$, (c) $k-\omega$ SST, (d) Spalart – Allmaras e (e) Smagorinsky.

A Figura 5.17 aborda as linhas de corrente para o momento da maior velocidade de decompressão da câmara do dispositivo *OWC* obtida por cada modelo.

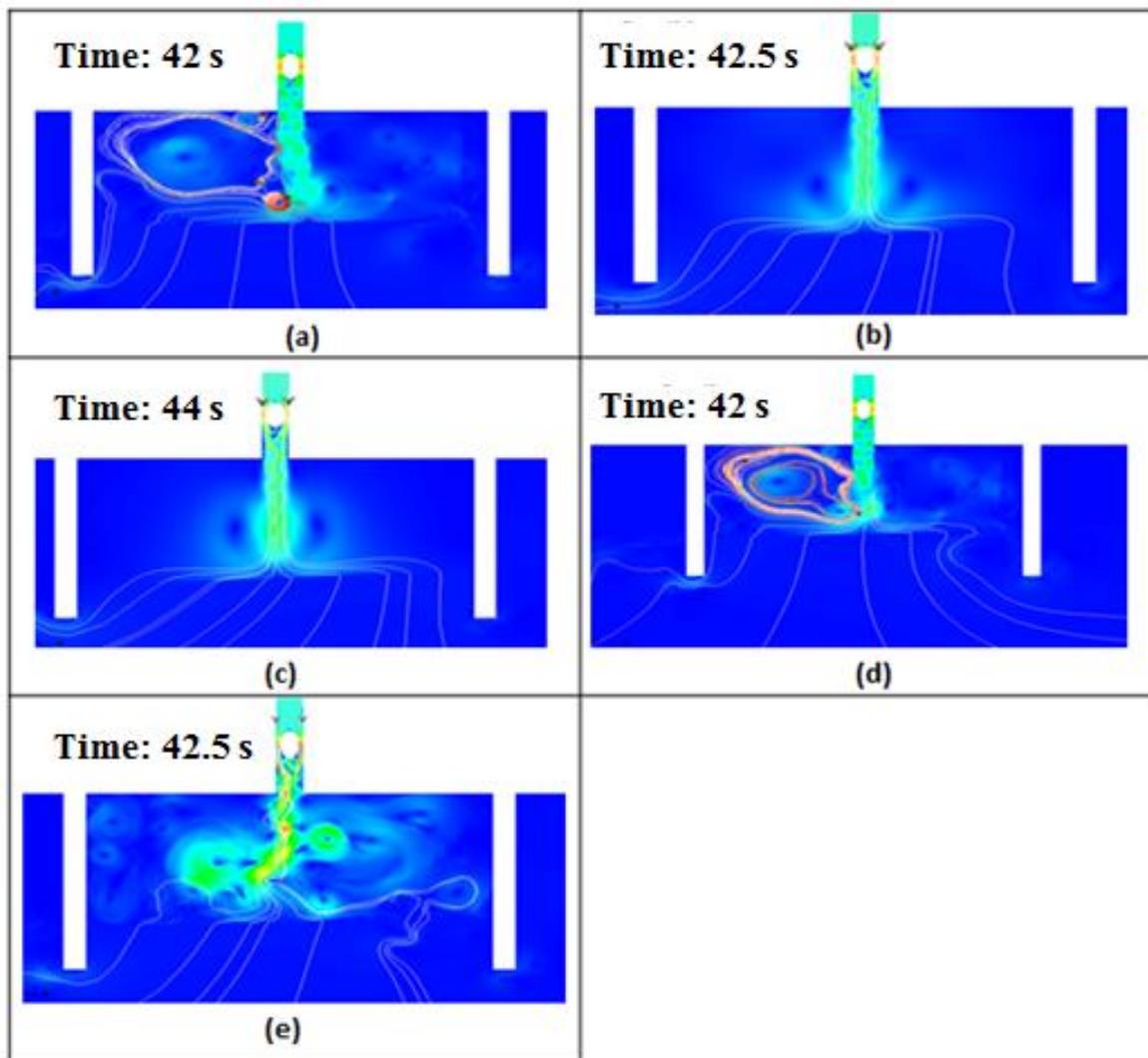


Figura 5.17 - Linhas de corrente para o momento de maior velocidade de decompressão da câmara OWC: (a) laminar, (b) $k-\epsilon$, (c) $k-\omega$ SST, (d) Spalart – Allmaras e (e) Smagorinsky.

Com as topologias para a maior velocidade de decompressão da câmara *OWC* da Fig. 5.17 pode-se observar uma formação maior de vórtices pelo modelo utilizando a abordagem *LES*, apresentada na figura (e). É possível observar, também, que o mesmo modelo apresenta uma acentuada formação dos vórtices no interior da chaminé.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos com a média *RMS* para as propriedades, comparando as diferentes discretizações espaciais analisadas nesse item.

Tabela 5.3 - Valores com média *RMS* das propriedades entre as diferentes discretizações espaciais.

Malha com 248.519 elementos					
Propriedade	laminar	<i>k-ε</i>	<i>k-ω SST</i>	Spalart-Allmaras	Smagorinsky
Vazão Mássica [kg/s]	3,9094	3,8915	3,2180	3,9093	N/A
Pressão [Pa]	60,3640	58,4497	51,6226	60,3887	N/A
Potência [W}	173,1515	166,2426	114,2732	173,0924	N/A
Malha com 1.477.778 elementos					
Propriedade	laminar	<i>k-ε</i>	<i>k-ω SST</i>	Spalart-Allmaras	Smagorinsky
Vazão Mássica [kg/s]	3,9178	3,9139	3,5748	2,6812	3,7781
Pressão [Pa]	55,4941	68,0389	66,5588	43,1617	147,0292
Potência [W}	139,5402	191,2273	209,5755	108,3967	462,5307

A Tabela 5.4 detalha as diferenças percentuais comparando os resultados entre os modelos de turbulência em relação ao regime laminar.

Tabela 5.4 - Diferença percentual entre os modelos de turbulência e o regime laminar.

Malha de 248.519 elementos					
Propriedade	laminar	<i>k-ε</i>	<i>k-ω SST</i>	Spalart-Allmaras	Smagorinsky
Vazão Mássica [kg/s]	-	0,45 %	17,68 %	0,00 %	N/A
Pressão [Pa]	-	3,17 %	14,48 %	0,04 %	N/A
Potência [W}	-	3,99 %	34,00 %	0,03 %	N/A
Malha de 1.477.778 elementos					
Propriedade	laminar	<i>k-ε</i>	<i>k-ω SST</i>	Spalart-Allmaras	Smagorinsky
Vazão Mássica [kg/s]	-	0,09 %	8,75 %	31,56 %	3,56 %
Pressão [Pa]	-	22,60 %	19,93 %	22,22 %	164,00 %
Potência [W}	-	37,00 %	50,19 %	22,31 %	231,46 %

Com os resultados expostos pelas Tabelas 5.3 e 5.4, observa-se uma grande diferença nos resultados para pressão e potência de todos os modelos estudados em comparação ao regime laminar com a malha mais refinada, onde apenas para o resultado da vazão mássica ocorre similaridade maior dos modelos $k-\varepsilon$ e Smagorinsky. Em contrapartida, para os resultados da malha menos refinada observa-se, conforme os outros casos estudados grande similaridade entre os valores, com destaque para o modelo Spalart-Allmaras, o qual obteve resultados praticamente iguais ao regime laminar.

6. CONCLUSÕES

Diferentes modelos de turbulência, *RANS* $k-\varepsilon$, $k-\omega$ *SST*, Spalart-Allmaras e *LES* Smagorinsky foram analisados em comparação ao regime de escoamento laminar na simulação numérica de um canal de ondas contendo um equipamento conversor de energia das ondas em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante, *OWC*. O intuito foi observar a necessidade ou não de aplicação nos códigos numéricos, desse tipo de estudo, das equações de fechamento que modelam os efeitos de turbulência no escoamento do ar conduzido pela chaminé do dispositivo, que passando pela câmara do mesmo devido à ação do efeito de pistão gerado pela passagem da onda pelo dispositivo. As simulações dos casos abordados no trabalho foram realizadas através dos programas de código aberto (*open source*), *GMSH* versão 2.16 para construção do domínio e geração da malha e *OpenFOAM*, versão 2.4.0 para resolução das equações de conservação da massa, quantidade de movimento e, também, a equação da fração volumétrica através do método *VOF* (*Volume of Fluid*). O programa *OpenFOAM* se utiliza das técnicas de volumes finitos para solucionar o problema em estudo. O programa *VisIt* versão 2.10.3 foi utilizado na etapa de pós processamento dos resultados simulados, com a captação dos valores para geração das curvas de velocidade, pressão e elevação da coluna de água, assim como as topologias da magnitude de velocidade, movimento do escoamento da onda ao longo do domínio e, também, linhas de corrente.

Para verificação numérica do código, três etapas foram analisadas ao longo do estudo. A primeira etapa consiste no teste de independência de malha na simulação de um canal sem dispositivo, Na segunda etapa, foi elaborado um modelo dispondo do mesmo canal de ondas da etapa anterior, porém, contendo em seu interior, o equipamento conversor de energia das ondas em energia elétrica *OWC*. Por fim, na terceira etapa foi estudada a inserção de um efeito de turbina ao equipamento, adaptado conforme estudo de GOMES et. al., (2015) para as dimensões do canal e do dispositivo simulados na segunda etapa.

A primeira conclusão após os resultados de todos os casos apresentados é que o modelo *RANS* $k-\omega$ *SST* não se comportou adequadamente em nenhuma das etapas do trabalho. Com isso, não se fazem recomendações para a realização de futuros estudos do tema apresentado para esse tipo de modelo de turbulência, aplicando o *solver interFOAM* ao estudo.

Em contrapartida, as simulações no regime laminar e com os modelos *RANS* ($k-\varepsilon$ e Spalart – Allmaras) conduziram a soluções similares para os campos transientes de velocidade, pressão e altura da superfície livre nos pontos de monitoramento avaliados. Contudo, os modelos de turbulência apresentam maior estabilidade do escoamento na região da câmara.

Ao ser realizada a comparação da abordagem *LES* com o modelo submalha dinâmico de Smagorinsky, os campos de velocidade obtidos foram semelhantes aos resultados dos demais modelos de turbulência e ao regime laminar. Entretanto, os campos de pressão possuem diferenças significativas que conduzem a estimativas, também, diferentes na potência disponível calculada do dispositivo.

Tendo em vista que o modelo *LES* é mais robusto em relação a todos os demais modelos estudados, sua aplicabilidade possui maior confiabilidade. Este fato é caracterizado pelos resultados da altura da elevação da água no interior da câmara, assim como a vazão mássica de ar transportado pela chaminé do equipamento obter comportamentos condizentes em relação ao regime laminar. A maior disparidade dos resultados da pressão e por consequência da potência do ar nessa análise são creditados a necessidade de uma quantidade maior de elementos na discretização espacial do domínio o que acarreta em uma maior quantidade de equações diferenciais para cálculo desses parâmetros.

Nesse sentido, os modelos clássicos de turbulência não são os mais adequados para a estimativa dos campos de pressão e potência disponível, quando é inserida uma forte restrição, conforme visto na última etapa do trabalho. A discretização com maior número de elementos resultou em uma divergência significativa para todos os modelos nos parâmetros anteriormente citados, sendo necessários futuros estudos para adequação da malha nesse exemplo de domínio.

7. PROPOSTA DE CONTINUIDADE

Esse trabalho apontou grande dificuldade da aplicação de modelos de turbulência ao código numérico do programa OpenFOAM para resolução de problemas envolvendo energia das ondas com o dispositivo *OWC*. No sentido fenomenológico do estudo, os modelos de turbulência podem mostrar importantes resultados em outros modelos computacionais envolvendo diferentes princípios. Tendo em vista que o modelo submalha dinâmico de Smagorinsky apresentou diferenças significativas para o campo de pressões e potência no presente estudo, trabalhos envolvendo outros equipamentos conversores de energia das ondas em energia elétrica, como por exemplo, o dispositivo de galgamento e dispositivos do tipo placa submersa são alternativas para novas análises. Pode-se exemplificar, também, a comparação de resultados dos modelos apresentados até então neste estudo com resultados de outros *softwares*, visando comparar a algum modelo experimental para uma melhor coerência de resultados.

Por fim, um estudo mais detalhado de diferentes algoritmos para aplicação das condições de contorno nos domínios com modelos de turbulência seria de grande importância, tendo em vista que o código do programa OpenFOAM é aberto e possibilita a programação livre.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS. **Guia de usuário do FLUENT**. 2017.

ASHLIN, S. J.; SANNASIRAJ, S. A.; SUNDAR, V. “**Performance of an array of oscillating water column devices integrated with an offshore detached breakwater.**” *Ocean Engineering*, v. 163, p. 518–532, 2018.

BARBOSA, D. V. E. “**Análise Numérica de Dispositivos de Extração de Energia das Ondas do Tipo Galgamento**”, 2016. Dissertação de Mestrado, Rio Grande - RS: Universidade Federal do Rio Grande - FURG - Programa de Pós Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO).

BEJAN, A. “**Convection Heat Transfer**”. Durham, USA: John Wiley, 2004.

BRUSCA, S.; GALVANO, A.; LANZAFAME, R.; GARRANO, A. M. C.; MESSINA, M. “**On the turbine-induced damping in Oscillating Water Column wave energy converter**”. *Energy Procedia*, v. 126, p. 581–588, 2017.

CRUZ, J. M.; SARMENTO, A. J. “**Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais**”. Amadora - Portugal: Instituto do Ambiente, 2004.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. “**Water wave mechanics for engineers and scientists**”. Singapore ; Teaneck, NJ: World Scientific, 1991.

DESCHAMPS, C. J. “**Turbulência**”. Rio de Janeiro, Brasil: Silva Freire, A. P.; Menut, P. P. M.; Su, J., Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2002.

DOS SANTOS, E. D. “**Análise Numérica de escoamentos Turbulentos não Reativos com Transferência de Calor por Convecção e Radiação Térmica em Meios Participantes**”, 2011. Tese de Doutorado, Porto Alegre - RS, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica.

DOS SANTOS, E. D.; PICCOLI, G.; PETRY, A. P.; FRANCA, F. H. R. “**Analysis of mixed convection in transient laminar and turbulent flows in driven cavities**”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 54, p. 4585–4595, 2011.

ELHANAFI, A.; FLEMING, A.; MACFARLANE, G.; LEONG, Z. “**Numerical energy balance analysis for an onshore oscillating water column-wave energy converter**”. *Energy*, v. 116, p. 539–557, 2016.

FALCÃO, A. “**Wave energy utilization: A review of the technologies**”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, p. 899–918, 2010.

FERRAZ, J. G.; NUNES, B. R.; RODRIGUES, M. K.; et al. “**Modelagem computacional de um trocador de calor solo-ar empregando diferentes modelagens para turbulência**”. *Scientia Plena*, v. 11, p. 1–10, 2015.

FERZIGER, J. “**Simulation of Complex Turbulent Flows: Recent Advances and Prospects in Wind Engineering**”. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 46 & 47, p. 195–212, 1993.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M.” **Computational Methods for Fluid Dynamics**”. 3rd ed. Springer, 2002.

GOMES, M. N. “**Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante**”. 2014. Tese de Doutorado, Porto Alegre - RS, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

GOMES, M. N.; SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O. “**Numerical Analysis including Pressure Drop in Oscillating Water Column Device**”. *Open Engineering*, v. 5, n. 1, p. 229–237, 2015.

HINZE, J. O. “**Turbulence**”. second ed. ed. New York, USA: McGraw-Hill, 1975.

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.

ITURRIOZ, A.; GUANCHE, R.; LARA, J. L.; VIDAL, C.; LOSADA, I. J. “**Validation of OpenFOAM for Oscillating Water Column three-dimensional modeling**”. *Ocean Engineering*, v. 107, p. 222–236, 2015.

JASAK, H. **“Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flow”**., 1996. Tese de Ph.D., Exhibition Road, London SW7 2BX, UK: Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. **“The numerical computation of turbulent flows”**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, p. 269–289, 1974.

LESIEUR, M.; MÉTAIS, O.; COMTE, P. **“Large-Eddy Simulations of Turbulence”**. 1st ed. New York: Cambridge University, 2005.

LORENZINI, G.; LARA, M. F. E.; ROCHA, L. A. O.; et al. **“Constructal design applied to the study of the geometry and submergence of an oscillating water column”**. Int. J. Heat Technol., v. 33, n. 2, p. 31–38, 2015.

MAHNAMFAR, F.; ALTUNKAYNAK, A. **“Comparison of numerical and experimental analyses for optimizing the geometry of OWC systems”**. Ocean Engineering, v. 130, p. 10–24, 2017.

MALISKA, C. R. **“Transferência de calor e Mecânica dos Fluidos Computacional”**. 2^a ed. LTC, 2004.

MARJANI, A. E.; CASTRO, F.; BAHAJI, M.; FILALI, B. **“3D Unsteady Flow Simulation in an OWC Wave Converter Plant”**. ICREPQ’ 06. Palma de Mallorca, Spain, 2006.

MAVRIPILIS, D. J. Unstructured Grid Techniques. **“Annual Reviews Fluid Mechanics”**, v. 29, p. 473–514, 1997.

MÖLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. **“Turbulência”**. Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (Coleção Cadernos de Turbulência, 4), 2004.

OPENFOAM FOUNDATION. **“OpenFoam user’s guide v. 6.0”**. , 2018.

RAJ, D. D.; SUNDAR, V.; SANNASIRAJ, S. A. **“Enhancement of Hydrodynamic Performance of An Oscillating Water Column With Harbour Walls”**. Renewable Energy, v. 132, p. 142–156, 2018.

REZENDE, A. L. T. “**Análise Numérica da Bolha de Separação do Escoamento Turbulento sobre Placa Plana Fina Inclinada**”, 2009. Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, Brasil: Pontifícia Universidade Católica - Departamento de Engenharia Mecânica.

ROGALLO, R. S.; MOIN, P. “**Numerical Simulation of Turbulent Flows**”. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, v. 16, p. 99–137, 1984.

SAUGAT, P. “**Large eddy simulation for incompressible flows, an introduction**”. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2006.

SHALBY, M.; WALKER, P.; DORRELL, D. “**Modelling of multi-chamber oscillating water column in regular waves at model scale**”. *Energy Procedia*, v. 136, p. 316–322, 2017.

SILVEIRA NETO, A. “**Turbulência**”. Rio de Janeiro, Brasil: Silva Freire, A. P.; Menut, P. P. M.; Su, J., Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 2002.

SPALART, P.; ALLMARAS, S. “**A one-equation turbulence model for aerodynamics flows**”. Technical Report AIAA-92-0439, American Institute of Aeronautics and Astronautics, v. 1, p. 5–21, 1992.

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

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. “**An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**”. second ed. Edinburgh Gate, Essex CM20 2JE, England: Pearson Education Limited, 2007.

WILCOX, D. C. “**Turbulence modeling for CFD**”. 2. ed., [Nachdr.] ed. La Cañada, Calif: DCW Industries, 2004.