

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

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS EM
ENERGIA ELÉTRICA DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE (CAO) CONSIDERANDO
DADOS REALÍSTICOS DE ESTADO DE MAR

por

Sersana Sabedra de Oliveira

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Modelagem Computacional

Orientador: Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Co-orientador: Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Rio Grande, junho, 2018

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS EM
ENERGIA ELÉTRICA DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE (CAO) CONSIDERANDO
DADOS REALÍSTICOS DE ESTADO DE MAR

por

Sersana Sabedra de Oliveira

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC), da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Modelagem Computacional

Área de Concentração: Mecânica Computacional

Orientador: Prof. Dr. Liércio André Isoldi

Co-orientador: Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Aprovada por

Prof. Dr. Liércio André Isoldi (PPGMC/FURG)

Prof. Dr. Wiliam Correa Marques (PPGMC/FURG)

Prof^a. Dr^a. Bianca Neves Machado (UFRGS)

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos (PPGMC/FURG)

Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes (PPGMC/IFPR)

Prof. Dr. Wiliam Correa Marques
Coordenador do PPGMC

Rio Grande, 08 de junho de 2018.

Ficha catalográfica

O482m Oliveira, Sersana Sabedra de.
Modelagem computacional de um conversor de energia das ondas em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante (cao) considerando dados realísticos de estado de mar / Sersana Sabedra de Oliveira. – 2018.
114p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande –
FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional
(PPGMC), Rio Grande/RS, 2018.
Orientador: Dr. Liércio André Isoldi.
Coorientador: Dr. Wiliam Correa Marques.

1. Coluna de Água Oscilante 2. Metodologia Piston 3. Estado de Mar Realístico
4. Simulação Numérica I. Isoldi, Liércio André II. Marques, Wiliam Correa
III. Título.

CDU 004:537

AGRADECIMENTOS

A FURG, sem a qual este trabalho não seria possível;

Ao PPGMC, pela oferta do curso à nível de mestrado na área;

A CAPES, pelo suporte financeiro;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Liércio André Isoldi, por aceitar minha orientação, por ser paciente com minhas dificuldades e assim possibilitar esta oportunidade de aprendizado e crescimento;

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Wiliam Marques, por aceitar me co-orientar;

Ao Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos, por ser meu malvado favorito, que com bom humor sempre realizou aulas divertidas;

Ao meu amado Antônio, por compreender minha ausência em nosso lar;

Ao Edis e Phelype, pela colaboração e toda atenção que recebi de ambos;

E aos meus queridos colegas de laboratório Laísa, e Luciano, pelos momentos de descontração, pelas conversas fiadas, pelos passeios no CC e a amizade construída.

RESUMO

Num momento em que o consumo de energia elétrica vem sendo discutido mundialmente devido aos problemas provenientes de sua geração, há uma grande necessidade de desenvolver alternativas que conduzam a impactos ambientais menores. Além das energias renováveis que já estão em funcionamento, existe uma que tem se destacado devido a sua abundância de recurso natural, que é a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica. Atualmente existem diversas tecnologias que fazem esta conversão, porém nenhuma consolidada. Dentre elas o dispositivo do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO) é, aparentemente, o mais promissor. O objetivo desta pesquisa é propor um modelo simplificado para simular numericamente o princípio de funcionamento de um CAO, a fim de que se possa utilizar dados de estado de mar realísticos, para isso este modelo é baseado na metodologia *piston*, a qual considera apenas o conversor e o escoamento do ar em um domínio computacional bidimensional com o uso de uma malha gerada através do software GAMBIT. Para simulação numérica foi utilizado o software ANSYS FLUENT 14.0. Ao longo da pesquisa foi realizado, teste de independência de malha, verificação do modelo com soluções numérica (nesta etapa foi verificada a utilização da ferramenta *Table Data* para inserção de dados, como condição de contorno para velocidade prescrita) e analítica, onde houve comparações dos resultados obtidos empregando o modelo em estudo, considerando as condições de sucção e exaustão na CAO com diferentes magnitudes de velocidade. Também foi realizada uma análise dos esquemas de solução disponíveis no software, para acoplamento pressão velocidade, discretização da pressão e solução dos termos advectivos, a fim de obter uma combinação que reduza as diferenças entre as soluções numérica e analítica e o tempo de processamento o tempo de processamento. Foi proposto também, um estudo de caso onde se utilizou dados discretos de tempo e velocidade como condição de contorno, calculadas a partir de um método que transforma o espectro de variância do estado de mar em uma série temporal de elevação da superfície livre correspondente, considerando o clima de ondas referente a região do Farol de Santa Marta/SC, a partir disto foi calculada a energia disponível do dispositivo, o qual apresentou capacidade de abastecimento de energia elétrica para aproximadamente 477 residências. A partir dos resultados, pode-se considerar que esta modelagem é promissora em aplicações realísticas e também deve-se destacar que a inserção de dados realísticos é um aspecto original deste estudo. O modelo numérico proposto foi capaz de simular numericamente o comportamento fluidodinâmico do escoamento de ar na CAO atendendo as equações da continuidade e da energia mecânica.

Palavras-chaves: Coluna de Água Oscilante, Metodologia *Piston*, Estado de Mar Realístico, Simulação Numérica.

ABSTRACT

At a time when the consumption of electric energy has been discussed worldwide due to problems arising from its generation, there is a strong need to develop alternatives that lead to lower environmental impacts. In addition to the renewable energies that are already in operation, there is one that has stood out due to its abundance of natural resource, which is the conversion of energy from sea waves into electricity. Currently there are several technologies that make this conversion, but none consolidated. Among them, the Oscillating Water Column (CAO) device is, apparently, the most promising. The objective of this research is to propose a simplified model to numerically simulate the operating principle of a CAO, in order to use realistic sea state data, for this this model is based on piston methodology, which considers only the converter and the air flow in a computational domain, two-dimensional, using a mesh generated through GAMBIT software. ANSYS FLUENT 14.0 software was used for numerical simulation. Throughout the research was carried out, test of independence of grid, verification of the model with numerical solutions (in this step, the use of the Table Data tool for data insertion as a boundary condition for the prescribed velocity was verified) and analytical, where there were comparisons of the results obtained using the model under study, considering the conditions of suction and exhaustion in the CAO with different magnitudes of velocity. It was also performed an analysis of the solution schemes available in the software, for coupling pressure speed, discretization of the pressure and solution of the advective terms, in order to obtain a combination that reduces the differences between the numerical and analytical solutions and the processing time. It was also proposed a case study where discrete time and velocity data were used as a boundary condition, calculated from a method that transforms the sea state variance spectrum into a corresponding free surface elevation time series, considering the wave climate referring to the Santa Marta/SC lighthouse region, from this the available energy of the device was calculated, which presented capacity to supply electricity to approximately 477 households. From the results, it can be considered that this modeling is promising in realistic applications and it should also be emphasized that the insertion of realistic data is an original aspect of this study. The numerical model proposed was able to numerically simulate the fluid dynamics behavior of the air flow in the CAO attending the equations of continuity and mechanical energy.

Key words: Oscillating Water Column, Piston Methodology, Realistic Sea State, Numerical Simulation.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Estado da arte	18
1.1.1. Estudos numéricos realizados com CAO	18
1.1.2. Estudos numéricos com o emprego da metodologia pistão.....	23
1.2. Objetivo.....	28
2. ENERGIA DAS ONDAS	29
2.1. Fontes de energia renovável.....	29
2.2. A energia das ondas como recurso e seus primeiros indícios.....	29
2.3. Potencial global da energia das ondas.....	32
2.4 Tecnologias de conversão da energia de ondas em energia elétrica.....	33
2.5 Coluna de água oscilante (CAO)	34
3. REFERENCIAL TEÓRICO	36
3.1 Mecânica dos fluidos	36
3.1.1 Conservação de massa	36
3.1.2 Conservação de energia térmica e mecânica	37
Perda de carga	39
Perda de carga distribuída	40
Perda de carga localizada.....	41
3.2 Potência e energia	42
4. MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	47
4.1 Dinâmica de fluidos computacional (CFD)	47
4.1.1 Domínio computacional	47
4.1.2 Condições de contorno	48
Figura 4.1 – Representação esquemática das condições de contorno	48
Ferramenta Table data.....	48
4.1.3 Geração da malha	49
4.2 Simulação numérica.....	49
4.2.1 Modelo de turbulência.....	49
Modelo k-ε padrão	49
4.2.2 Acoplamento pressão velocidade.....	51
Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE).....	51
SIMPLE – Consistente (SIMPLEC)	51
Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO).....	51

Coupled.....	51
4.2.3 Discretização da pressão.....	52
PRESTO.....	52
4.2.4 Solução dos termos advectivos.....	52
Esquema upwind de primeira ordem	52
5. MODELO E METODOLOGIA NUMÉRICA	53
Figura 5.1 – a) Domínio computacional b) Malha e condições de contorno.....	53
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
6.1 Verificação do modelo computacional.....	55
6.1.1 Verificação através de comparação com solução numérica.....	55
6.1.2 Verificação através de comparação com solução analítica.....	57
6.2 Análise dos esquemas de solução.....	69
6.3 Análise da qualidade da malha.....	78
6.4 Estudo de caso.....	80
6.4.1 Obtenção do dados realísticos de estado de mar	80
6.4.2 Teste de independência de malha	84
6.4.3 Teste de independência de passo de tempo.....	85
6.4.4 Simulação numérica empregando os dados realísticos de estado de mar.....	89
7. CONCLUSÃO	92
7.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	93
8. REFERÊNCIAS	95
ANEXO 1 – Resultado da simulação de consumo de energia elétrica mensal para uma casa com 06 cômodos.....	99
APÊNDICE 1 – Modelo de arquivo inserido no ANSYS FLUENT 14.0, como condição de contorno, contendo valores discretos de tempo (s) e velocidade (m/s).	101
APÊNDICE 2 – Passo a passo, da configuração do modelo no ANSYS FLUENT 14.0.	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Geometria considerada clássica (Mahnamfar e Altunkaynak, 2017).....	21
Figura 1.2 – Geometria considerada modificada (Mahnamfar e Altunkaynak, 2017)	21
Figura 1.3 – Dispositivo CAO com o modelo pistão – Adaptada de Bouhrim e Marjani (2016)	26
Figura 1.4 – Domínio do caso estudado – Adaptada de Bouhrim e Marjani (2016)	27
Figura 1.5 – Mecanismo de funcionamento do modelo – Adaptada de Barakaz e Marjani (2016) ..	27
Figura 2.1 – Vista posterior da central CAO de Portugal (Falcão e Henriques, 2016).....	31
Figura 2.2 – Central CAO da Escócia (Falcão e Henriques, 2016)	31
Figura 2.3 – Estimativa global aproximada da energia das ondas (López et al., 2013).....	32
Figura 2.4 – Principais sistemas de conversão de energia das ondas – adaptada de Falcão, 2010....	34
Figura 2.5 – Princípio de funcionamento: a) Movimento do ar quando a onda incide e b) Movimento do ar com o regresso da onda ao mar – Adaptada de Revolução Energética (2013)	35
Figura 3.1 – Diagrama de Moody – adaptado de (Fox e McDonald, 2001)	41
Figura 3.2 – Coeficientes de perda para escoamentos através de mudanças súbitas – adaptado de (Fox e McDonald, 2001).....	42
Figura 4.1 – Representação esquemática das condições de contorno	48
Figura 5.1 – a) Domínio computacional b) Malha e condições de contorno	53
Figura 6.1 – Comparação da variação de velocidade vertical na chaminé do conversor CAO	56
Figura 6.2 – O ponto em destaque, refere-se a malha 7 da Tab. 6.1	58
Figura 6.3 – Curvas resultantes das soluções numérica e analítica considerando e desconsiderando as perdas de carga	67
Figura 6.4 – Curvas das velocidades de saída obtidas por meio do método analítico e numérico	68
Figura 6.5 – Malha com refinamento maior nas bordas	78
Figura 6.6 – Comparação entre as curvas	80
Figura 6.7 – Representação do espectro direcional do TOMAWAC em um ponto da malha – Adaptada de Oleinik (2017).....	81
Figura 6.8 – Altura significativa no ponto durante o ano de 2014.....	83
Figura 6.9 – A parte em destaque compreende entre 15h de 26/02/2014 até 15h de 27/02/2014	83
Figura 6.10 – O ponto em destaque, refere-se a malha 5 da Tab. 6.28.....	85
Figura 6.11 – Velocidades de entrada.....	85
Figura 6.12 – Janela de configuração do espaço de tempo da simulação.....	86
Figura 6.13 – Velocidades de saída registradas em cada caso.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 – Diferença relativa entre as malhas	57
Tabela 6.2 – Velocidades prescritas para o movimento de sucção e exaustão	59
Tabela 6.3 – Velocidades de saída do dispositivo para os movimentos de sucção e exaustão	59
Tabela 6.4 – Perda de carga localizada durante o movimento de sucção e exaustão	60
Tabela 6.5 – Número de Reynolds e fator de atrito utilizados durante a exaustão e sucção	61
Tabela 6.6 – Perda de carga distribuída durante o movimento de sucção e exaustão	61
Tabela 6.7 – Perda de carga total para a sucção e exaustão	62
Tabela 6.8 – Resultados analíticos para diferença de pressão entre a entrada e a saída do dispositivo CAO considerando as perdas de carga.....	62
Tabela 6.9 – Resultados analíticos para diferença de pressão entre a entrada e a saída do dispositivo CAO desconsiderando as perdas de carga	63
Tabela 6.10 – Resultados numéricos para a velocidade na saída da chaminé	63
Tabela 6.11 – Pressão total na entrada da câmara e saída da chaminé durante o movimento de sucção.....	64
Tabela 6.12 – Pressão total na entrada da câmara e saída da chaminé durante o movimento de exaustão.....	64
Tabela 6.13 – Diferença de pressão total numérica para os movimentos de sucção e exaustão.....	65
Tabela 6.14 – Resultados analíticos e numéricos para a diferença de pressão entre a entrada e a saída do dispositivo CAO considerando as perdas de carga.....	65
Tabela 6.15 – Resultados analíticos e numéricos para a diferença de pressão entre a entrada e a saída do dispositivo CAO desconsiderando as perdas de carga.....	66
Tabela 6.16 – Resultados analíticos e numéricos para a velocidade na saída da chaminé	67
Tabela 6.17 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo SIMPLE como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de -1,25 m/s representando o movimento de sucção	70
Tabela 6.18 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo PISO como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de -1,25 m/s representando o movimento de sucção	71
Tabela 6.19 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo SIMPLEC como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de -1,25 m/s representando o movimento de sucção.....	72

Tabela 6.20 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo Coupled como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de -1,25 m/s representando o movimento de sucção	73
Tabela 6.21 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo SIMPLE como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de 1,25 m/s representando o movimento de exaustão.....	74
Tabela 6.22 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo PISO como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de 1,25 m/s representando o movimento de exaustão.....	75
Tabela 6.23 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo SIMPLER como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de 1,25 m/s representando o movimento de exaustão.....	76
Tabela 6.24 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo Coupled como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de 1,25 m/s representando o movimento de exaustão.....	77
Tabela 6.25 – Resultados analíticos e numéricos para a diferença de pressão entre a entrada e a saída do dispositivo CAO considerando as perdas de carga.....	78
Tabela 6.26 – Resultados analíticos e numéricos para a diferença de pressão entre a entrada e a saída do dispositivo CAO desconsiderando as perdas de carga.....	79
Tabela 6.27 – Informações de período médio e comprimento de onda a cada hora.....	84
Tabela 6.28 – Diferença relativa entre as malhas	84
Tabela 6.29 – Discretização temporal de cada caso.....	87
Tabela 6.30 – Potencial hidrostático obtido por hora	89
Tabela 6.31 – Grupo de ondas por hora	90
Tabela 6.32 – Energia absorvida por hora	90

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2	Dióxido de Carbono
D	Diâmetro [m]
e_{mec}	Energia mecânica [J]
f	Frequência [1/s]
f_a	Fator de atrito
F_1	Força aplicada pela pressão do ar [N]
F_2	Força aplicada pela pressão da água [N]
$\mathfrak{F}(\eta)$	Transformada de Fourier da elevação da superfície
\mathfrak{F}^{-1}	Transforma inversa de Fourier
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
h	Profundidade [m]
H	Amplitude [m]
H_e	Carga [C]
H_T	Perda total de carga
h_l	Perda de carga distribuída
h_{lm}	Perda de carga localizada
k	Coefficiente de perda
l	Escala de comprimento [m]
L	Comprimento [m]
$M(t)$	Massa de água incidente na câmara [kg]
p	Pressão termodinâmica [Pa]
P	Pressão [Pa]
P_1	Pressão na entrada da CAO [Pa]
P_2	Pressão na saída da CAO [Pa]

P_{HID}	Potencia hidropneumática [W]
Q	Vazão volumétrica [m^3/s]
Re	Número de Reynolds [$\rho v D / \mu$]
t	Tempo [s]
Δt	Intervalo de tempo [s]
T	Período [s]
V	Velocidade [m/s]
$v(t)$	Função velocidade [m/s]
V_1	Velocidade da entrada da CAO [m/s]
V_2	Velocidade da saída da CAO [m/s]
V_{med}	Velocidade média [m/s]
$w(t)$	Função velocidade [m/s]
x	Posição espacial [m]
z	Posição vertical [m]
\dot{m}	Vazão massica [kg/s]
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor [W]
\dot{W}	Taxa de realização de trabalho [W]
\vec{v}	vetor velocidade [m/s]

Símbolos gregos

δ	Quantidade diferencial
ΔP	Diferença de pressão [Pa]
ε	Dissipação da energia cinética
μ	Viscosidade [kg/ms]
ρ	massa específica [kg/m^3]
τ	Tensor de tensões [N/m^2]

η Elevação da superfície [m]

$\Delta\eta$ Diferença da elevação da superfície [m]

LISTA DE ABREVIATURAS

1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
BIEM	<i>Boundary Integral Equation Method</i>
BVP	<i>Boundary Value Problem</i>
CAO	Coluna de Água Oscilante
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
EDP	Equação Diferencial Parcial
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
LIMPET	<i>Land Installed Marine Power Energy Transmitter</i>
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
NTS	<i>Number of Time Steps</i>
OWC	<i>Oscillating Water Column</i>
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
PRESTO	<i>PREssure STaggering Option</i>
PTO	<i>Power Take-Off</i>
PVI	<i>Particle Imaging Velocimetry</i>
R&D	<i>Research and Development</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
SIMPLEC	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistente</i>
SPH	<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>

TSS *Time Step Size (s)*
UDF *User Defined Function*
VOF *Volume of Fluid*
WEC *Wave Energy Converter*
WT *Wave Tank*

1. INTRODUÇÃO

A busca por novos dispositivos com capacidade de geração de energia utilizando fontes renováveis é objeto de discussão em todo o mundo devido ao grande apelo para redução de emissões de gases poluentes e minimização dos impactos ambientais (Falcão, 2010). Além das energias renováveis que já estão em funcionamento, existe uma que tem se destacado, devido à sua abundância em recurso natural, que consiste na conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica. As ondas do mar se amplamente exploradas podem contribuir significativamente para o abastecimento de energia elétrica, principalmente de países com costas litorâneas (Falcão e Henriques, 2016).

A energia contida nos oceanos pode ter origens diferentes, o que acarretam diferentes classificações. As mais relevantes são, sem dúvida, a energia das marés, a energia térmica dos oceanos, a energia das correntes marítimas e a energia das ondas. Uma vez criadas, as ondas podem viajar milhares de quilômetros no alto mar praticamente sem perdas de energia (Cruz e Sarmiento, 2004). O nível de energia da onda geralmente é expresso como potência por unidade de comprimento. Em locais considerados “bons” a média anual varia entre 20 e 70 kW/m, o que torna as costas do sul da América do Sul, África e Austrália particularmente atraentes para a exploração de energia das ondas (Falcão, 2010).

Para realizar a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica, existem diversas tecnologias que podem ser classificadas quanto a sua posição de instalação: *onshore* (dispositivos integrados a costa); *near-shore* (dispositivos instalados em locais com profundidade entre 8 e 20 m) e *offshore* (dispositivos instalados em locais com profundidade superior a 25 m). Outra forma de classificar os dispositivos diz respeito ao seu princípio físico de funcionamento. Têm-se três principais grupos: Coluna de Água Oscilante (CAO), Corpos flutuantes, podendo ser de absorção pontual ou progressiva e Galgamento (Cruz e Sarmiento, 2004).

Neste trabalho é estudado o sistema do tipo CAO (ou do inglês *Oscilating Water Column* - OWC). Estes dispositivos são uma classe importante de conversores de energia das ondas (ou em inglês *Wave Energy Converter* - WEC) visto que uma grande parte dos protótipos de conversores de energia de ondas implantados até o momento no mar são deste tipo, porém, ainda não há uma tecnologia consolidada. Em uma CAO, há uma estrutura oca fixa ou flutuante, com abertura ao mar abaixo da superfície da água, que prende o ar sobre a superfície livre interna. A ação das ondas comprime e descomprime alternadamente o ar aprisionado que é forçado a escoar através de uma turbina localizada no topo da câmara acoplada a um gerador (Falcão e Henriques, 2016).

1.1. Estado da arte

Os conversores CAO, têm sido estudados por vários autores, portanto o estado da arte será dividido em duas partes, onde no primeiro tópico serão apresentados alguns estudos que vem sendo realizados a nível experimental e numérico e, no outro, estudos numéricos envolvendo a metodologia pistão.

1.1.1. Estudos numéricos realizados com CAO

Em Zhang et al. (2012), um dispositivo CAO foi estudado numericamente a fim de examinar suas características hidrodinâmicas. Seus resultados numéricos foram comparados com dados experimentos já publicados. Nos dispositivos CAO, os movimentos combinados de ar e água influenciam significativamente nos resultados físicos, no qual estes, não podem ser representados adequadamente se não houver a simulação das fases de ar e água. Portanto, um método numérico baseado em um nível de duas fases definido com o método de correção de massa global e fronteira imersa foi usado para simular numericamente a eficiência hidrodinâmica deste dispositivo. O campo de escoamento, a superfície livre e a distribuição da pressão são calculados em instantes diferentes no tempo para apresentar a perda de energia. Foi investigado o efeito das várias condições de onda, profundidade de imersão, espessura da parede frontal da câmara, e geração de vórtice em torno da parede frontal. Segundo os autores, o modelo não só apresentou uma boa previsão da eficiência hidrodinâmica ao ser comparado com resultados experimentais e teóricos, como também, revela com bom detalhamento dos campos de escoamento do ar e água, distribuição de pressão, vorticidade e elevação da superfície livre, mas é reconhecido que a camada limite não será totalmente resolvida com esta abordagem.

Em Teixeira et al. (2013), foi investigado numericamente a geometria de um dispositivo CAO, e a turbina, segundo os autores esses elementos otimizam o funcionamento do dispositivo, para isso, foram realizadas variações na profundidade da parede dianteira, no comprimento da câmara, na turbina e na altura da câmara utilizando o código FLUINCO. O estudo foi realizado em um canal de 10 m de profundidade, submetendo as CAOs a ondas de 1 m de comprimento com períodos que variam de 4 s a 15 s. Inicialmente foi realizada a verificação do código FLUINCO, comparando os resultados gerados com relação à elevação da superfície livre, fator de amplificação e a média da diferença máxima entre a elevação da superfície livre no interior da CAO na parede frontal menos a elevação da superfície livre no interior da CAO na parede traseira, esse parâmetro é chamado de *sloshing*, no código comercial FLUENT. Para tal o FLUENT foi configurado com o algoritmo SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade, o PRESTO para discretização da pressão, o

esquema MUSCL para os termos advectivos, o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ e o modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF). Ambos os códigos geraram resultados semelhantes, dando-se assim a verificação do FLUINCO para o estudo. Posteriormente se fez o estudo da geometria da câmara e da turbina, a fim de analisar o desempenho da CAO em relação à variação dessas características. Os autores consideraram que os resultados obtidos para um dispositivo CAO com câmara aberta e com turbina mostram que o modelo aerodinâmico implementado no código numérico FLUINCO é uma ferramenta promissora para modelando um dispositivo CAO completo, considerando tanto a hidrodinâmica quanto a aerodinâmica.

Em Bouali e Larbi (2013), é aprimorada a geometria e as dimensões do conversor CAO, como o tamanho da câmara, a profundidade de submersão e a orientação da parede frontal, para obter a máxima potência disponível, considerando uma onda com período e comprimento constantes. Foi usado o software ANSYS CFX, e os resultados obtidos mostraram que, as características em estudo tem um impacto significativo no desempenho do dispositivo.

Em Didier et al. (2016), foi apresentada a aplicação e a verificação do modelo numérico SPHyCE, baseado numa formulação padrão de SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*), para modelar uma CAO *onshore*, comparando os resultados do fator de amplificação e o atraso de fase com os obtidos por um modelo RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*). O código SPHyCE foi aplicado em um canal de ondas simples com fundo horizontal e uma CAO no final, visando estudar com precisão a eficácia do modelo, avaliando sua capacidade para modelar a interação entre o CAO com severas condições de mar, quebra de onda e força de impacto. De acordo com os autores, modelos empregando SPH são mais apropriados para essas condições do que o modelo RANS-VOF. Inicialmente, uma análise da influência de diferentes resoluções (isto é, dimensão das partículas) mostrou a independência dos resultados com relação ao balanceamento tanto da precisão quanto ao tempo de processamento. Em segundo lugar, o fator de amplificação da elevação média da superfície livre entre séries temporais da elevação da parte externa e interna da câmara foram analisados. Para verificar o modelo, foi utilizado o código comercial FLUENT, o qual foi configurado com o algoritmo SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade, o PRESTO para discretização da pressão, o esquema MUSCL para os termos advectivos, o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ e o modelo multifásico VOF. Neste estudo foi possível mostrar como o SPHyCE modelou com precisão o fenômeno de ressonância em uma câmara de água oscilante, proporcionando, em um futuro próximo, interessantes aplicações do modelo numérico em relação a este tipo de estudos.

Em Elhanafi et al. (2016), foi feita uma análise numérica do balanço de energia de uma CAO *onshore*, utilizando um modelo de CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Para sua validação foram

utilizados dados experimentais, como diferença de pressão dentro da câmara e elevação da superfície livre. Além disso também foi comparada a capacidade do modelo CFD em capturar detalhes no campo de escoamento, com dados PIV (*Particle Imaging Velocimetry*) de um modelo experimental, o que confirmou com precisão os processos de formação e dissipação de vórtices dentro e ao redor da CAO. Após a validação, o modelo foi então aplicado em vários testes numéricos com diferentes modelos de turbulência, tais como: *standard k-ε*, *realizable k-ε* e *SST k-ω*. Como o objetivo do estudo era obter o impacto do aumento da altura das ondas incidentes e o amortecimento pneumático da PTO¹ (*power take-off*), no desempenho hidrodinâmico de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo CAO, o modelo também foi utilizado para realizar análises de balanço de energia de quarenta ondas (cinco alturas de onda incidente *versus* oito amortecedores de PTO) simulados por diferentes aberturas de fendas.

Em Vyzikas et al. (2017), uma investigação da aplicabilidade de um modelo numérico multifásico 3D, para simular a interação entre uma CAO com ondas regulares e irregulares foi proposto. Para geração e absorção das ondas, foi utilizada a ferramenta *waves2FOAM* do software OpenFOAM. Para a validação do modelo, foram utilizados os resultados experimentais obtidos no laboratório COAST da Universidade de Plymouth. Nas simulações numéricas foi empregado o modelo de turbulência *k-ε* e para o acoplamento pressão velocidade o algoritmo PIMPLE (combinação entre SIMPLE e PISO, mas nas simulações apresentadas neste trabalho o algoritmo operou no modo PISO). Segundo os autores, a validação indicou a absorção imperfeita das ondas refletidas a partir da entrada, o que pode causar discrepâncias de pressão consideráveis na CAO. Além disso, o estudo de ondas irregulares deve ser realizado de forma mais eficiente a nível computacional para poder examinar o efeito de fases aleatórias sobre a resposta da CAO. Neste trabalho ainda foram realizados estudos adicionais, que inclui teste de decaimento, curva de desempenho, comportamento hidrodinâmico e análise de reflexão. Em estudos futuros, os autores pretendem incluir outras comparações entre o modelo físico e o modelo numérico, como as velocidades do ar e as cargas nas paredes da CAO e ainda explorar a capacidade 2D equivalente do modelo, visto que serão mais eficientes para os estudos preliminares e as simulações longas com ondas irregulares visando reduzir o esforço computacional.

Em Mahnamfar e Altunkaynak (2017), é feita uma comparação das análises numéricas e experimentais para otimizar a geometria do sistema CAO. Para tal, duas geometrias foram criadas, das quais uma foi considerada como clássica e a outra como modificada conforme ilustra as Figs.

¹ A turbina é o mecanismo de tomada de força (*power take-off*) usado para transformar a energia pneumática em energia mecânica e depois para eletricidade com o uso de um gerador.

1.1 e 1.2.

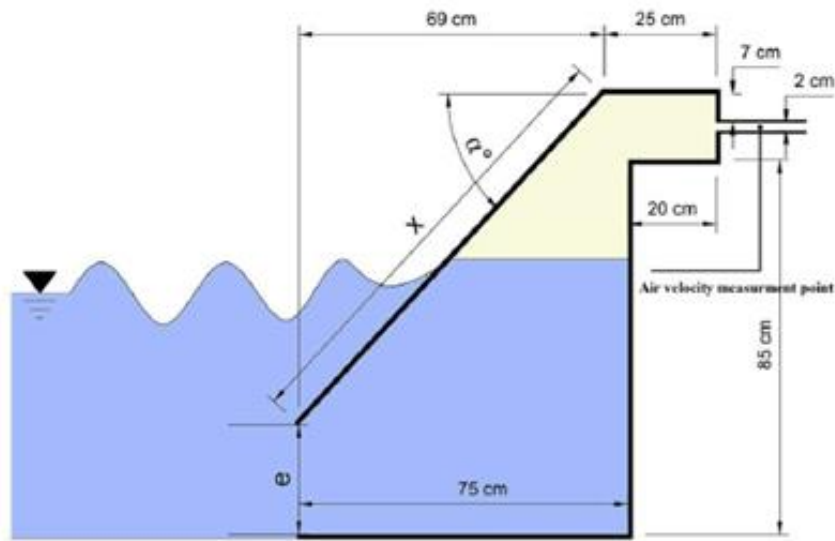


Figura 1.1 – Geometria considerada clássica (Mahnamfar e Altunkaynak, 2017)

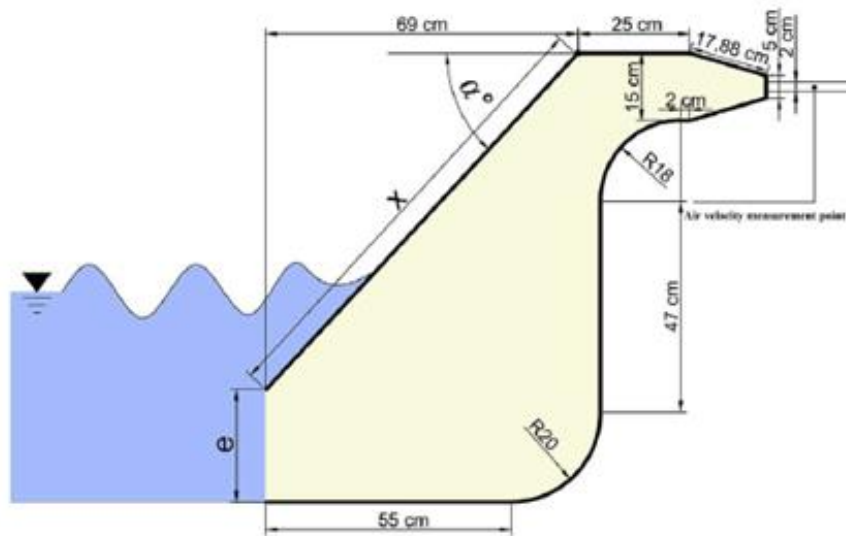


Figura 1.2 – Geometria considerada modificada (Mahnamfar e Altunkaynak, 2017)

Para a realização dos testes, previamente os autores monitoraram a formação de ondas regulares no canal com profundidades de água que variaram entre 30, 40, 50 e 60 cm, sem a presença da CAO, a fim de reduzir os efeitos de reflexão. Com isso foi possível obter 4 grupos com 4 séries de ondas regulares diferentes, que serviram como dados de entrada nos testes. Outra variação que foi considerada refere-se à angulação da parede frontal das duas geometrias, onde foram adotados ângulos de 47° , 40° , 35° e 30° para α (ver Figs. 1.1 e 1.2). Nas simulações numéricas foram utilizados o modelo de turbulência $k-\varepsilon$, o modelo multifásico VOF na interação água/ar, o software FLOW-3D, (baseado no método dos Volumes Finitos) e a malha possuía

elementos retangulares de tamanho 0,02 m. O estudo transcorreu em duas etapas, primeiramente as simulações numéricas, onde foram registradas as velocidades médias do ar na saída das geometrias, em seguida realizaram as experimentais, para posteriormente realizar as análises e comparação dos resultados. Em conclusão, a geometria mais promissora foi a que possuía ângulo de 40° da placa frontal. Este resultado é válido para as estrutura da CAO clássica e modificada.

Em Rezanejad et al. (2017), foi proposta uma investigação numérica e experimental do desempenho hidrodinâmico de uma CAO, onde um modelo linear 2D é desenvolvido na abordagem numérica a fim de estimar a eficiência do dispositivo. Para tal, foi submetido a um conjunto abrangente de experimentos que foram realizados em condições de ondas regulares e irregulares, a fim de avaliar o nível de precisão do modelo, bem como investigar a influência dos seguintes parâmetros: amortecimento da turbina, o período e a altura de onda. Nas soluções numéricas foi implementado o modelo BIEM (*boundary integral equation method*) para resolver apropriadamente o problema BVP (*boundary value problem*). Na validação do modelo numérico, foram utilizados os resultados obtidos pelos testes experimentais realizados no canal de ondas da Universidade de Santiago de Compostela. Neste estudo foi possível constatar que tanto nos resultados numéricos como nos experimentais o período de onda e o amortecimento da turbina têm influencia significativa no desempenho da CAO, e que o mesmo diminui consideravelmente em altos períodos de ondas.

Em Bouali e Larbi (2017), foi apresentado um procedimento de otimização sequencial e uma previsão do desempenho da CAO, onde foram variados os seguintes parâmetros: PTO (referente à turbina), a geometria e as condições de ondas regulares no estudo numérico. Para as simulações numéricas foi utilizado o software ANSYS CFX, o qual é baseado no método dos volumes finitos, para o tratamento da interação água/ar o modelo multifásico VOF e o modelo de turbulência $k-\epsilon$. A validação do referente trabalho foi feita a partir de duas análises, onde na primeira o amortecimento do PTO foi desconsiderado, e na segunda o mesmo foi considerado e em seguida os valores foram comparados com os resultados disponíveis nos trabalhos desenvolvidos experimentalmente por Liu et al. (2010 e 2011) respectivamente. Após a validação foram realizados testes onde os seguintes parâmetros foram variados: a imersão e a largura da parede frontal, a altura da coluna de ar e a angulação da rampa presente no final do tanque, com relação às ondas regulares empregadas nas análises, foram variados o período, o comprimento, a altura e a profundidade da onda. Neste estudo foi possível constatar que os parâmetros de angulação da rampa e altura da coluna de ar, não influenciaram significativamente nos resultados, e também que o coeficiente de amortecimento teve uma boa concordância nas análises numéricas e experimentais existentes na literatura.

1.1.2. Estudos numéricos com o emprego da metodologia pistão

Dentre vários estudos encontrados na literatura, alguns simularam numericamente o princípio de funcionamento de uma CAO considerando apenas o escoamento do ar no interior do dispositivo, sendo essa metodologia chamada de *piston*. Em Conde e Gato (2008), é apresentado um estudo numérico 3D sobre o escoamento de ar pelo interior de uma CAO equipada com duas chaminés verticais localizadas em sua parte superior. As simulações numéricas foram realizadas no FLUENT, assumindo que as condições do escoamento eram estáveis e periódicas, já as tensões de Reynolds foram calculadas pelo modelo de turbulência $k-\varepsilon$, para os termos difusivos foi empregado o esquema de diferenças centrais de 2ª ordem, os termos convectivos o esquema de terceira ordem QUICK foi utilizado e para o acoplamento pressão velocidade o algoritmo SIMPLEC. Os resíduos foram considerados convergidos para soluções com valores inferiores a 10^{-4} . A geometria deste trabalho é uma simplificação da câmara de ar construída junto ao quebra mar da foz do estuário do Douro (Norte de Portugal), porém a mesma foi estudada a partir de duas configurações, o que as diferencia é a colocação de uma placa retangular com dois semicírculos nas pontas para reduzir os efeitos de pulverização da água nas turbinas. Para a simulação de escoamento periódico, foi imposta uma função senoidal para a componente vertical da velocidade conforme segue:

$$w(t) = 1.77 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (1.1)$$

onde T é o período de onda. Esta função é equivalente à velocidade de deslocamento da superfície livre da água. Foram monitorados os escoamentos de ar para dentro, para fora da CAO e também o periódico a fim de investigar a distribuição de escoamento nas seções de entrada das turbinas, bem como, as propriedades do jato de ar que invade a superfície livre da água. Com isso foi possível concluir que a colocação da placa favorece a funcionalidade das turbinas.

Em Marjani et al. (2008), é feito um estudo completo, visando simular o comportamento do escoamento de ar, nos componentes de um sistema de coluna de água oscilante, com dimensões semelhantes à planta construída na ilha de Pico em Portugal. O objetivo do estudo consiste em elaborar e validar dois modelos, para simular a câmara de ar e a turbina utilizando o código FLUENT, onde em ambos o escoamento é considerado tridimensional, viscoso, transiente e turbulento. Para simular a câmara de ar, a turbulência foi modelada com o modelo $k-\varepsilon$. Com relação às condições de contorno do volume de controle, foi fixado na saída da chaminé como pressão atmosférica, para o movimento oscilante da superfície livre de água, foi empregado nos cálculos numéricos uma velocidade de variação de tempo usando a equação:

$$v(t) = H \left(\frac{2\pi}{T} \right) \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \quad (1.2)$$

onde v é a velocidade, T é o período, t o tempo, H amplitude de altura igual a 0,78 m, e no restante da geometria foi considerado velocidade zero em todas as paredes. Na CAO foi realizado um cálculo de potência em relação ao tempo, diferença de pressão entre a câmara e a chaminé e a obtenção do coeficiente de perda dentro da câmara. Para modelar a turbina, o escoamento foi considerado incompressível, as equações de conservação foram solucionadas na forma segregada, o modelo de turbulência empregado foi o $k-\varepsilon$, para acoplamento pressão velocidade utilizou-se o algoritmo SIMPLEC e para discretização dos termos convectivos foi utilizado o esquema de alta ordem MUSCL. Na turbina foram obtidos os coeficientes de torque e pressão total. De acordo com os autores, os resultados obtidos com os modelos tiveram uma boa precisão ao serem comparados com resultados experimentais.

Em Gomes et al. (2009), é apresentada a modelagem computacional do escoamento de ar em uma CAO usando duas metodologias diferentes: em uma delas é considerada apenas a câmara, variando a velocidade em sua entrada de acordo com a equação da onda, simulando apenas o comportamento do ar, e na outra foi colocado uma câmara em um tanque de ondas, para tal, considera a interação entre água e ar na câmara. O modelo matemático empregado consiste, basicamente, em solucionar as equações de conservação de massa e as de Navier-Stokes. O software utilizado nas simulações é o FLUENT versão 6.2, enquanto para modelar a geometria e gerar a malha foi utilizado o GAMBIT. Neste estudo foi utilizado uma malha independente que contém 37.500 células para CAO e 83.902 para o tanque de ondas. Inicialmente foi reproduzido o problema proposto por Conde e Gato (2008), onde foram monitorados quatro pontos no interior da câmara para serem analisados, e foi constatado que os resultados estavam de acordo, demonstrando a correta utilização da metodologia Ar^2 , bem como sua verificação. A verificação da metodologia VOF foi feita por meio de comparação do resultado numérico com a solução analítica. Com isso um estudo de caso foi proposto, o qual consiste em simular numericamente de forma bidimensional uma CAO empregando ambas as metodologias. Para tal, foi adotado para solucionar o acoplamento pressão velocidade o algoritmo PISO, para discretização da pressão o método PRESTO, para os termos advectivos o esquema *Upwind* de primeira ordem, o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ e para fração volumétrica o *Geo-reconstruct*. Os autores concluíram que, ao comparar os dados obtidos entre as duas metodologias, a metodologia VOF apresentou resultados mais realísticos. Porém, os resultados

² Em Gomes et al. (2009), o autor chama de metodologia *Ar*, o método que neste trabalho recebe o nome de *piston*.

obtidos com a metodologia Ar apresentaram a mesma tendência dos resultados gerados com a metodologia VOF.

Em Bouhrim e Marjani (2015), os autores elaboraram um estado da arte e avaliaram a utilidade da modelagem numérica de uma CAO, a fim de, futuramente, utilizar métodos adequados para otimização de geometrias e também obter a máxima eficiência de uma CAO. Visando modelar e melhorar o desempenho operacional desses dispositivos, alguns métodos de modelagem foram citados, como por exemplo, o modelo 1D (considerado mais simples), o modelo *piston*, que considera o movimento oscilatório da superfície livre da água como um pistão dentro da CAO. Mencionam um modelo 3D, viscoso, transiente que exige a resolução das equações de Navier-Stokes associada ao modelo multifásico VOF. Também, descrevem um modelo usado para simular a geração e propagação de ondas incidentes, pressão do ar e a variação da taxa de escoamento de ar e por fim apresentam um modelo para a formulação de escoamento potencial é usada para simular o comportamento das ondas do mar fora da câmara, e uma formulação de escoamento viscoso é adotada dentro da câmara, tal estudo foi desenvolvido em Zhang et al. (2012). Os autores concluíram que o modelo denominado como *powerful*, foi o estudado por Zhang et al. (2012), entretanto, simulações realizadas com o modelo *piston* na planta PICO, confirmam que este modelo tem boa previsão e que está em desenvolvimento no EMI' Turbomachinery Lab.

Em Barakaz e Marjani (2015), uma análise de escoamento unidirecional com equações simples para descrever o comportamento de uma CAO empregando o modelo *piston*. As análises foram focadas na variação temporal da altura das ondas dentro da CAO, vazão do ar, pressão e potencial pneumático. A turbina foi simulada com uma lei quadrática relativa à queda de pressão no escoamento do ar, tanto nas operações de inalação e exalação, porém apenas a exaustão foi estudada. Nesta análise foram assumidas algumas hipóteses simplificativas, que dão uma visão física do problema, das quais gerou duas equações; uma para o movimento da água, onde mostra a relação entre a altura da onda incidente e a altura da onda dentro da câmara considerando a pressão; a outra para o movimento do ar apresenta a relação entre o escoamento de ar através do duto, a pressão e a altura da água dentro da CAO. Para o estudo da turbina um sistema composto pelas equações deduzidas para os movimentos de água e ar, foi resolvido no software MATLAB com o algoritmo Runge-Kutta de 4ª e 5ª ordem. Com este estudo os autores consideraram que o modelo 1D tem potencial para ser utilizado como uma primeira ferramenta para analisar um dispositivo CAO, mas que precisa ser melhorado em alguns aspectos.

Em Bouhrim e Marjani (2016), foi apresentada uma comparação entre dois modelos numéricos, o primeiro é baseado no estudo do fluxo de ar interno de uma CAO empregando um modelo simplificado chamado de modelo *piston*, e o outro leva em consideração investigar o impacto da interação ar-água no desempenho do dispositivo, considerando um domínio composto pelo CAO acoplado em um tanque de ondas, denominado como modelo *Wave Tank* (WT). No modelo *piston* a superfície da água no interior do dispositivo é considerada como um pistão movendo-se para cima e para baixo devido às sucessivas ondas incidentais do mar, como descrito na Fig. 1.3:

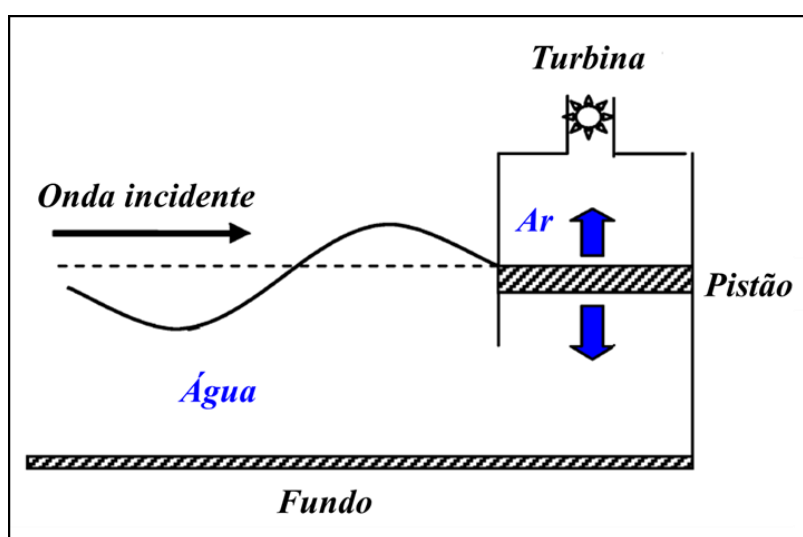


Figura 1.3 – Dispositivo CAO com o modelo *piston* – Adaptada de Bouhrim e Marjani (2016)

Neste caso o fluxo de ar incidente foi numericamente simulado através da solução das equações *Navier-Stokes*, e o escoamento foi considerado incompressível, turbulento solucionado pelo modelo *k-ε*, 2D e transiente.

O modelo WT baseado na metodologia VOF, é constituído por um tanque de ondas com um gerador de ondas do tipo pistão. Neste estudo foi proposto um estudo de caso que consiste em acoplar uma CAO considerando o modelo *piston* em um tanque de ondas com a aplicação metodologia VOF, conforme a Fig. 1.4.

Com isso, foram realizadas comparações da variação da velocidade, da pressão e do potencial pneumático em relação ao tempo entre os dois modelos, considerando uma onda com $H = 0,06$ m e $T = 2$ s. Sobre as variações da velocidade e pressão, pouca diferença foi notada, mas para o potencial pneumático o modelo WT apresentou resultados mais significativos. Os autores destacam a importância de habilitar o método *piston* ao tanque de ondas, visto que obtiveram resultados mais realísticos, porém ressaltam que esta implementação exigiu um grande esforço computacional.

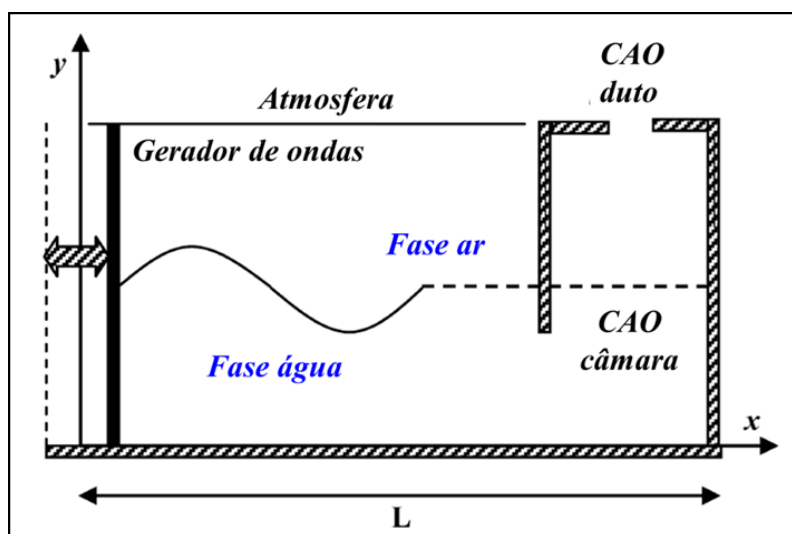


Figura 1.4 – Domínio do caso estudado – Adaptada de Bouhrim e Marjani (2016)

Em Barakaz e Marjani (2016), foi apresentado um modelo 1D para descrever o comportamento de uma CAO, onde se estudaram casos considerando e desconsiderando a turbina. Para propor tal modelo algumas hipóteses simplificativas foram adotadas, como: a movimentação da superfície livre ocorre apenas na vertical, o processo de perda de carga é negligenciado, as ondas incidentes são monocromáticas e a pressão na entrada da CAO depende da presença da turbina, pois na ausência da mesma é considerado isentrópica. O modelo foi estudado fisicamente considerando um pistão oscilante vertical, a massa de água dentro da câmara $M(t)$ sofre a influência de duas forças F_1 e F_2 mais seu peso, como ilustrado na Fig. 1.5.

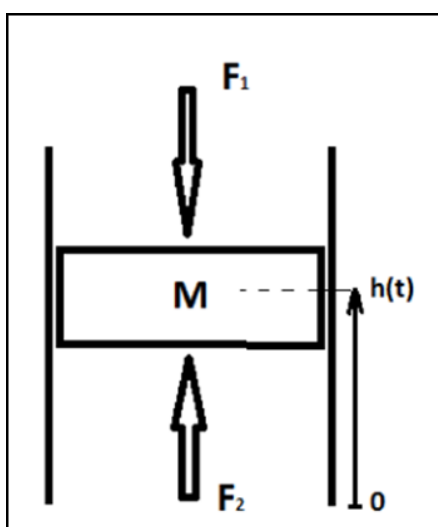


Figura 1.5 – Mecanismo de funcionamento do modelo – Adaptada de Barakaz e Marjani (2016)

O êmbolo em movimento corresponde à massa de água dentro da câmara, F_1 à força aplicada

pela pressão do ar na superfície superior e F_2 à força aplicada pela pressão da água do mar na superfície inferior. Neste trabalho, aplicaram o princípio de *Lagrange* e para resolver as equações o método de *Poincaré-Lindstedt*, o que resultou em uma equação diferencial de segunda ordem com um termo não linear. Os autores garantem que tal modelo é uma boa ferramenta para estudos preliminares de uma CAO.

1.2. Objetivo

Baseado na metodologia pistão que foi utilizada nos estudos desenvolvidos por Conde e Gato (2008), Marjani et al. (2008) e Gomes et al. (2009), o presente estudo tem como objetivo propor um modelo numérico simplificado, bidimensional, capaz de reproduzir o princípio físico de funcionamento de um dispositivo Coluna de Água Oscilante (CAO), adotando como condição de contorno de velocidade prescrita, dados discretos transientes, obtidos a partir de um estado de mar realístico.

1.2.1. Objetivos específicos

- Verificar o modelo, através do estudo desenvolvido por Gomes et al. (2009);
- Apresentar um teste de independência de malha;
- Apresentar um teste de independência de passo de tempo;
- Verificar o modelo através da comparação com uma solução analítica;
- Simular numericamente diversas combinações entre os esquemas de solução disponíveis no software FLUENT para o acoplamento pressão velocidade, discretização da pressão e termos advectivos;
- Propor um estudo de caso, simulando numericamente o princípio de funcionamento da CAO, utilizando a malha independente, com a combinação que apresentou soluções mais coerentes para o acoplamento pressão velocidade, discretização da pressão e termos advectivos, através da inserção dados realísticos de estado de mar como condição de contorno;
- Obter o potencial hidropneumático do conversor, aplicando o modelo proposto neste estudo.

2. ENERGIA DAS ONDAS

2.1. Fontes de energia renovável

Fontes renováveis de energia são aquelas inesgotáveis e encontradas na natureza em grande quantidade ou ainda que possuem a capacidade de regeneração por meios naturais. Podem ser conhecidas como energias alternativas, verdes ou limpas, por não consumirem um recurso finito, causando então menores danos ao meio ambiente. A expectativa mundial é que energias renováveis substituam gradativamente as energias comumente utilizadas, uma vez que, além de reduzir a emissão de gases poluentes, o modelo renovável promove a descentralização da produção (Teske, 2013). Neste sentido, destaca-se então o aproveitamento do recurso característico de cada região (vento, sol, mar) para propor a energia renovável mais adequada. Porém, é importante ressaltar que esta transição pode afetar os ecossistemas e a biodiversidade, visto que não existem vias de energia renováveis que apresentem um impacto ambiental nulo, especialmente se forem utilizadas em grande escala (Gasparatos et al., 2017).

A urgência da implementação das energias renováveis foi tema da 21ª Conferência do Clima da Organização das Nações Unidas, que gerou o documento titulado Acordo de Paris. Nele foram estabelecidas metas ambiciosas para a comunidade mundial a fim de conter o aquecimento global, causado pela emissão de dióxido de carbono (CO_2), resultante do desmatamento e queima de combustíveis fósseis (Revolução Energética, 2016). Para que as metas sejam alcançadas, será necessária a dissociação do atual modelo, o que requer alguns cuidados, pois, conforme mencionado, a implementação de energias renováveis não garante risco zero ao meio ambiente, e um exemplo disto são as plantas de biomassa, que podem emitir dióxido de carbono. Porém, quando se comparados com a queima de combustíveis fósseis, os efeitos da instalação de tecnologias de energias renováveis são pequenos e localizados. Além disto, devem ser cuidadosamente examinados para serem atenuados onde for possível (Pacesila et al., 2016).

Deve-se destacar que das energias renováveis disponíveis até o momento, a energia oceânica e maremotriz apresentam emissões de gases de efeito estufa nulas, impactos moderados em relação à ocupação de solo oceânico e suas áreas de construção não representam interferência à navegação (Teske, 2013).

2.2. A energia das ondas como recurso e seus primeiros indícios

Embora nem sempre associado ao conceito de energia útil (Cruz e Sarmiento, 2004), e ao contrário do que se poderia pensar, a energia das ondas não é nova, visto que foi discutida há

séculos, mas até hoje lhe foi dada pouca importância. Os primeiros indícios de sua utilização foram encontrados na China, no século XIII, onde as ondas já eram usadas para mover os moinhos. No entanto, a primeira patente foi obtida em 1799 por Girard e filho na França (Clement et al., 2002). Em 1910 o francês Praceique Bochaux desenvolveu uma das primeiras aplicações que usam energia das ondas para abastecer sua casa com eletricidade. Ele usou um sistema pneumático, semelhante ao que agora é conhecido como CAO. Além disto, na década de 1960 o oficial da marinha japonesa Yoshio Masuda desenvolveu uma boia de navegação alimentada por energia de ondas, equipada com uma turbina de ar, que foi nomeado como um CAO. Estas boias foram comercializadas em grande número no Japão desde 1965 (depois nos EUA), e foram também os primeiros dispositivos de energia de onda implantados com sucesso no mar. Em 1976, Masuda promoveu a construção de um dispositivo maior, o primeiro conversor de energia das ondas desenvolvido em tamanho real, que foi o Kaimei, uma barcaça que continha 13 CAO acopladas ao seu casco (Falcão, 2010).

Impulsionados pela crise do petróleo na década de 70, alguns países iniciaram estudos a cerca da extração de energia das ondas (López et al. 2013), como foi o caso da Noruega, que em 1985 construiu um protótipo próximo a Bergen. A partir de 1991, ocorreu a construção de duas usinas do tipo CAO em escala real, uma na ilha do Pico, em Portugal e outra na Escócia. Ambos projetos surgiram em decorrência da Europa ter incluído a energia das ondas no seu programa R&D sobre energias renováveis (Falcão, 2010).

A central portuguesa foi construída em 1999 no arquipélago dos Açores por apresentar condições propícias ao aproveitamento da energia das ondas, devido sua localização possui um elevado recurso energético. Outro aspecto positivo é a ausência de uma plataforma continental responsável pela dissipação de energia das ondas por atrito no fundo, característico em ilhas vulcânicas. Com capacidade de gerar 400 kW, sua estrutura engloba a câmara pneumática e locais para instalação do equipamento turbo elétrico, na Fig. 2.1 é possível ter uma visão externa da central. Esse dispositivo também possui uma válvula de alívio, com atuação rápida em caso de aumento da pressão no interior do CAO. Segundo Falcão e Henriques (2016) a mesma encontra-se em operação.



Figura 2.1 – Vista posterior da central CAO de Portugal (Falcão e Henriques, 2016)

A central LIMPET (sigla de *Land Installed Marine Power Energy Transmitter*) ilustrada na Fig. 2.2, foi desenvolvida a partir de protótipo de sucesso de 75 kW que se encontrava instalado na ilha escocesa de Islay. Foi o primeiro dispositivo de conversão de energia das ondas a ser explorado comercialmente no Reino Unido (em operação desde novembro de 2000). Com potência nominal de 500 kW a central pode fornecer eletricidade a cerca de 400 habitações (Cruz e Sarmiento, 2004).



Figura 2.2 – Central CAO da Escócia (Falcão e Henriques, 2016)

Os CAOs implantados até agora na linha costeira podem ser considerados essencialmente protótipos de demonstração e alguns são agora utilizados como infra-estruturas experimentais. Algumas dessas plantas e seus equipamentos sobreviveram por muitos anos (a usina Pico ainda está em operação após 16 anos) e demonstraram a capacidade de sobrevivência de suas tecnologias sob condições muito duras (Falcão e Henriques, 2016).

2.3. Potencial global da energia das ondas

Entre todas as fontes renováveis, a energia das ondas é bastante promissora. Seu potencial global esta estimado em 2 TW, valor este que tem a capacidade para atender a demanda média anual de energia consumida no mundo (Wang et al., 2018). Na Fig. 2.3 é apresentado um mapa da distribuição mundial do potencial das ondas do mar.

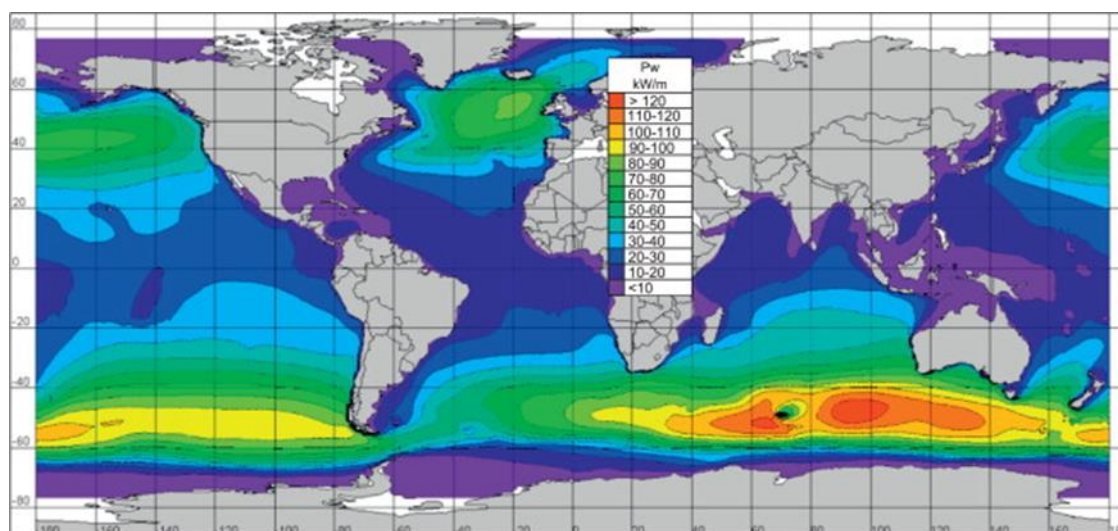


Figura 2.3 – Estimativa global aproximada da energia das ondas (López et al., 2013)

As áreas mais ricas em energia estão situadas próximas aos hemisférios. Mas, se o Hemisfério Norte (HN) e o Hemisfério Sul (HS) forem comparados, o maior potencial de onda anual médio fica localizado no HS (López et al., 2013). Como a Terra é composta por cinco grandes oceanos (Antártico, Ártico, Pacífico, Atlântico e Índico), os quais cobrem cerca de 71% de sua superfície, é possível notar na Fig. 2.3, que existe uma região do Oceano Índico, onde o registro máximo pode ser superior a 120 kW/m. Considerando que apenas os ambientes costeiros atualmente apresentam um interesse real pela extração de energia das ondas, esta categoria pode incluir a parte sul da Austrália e algumas regiões da Europa, onde o potencial das ondas pode atingir valores na faixa de 70-80 kW/m. Além dessas áreas, algumas regiões localizadas nas extremidades do sul da América do Sul ou África também podem ser mencionados, embora atualmente, não haja planos públicos para explorar essa fonte de energia nessas regiões (Rusu e Onea, 2017).

2.3.1 Potencial da energia das ondas no Brasil

Apesar do Brasil não possuir valores energéticos altos em suas ondas oceânicas, a extração de energia elétrica a partir das ondas oceânicas pode ser economicamente viável. Fato este, que ocorre devido a ocorrência de poucos fenômenos naturais, no litoral brasileiro com capacidade de destruir

os equipamentos e as ondas oceânicas possuem certa regularidade (Dantas, 2015).

Uma análise do potencial teórico da energia das ondas ao longo do litoral brasileiro foi realizada por Carvalho (2010), onde foram utilizados dados reais de estado de mar medidos entre os anos de 1997 e 2009 e a partir destes dados são simulados os campos de onda através de um modelo numérico. A pesquisa realizada possui 10 áreas, sendo a primeira correspondente ao litoral da Argentina e Uruguai e as nove demais correspondendo ao litoral brasileiro. A área 2 compreende os litorais do Rio Grande do Sul e do sul de Santa Catarina, a qual apresentou média anual de energia de 15,14 kW/m. A área 3 se estende da região costeira central de Santa Catarina até a região costeira sul do Rio de Janeiro e apresentou média anual de 12,73 kW/m. A área 4 compreende apenas a região costeira central do Rio de Janeiro e apresentou média anual de 13,9 kW/m. A área 5 compreende a região entre o norte do litoral fluminense e o centro-sul do litoral do Espírito Santo, tendo média anual de 13,1 kW/m. A área 6 compreende o centro-norte do litoral do Espírito Santo até a região costeira sul do Estado de Sergipe, e média anual apresentada foi de 9,8 kW/m. A área 7 abrange desde a costa norte de Sergipe até a costa leste do Rio Grande do Norte, apresentando média anual de 12,2 kW/m. A área 8 compreende a costa norte do Rio Grande do Norte até o litoral do Ceará e Piauí, revelando uma média anual de 7,5 kW/m. A área 9 abrange a costa do Maranhão e parte litoral do Pará, apresentando média anual de 8,3 kW/m. Por fim, a área 10 compreende parte da região costeira do Pará até o litoral do Suriname, apresentando média anual de 11,1 kW/m.

Ao analisar os dados obtidos, ficou evidente que o potencial energético da região costeira do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, em se tratando de ondas oceânicas, quando comparado às demais regiões do Brasil, apresenta a melhor média.

2.4 Tecnologias de conversão da energia de ondas em energia elétrica

De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), os dispositivos conversores da energia das ondas do mar em energia elétrica podem ser classificados conforme sua localização de instalação, ou seja, *on-shore* (dispositivos costeiros), *near-shore* (dispositivos próximos da costa instalados entre 8 a 25 m de profundidade) e *off-shore* (dispositivos instalados afastados da costa implementados a mais de 25 m de profundidade). Outra classificação existente se baseia no princípio de funcionamento, o qual, pode ser denominado como coluna de água oscilante, CAO (OWC – *Oscilating Water Column*), corpos flutuantes, podendo ser de absorção pontual (*Point Absorbers*) ou progressivos (*Surging devices*) ou Galgamento (*Overtopping devices*).

Na Fig. 2.4, é possível visualizar as diferentes tecnologias levando em consideração os modos de conversão.

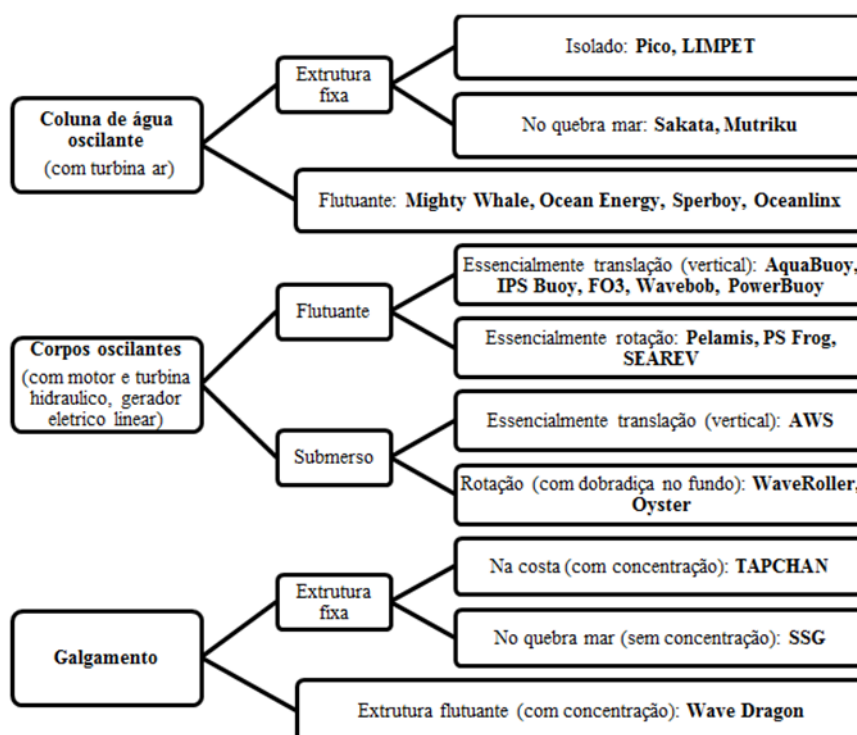


Figura 2.4 – Principais sistemas de conversão de energia das ondas – adaptada de Falcão, 2010

O dispositivo de CAO será mais aprofundado neste trabalho, uma vez que se trata do objeto de estudo. A descrição dos restantes modelos poderá ser analisada em Cruz e Sarmento (2004) e Falcão (2010).

2.5 Coluna de água oscilante (CAO)

Os dispositivos do tipo coluna de água oscilante são uma classe importante de conversores de energia das ondas, possivelmente a classe mais estudada e como maior número de protótipos em escala real implantados no mar (Falcão e Henriques, 2016). Sua forma é, basicamente, uma estrutura oca parcialmente submersa, aberta para o mar abaixo da superfície livre da água. Conforme Cruz e Sarmento (2004), o processo de geração de eletricidade segue duas fases: quando uma onda entra na estrutura o ar que se encontrava dentro dela é forçado a passar por uma turbina, como consequência direta do aumento de pressão na câmara hidropneumática, como ilustra a Fig. 2.5a. E quando a onda regressa ao mar o ar passa novamente na turbina, desta vez no sentido inverso, dada a pressão inferior no interior da câmara hidropneumática, o que pode ser melhor compreendido na Fig. 2.5b. A turbina geralmente indicada para aproveitar estes movimentos opostos é do tipo Wells. Essas turbinas são auto retificadoras, isto é, a sua direção de rotação permanece inalterada independentemente da direção do escoamento do ar. Vários tipos especiais de turbinas foram desenvolvidos, porém, a turbina Wells de fluxo axial, inventada em meados da

década de 1970, é a recomendada (Falcão e Henriques, 2016).

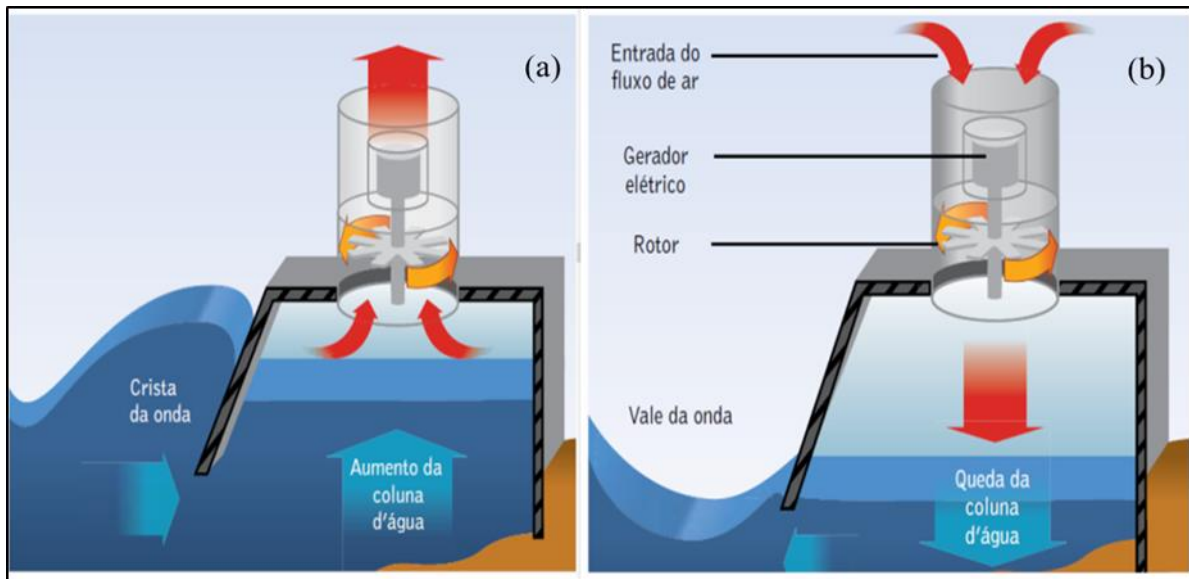


Figura 2.5 – Princípio de funcionamento: a) Movimento do ar quando a onda incide e b) Movimento do ar com o regresso da onda ao mar – Adaptada de Revolução Energética (2013)

A principal vantagem do CAO em relação à maioria dos outros conversores de energia de ondas é a sua simplicidade. Visto que a única parte móvel do mecanismo de conversão de energia é o rotor da turbina, localizada acima do nível da água, que ao rodar a uma velocidade relativamente alta, sua energia gerada é dirigida diretamente a um gerador elétrico convencional (Falcão e Henriques, 2016).

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Mecânica dos fluidos

A mecânica dos fluidos é definida como a ciência que trata do comportamento dos fluidos em repouso ou em movimento e, também, da interação entre fluidos e sólidos ou com outros fluidos nas fronteiras. É amplamente empregada em problemas de engenharia, assim como está presente no cotidiano, desempenhando uma função vital no corpo humano (Çengel e Cimbala, 2007). Para o desenvolvimento de pesquisas nessa área, faz-se necessária a revisão de alguns conceitos, tais como: conservação de massa e conservação da quantidade de movimento que são apresentados a seguir.

3.1.1 Conservação de massa

A massa, assim como a energia, é uma propriedade conservada, e não pode ser criada nem destruída durante um processo. Em sistemas fechados, o princípio da conservação de massa é usado com a exigência de que a massa do sistema permaneça constante durante um processo. Para volumes de controle, a massa pode cruzar suas fronteiras, assim, a quantidade de massa que entra e sai do volume deve ser controlada. Em mecânica dos fluidos, a relação de conservação de massa escrita para um volume de controle diferencial é chamada de equação da continuidade (Çengel e Cimbala, 2007).

Ainda conforme Çengel e Cimbala, (2007), a vazão mássica diferencial que escoar através de um pequeno elemento de área dA_c da seção transversal de um volume de controle é proporcional ao próprio elemento de área, a massa específica do fluido ρ e ao componente da velocidade do escoamento normal à dA_c , indicado por V_n . Dessa forma a vazão mássica na forma diferencial pode ser expressa como:

$$\delta\dot{m} = \rho V_n dA_c \quad (3.1)$$

Visto que δ e d são usados para indicar as quantidades diferenciais. A vazão mássica é obtida através da integração:

$$\dot{m} = \int_{A_c} \delta\dot{m} = \int_{A_c} \rho V_n dA_c \quad (3.2)$$

Admitindo que a massa específica é uniforme ao longo da seção transversal do volume de controle, é possível adotar ρ como constante. A velocidade nunca é uniforme na seção transversal devido à condição de não escorregamento nas paredes, ela varia de zero nas paredes até um valor

máximo no centro do tubo. A velocidade média $V_{méd}$ pode ser expressa como:

$$V_{méd} = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} V_n dA_c \quad (3.3)$$

Para um escoamento incompressível ou mesmo compressível onde ρ seja uniforme ao longo de A_c , tem-se:

$$\dot{m} = \rho V_{méd} dA_c \quad (3.4)$$

Durante um processo de escoamento em regime permanente, a quantidade total de massa contida no volume de controle não se altera com o tempo, sendo assim, a quantidade total de massa que entra no volume de controle é igual à quantidade total de massa que sai dele. Isso pode ser expresso da seguinte forma:

$$\sum_e \dot{m} = \sum_s \dot{m} \quad (3.5)$$

Em volumes de controle que possuem apenas uma entrada e uma saída a Eq. (3.5) pode ser reescrita como:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (3.6)$$

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (3.7)$$

Para regimes permanentes com escoamento incompressível a massa específica é uniforme, resultando em uma equação da continuidade simplificada:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (3.8)$$

3.1.2 Conservação de energia térmica e mecânica

A energia mecânica pode ser definida como a forma de energia que pode ser convertida direta e completamente em trabalho mecânico por um dispositivo mecânico ideal (Çengel e Cimbala, 2007).

A energia mecânica de um fluido em escoamento pode ser expressa, por unidade de massa, como:

$$e_{mec} = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \quad (3.9)$$

onde P é a pressão do fluido, g é a aceleração da gravidade, z é a altura do ponto considerado e V a

velocidade do fluido. Na equação o termo P/ρ é a energia do escoamento, $V^2/2$ é a energia cinética específica e gz é a energia potencial, todas por unidade de massa. A variação de energia mecânica durante escoamentos incompressíveis torna-se:

$$\Delta e_{mec} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V^2 - V^1}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (3.10)$$

De acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, também conhecida como o princípio da conservação de energia, a energia não pode ser criada nem destruída durante um processo, ela pode apenas mudar de forma. Sendo assim, todas as partes da energia devem ser levadas em conta durante um processo.

Supondo um sistema fechado genérico, o balanço de energia pode ser definido como:

$$\dot{Q} + \dot{W} = \frac{dE}{dt} \quad (3.11)$$

onde \dot{Q} é o calor transferido para o sistema ou para vizinhança, \dot{W} é o trabalho que entra ou sai do sistema e o termo diferencial expressa a variação de energia no sistema.

A análise de energia de um escoamento em regime permanente por unidade de massa, onde envolvem dispositivos que possuem apenas uma entrada e uma saída, pode ser realizada por:

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m} \left(h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) \quad (3.12)$$

Se dividir a Eq. (3.12), pela vazão mássica (\dot{m}), tem-se:

$$q + w = h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (3.13)$$

onde $q = \dot{Q}/\dot{m}$ é a transferência total de calor para o fluido por unidade de massa e $w = \dot{W}/\dot{m}$ é a entrada total de trabalho para o fluido por unidade de massa. Usando a definição da entalpia:

$$h = u + \frac{P}{\rho} \quad (3.14)$$

em que u é a energia interna, P/ρ é a energia do escoamento e reorganizando a Eq. (3.13), para regime permanente, a equação da energia pode ser expressa como:

$$w + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + (u_2 - u_1 - q) \quad (3.15)$$

Se o escoamento for ideal, ou seja, sem nenhuma irreversibilidade tal como o atrito, a energia mecânica total deve ser conservada, então para que não haja nenhuma perda mecânica:

$$q = u_2 - u_1 \quad (3.16)$$

Qualquer aumento da diferença das entalpias acima de q se deve à conversão irreversível de energia mecânica em energia térmica, portanto, $(u_2 - u_1 - q)$ representa a perda de energia mecânica. Ao se considerar as perdas que ocorrem durante o escoamento do fluido, a equação da energia pode ser expressa em sua forma mais comum em termos de carga como sendo:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + H \quad (3.17)$$

onde H representa a perda de carga total durante o escoamento em determinado trecho. O lado esquerdo da Eq. (3.17) representa a entrada de energia mecânica, enquanto os três primeiros termos do lado direito representam a saída (Çengel e Cimbala, 2007)

Perda de carga

Brunetti (2008) define perda de carga (H_T) como sendo a energia perdida pela unidade de peso do fluido quando este escoar, ou seja, a existência de atrito no escoamento do fluido provoca dissipação de energia. Se for examinado o comportamento do escoamento de fluidos em condutos, será possível distinguir dois tipos de perda de carga.

O primeiro tipo, chamado de perda de carga distribuída (h_l). Tal perda acontece devido ao atrito das próprias partículas do fluido entre si. Nesta situação, a perda só será considerável se houver trechos relativamente longos, pois o atrito acontecerá de forma distribuída. O segundo tipo, corresponde à perda de carga localizada (h_{lm}), a qual ocorre em locais onde o fluido sofre perturbações bruscas no seu escoamento.

Mais adiante, será observado que o cálculo dessas perdas será efetuado de formas diferentes, já que, a primeira, depende do comprimento do conduto e a outra, está condicionada à existência de estreitamentos bruscos, curvas, válvulas, entre outros obstáculos no conduto. Em Fox e McDonald (2001), a perda de carga é considerada como a soma das perdas distribuída e localizada:

$$H_T = h_l + h_{lm} \quad (3.18)$$

Para a determinação da perda de carga é indispensável classificar o escoamento em laminar ou turbulento. De acordo com Çengel e Cimbala (2007), um escoamento em regime laminar é caracterizado por linhas de corrente suaves e movimento altamente ordenados enquanto que o escoamento em regime turbulento é caracterizado por flutuações de velocidade e movimento altamente irregular. Há também, um escoamento de transição do regime laminar para o turbulento.

A transição do escoamento laminar para o turbulento depende da geometria, da rugosidade da superfície, da velocidade de escoamento, da temperatura da superfície e do tipo do fluido, entre outros. Porém, o regime de escoamento depende principalmente da relação entre as forças inerciais e as forças viscosas do fluido, relação esta, chamada de número de Reynolds e expressa para o escoamento interno em um tubo circular:

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.19)$$

onde Re é o número de Reynolds, V é a velocidade média do fluido, D é o diâmetro da geometria e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

O número de Reynolds no qual o escoamento se torna turbulento é chamado de número de Reynolds crítico. Esse valor é diferente para geometrias e condições de escoamento diferentes. Na maioria das condições práticas, o escoamento de um tubo circular é laminar para valores de $\text{Re} \leq 2300$, turbulento para $\text{Re} \geq 4000$ e de transição entre esses valores.

Perda de carga distribuída

Segundo Fox e McDonald (2001), a perda de carga distribuída representa a energia mecânica convertida em energia térmica por efeitos de atrito, sendo assim, a perda de carga distribuída é independente da orientação do tubo. No escoamento laminar, a queda de pressão resultante da perda de carga pode ser calculada analiticamente para um escoamento completamente desenvolvido em um tubo horizontal, através da equação:

$$h_l = \frac{64}{\text{Re}} \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (3.20)$$

onde h_l é a perda de carga distribuída e L é o comprimento do trecho em que está ocorrendo o escoamento.

Enquanto no escoamento turbulento não há como avaliar a queda de pressão analiticamente, portanto deve-se recorrer a dados experimentais e utilizar a análise dimensional para correlacioná-los.

Para determinar a perda de carga distribuída em um escoamento completamente desenvolvido sob condições conhecidas, o número de Reynolds é o primeiro parâmetro a ser avaliado, para determinar se o escoamento está em regime laminar ou turbulento. Enquanto a rugosidade relativa da parede o segundo parâmetro avaliado e, juntamente com o diâmetro da seção transversal, determina-se o fator de atrito. O fator de atrito é comumente lido no diagrama de *Moody*, diagrama que leva o mesmo nome de seu criador. Os dados contidos nele foram determinados experimentalmente e podem ser consultados na Fig. 3.1.

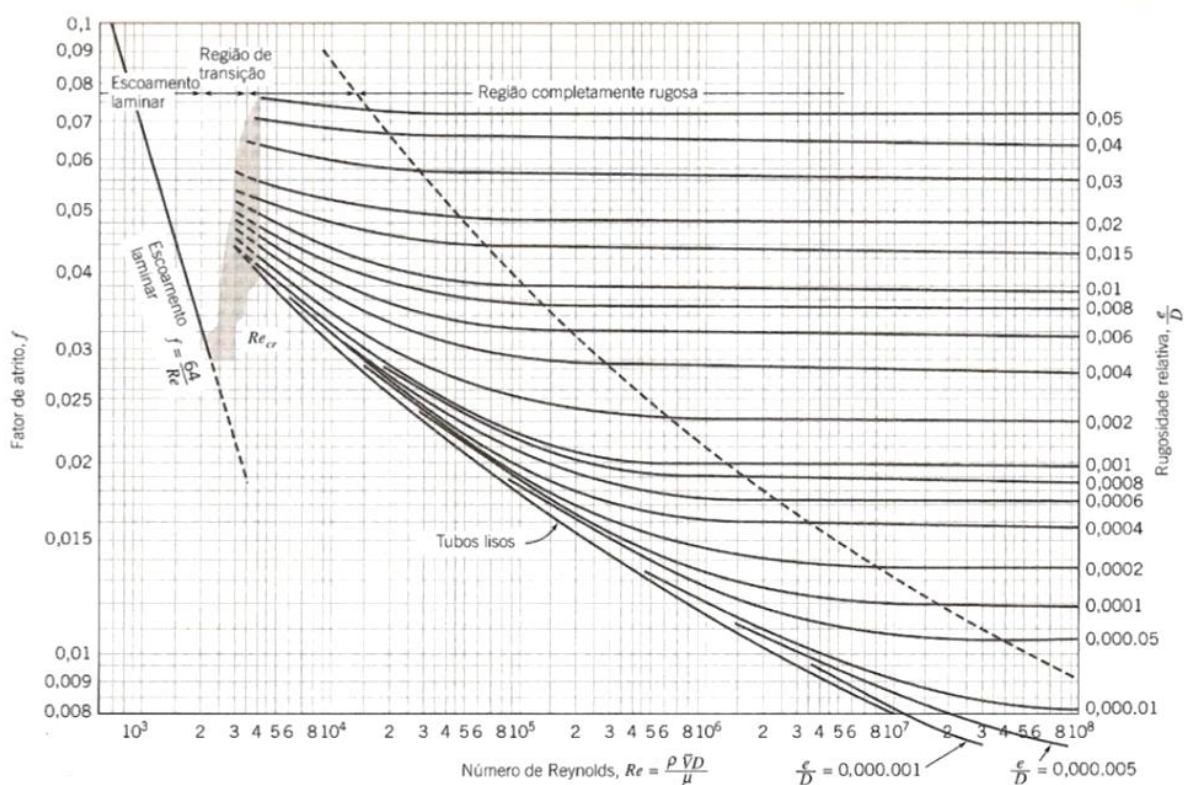


Figura 3.1 – Diagrama de *Moody* – adaptado de (Fox e McDonald, 2001)

Finalmente a perda de carga distribuída para escoamentos em regime turbulento pode ser obtida pela equação a seguir, onde f é o fator de atrito:

$$h_l = f \frac{L \bar{V}^2}{D 2} \quad (3.21)$$

Perda de carga localizada

O escoamento em uma tubulação, conforme Fox e McDonald (2001), pode exigir a passagem do fluido por uma variedade de componentes adicionais como acessórios, curvas ou mudanças súbitas de área. As perdas de carga localizadas são encontradas, sobretudo, como resultado da

separação do escoamento ocasionando dissipação de energia decorrente da mistura violenta nesses componentes. Essas perdas serão relativamente menores se o sistema incluir longos trechos de seção constante. A seguinte equação é uma forma de expressar essas perdas:

$$h_{lm} = k \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (3.22)$$

onde k é o coeficiente de perda, e pode ser determinado experimentalmente para cada situação.

O coeficiente de perda é expresso em tabelas de várias bibliografias, sendo determinado para entradas e saídas do escoamento, para expansões e contrações dentro do escoamento, para curvas existentes nas tubulações e para válvulas e acessórios instalados. No presente trabalho, são de interesse os coeficientes de perda decorrentes de expansões e contrações, sendo os mesmos são apresentados na Fig. 3.2.

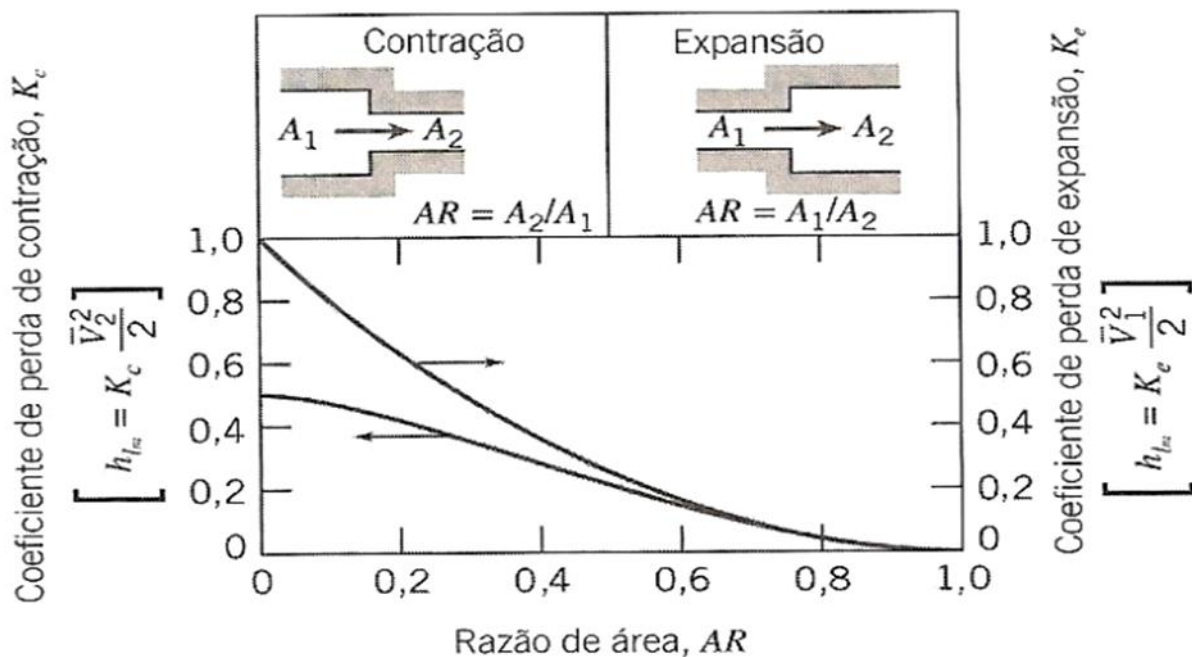


Figura 3.2 – Coeficientes de perda para escoamentos através de mudanças súbitas – adaptado de (Fox e McDonald, 2001)

3.2 Potência e energia

No estudo de dispositivos que geram ou consomem alguma forma de energia, a potência é um dos principais fatores a serem avaliados, pois a partir dela é possível julgar o quão bem um dispositivo pode funcionar, assim como calcular sua eficiência e avaliar sua viabilidade de utilização. Existem várias formas de realizar o cálculo da potência, devido a sua dependência das variáveis que norteiam o problema. Entre essas variáveis, uma das principais é o tipo de energia que

está sendo transformada, podendo ser mecânica, hidráulica, pneumática, hidropneumática, elétrica, etc. No objeto de estudo avaliado nesta, a potência diz-se hidropneumática por depender diretamente do escoamento de ar regido pelo movimento da água dentro da câmara do dispositivo.

Em Porto (2006) e Baptista e Coelho (2010) a potência hidropneumática é denominada potência hidráulica e definida como:

$$P_{HID} = \gamma Q H \quad (3.23)$$

onde P_{HID} é a potencia hidráulica, γ é o peso específico do fluido em escoamento, Q é a vazão volumétrica do fluido e H_e é a carga ou energia de que o fluido dispõe, onde essa energia pode ser equacionada por:

$$H_e = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g} \quad (3.24)$$

o peso específico do fluido pode ser reescrito como o produto da massa específica pela aceleração da gravidade, como:

$$\gamma = \rho g \quad (3.25)$$

com isso, a Eq. (3.23) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$P_{HID} = \rho g Q \left(\frac{p}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g} \right) \quad (3.26)$$

A vazão volumétrica pode ser obtida por meio da razão entre a vazão mássica e a massa específica do fluido,:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (3.27)$$

então, substituindo a Eq. (3.27) na Eq. (3.26):

$$P_{HID} = \frac{\dot{m}}{\rho} \left(p + \rho g z + \frac{\rho V^2}{2} \right) \quad (3.28)$$

É de suma importância entender a diferença entre pressão estática, dinâmica e total para utilizar a Eq. (3.28), para isso é necessária avaliar cada termo de pressão dessa equação. De acordo com Munson et al. (2004), o termo p da Eq. (3.28) é a pressão termodinâmica no fluido que escoar. Para medi-la é necessário mover-se solidariamente ao fluido, ou seja, de um modo estático em relação ao fluido e por esse motivo essa pressão é denominada pressão estática. Uma forma de calcular a

pressão estática em um determinado ponto é multiplicar a altura (h) desse ponto à superfície livre do fluido pelo peso específico:

$$p = \rho gh \quad (3.29)$$

O termo ρgz da Eq. (3.28) é a pressão hidrostática. De acordo com Munson et al. (2004) este termo não é realmente uma pressão, mas representa a mudança possível na pressão devida à variação de energia potencial do fluido como resultado na alteração de elevação. O termo $\rho V^2/2$ é denominado pressão dinâmica e, geralmente, constitui a maior parcela de pressão no escoamento.

Ainda em Munson et al. (2004), a pressão total pode ser definida como sendo a soma dos três termos mencionados anteriormente, dessa forma ela pode ser representada por:

$$p_{total} = p + \rho gz + \frac{\rho V^2}{2} \quad (3.30)$$

Assim, a Eq. (3.28) pode então ser reescrita da seguinte maneira:

$$p_{HID} = \frac{\dot{m}}{\rho} (p_{total}) \quad (3.31)$$

É importante salientar que o software ANSYS FLUENT 14.0, utilizado nas simulações desta pesquisa, também não considera o termo ρgz da Eq. (3.28) como sendo uma pressão, visto que esse termo é denominado pelo software como sendo *hydrostatic head*, ou carga hidrostática em português (ANSYS FLUENT 14.0, User Guide).

Há certa confusão com este termo nas simulações utilizando o software ANSYS FLUENT pois não há uma forma direta de observá-lo nas simulações e, tampouco, monitorá-lo isoladamente. Para o caso aqui estudado, onde o escoamento é considerado incompressível, a massa específica constante e a velocidade de escoamento como condição de entrada na fronteira do domínio, a pressão total na verdade é aproximada como uma pressão de estagnação, sendo obtida da soma da pressão estática com a pressão dinâmica. Neste caso, a Eq. (3.31) pode ser reescrita tomando a forma utilizada por Dizadji e Sajadina (2011), Oliveira et al. (2012) e Gomes (2014):

$$p_{HID} = \left(P_{ar} + \frac{\rho_{ar} v_{ar}^2}{2} \right) \frac{\dot{m}}{\rho_{ar}} \quad (3.32)$$

Deve-se ter cuidado ao aplicar a Eq. (3.32) nos dados obtidos das simulações numéricas, visto que não há interesse em avaliar valores instantâneos ou pontuais e, sim, médios. Para o cálculo de valores médios é utilizada a média RMS (*Root Mean Square*) que é indicada para dados que

oscilam entre valores positivos e negativos, como é o caso de problemas transiente. A média RMS pode ser obtida através da Eq. (3.33), indicada por Marjani et al. (2006):

$$X = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (3.33)$$

Outro parâmetro importante a ser avaliado é a energia absorvida pelo dispositivo CAO. A partir deste parâmetro, que se refere a fase primária de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica (cabe destacar que a potência hidropneumática não é a potencia final disponível para a rede elétrica), é possível determinar quantas residências podem ser abastecidas por um dispositivo, por exemplo. Para isso, basta comparar o consumo de energia residencial com a energia absorvida pelo dispositivo.

Assim como a potência, existem inúmeras formas de calcular a energia gerada por um dispositivo e isso é devido ao fato de existirem diversas formas de energia. Nesta pesquisa o foco é energia elétrica que pode ser gerada pelo dispositivo CAO.

Uma vez que a potência elétrica informa a quantidade de energia que pode ser consumida ou gerada por unidade de tempo, para calcular a energia é necessário saber durante quanto tempo o dispositivo esteve em funcionamento e sua potência. Para isso, Johnson (1994) e Edminister (1991) definem energia como sendo o produto da potência pelo tempo:

$$E_{CAO} = \int_{t_2}^{t_1} Pot(t) dt \quad (3.34)$$

onde E_{CAO} é a energia absorvida pelo dispositivo CAO, t_1 e t_2 indicam o intervalo de tempo de funcionamento do dispositivo e Pot é a potência instantânea na chaminé do dispositivo. Vale ressaltar que, em se tratando de um dispositivo do tipo CAO, os dados gerados instantaneamente são decorrentes das ondas incidentes no dispositivo. Para as ondas marítimas, o intervalo de tempo que cada crista de onda leva para passar por determinado ponto é chamado período da onda, nesse caso a Eq. (3.34) pode ser reescrita como:

$$E_{CAO} = \int_0^T Pot(t) dt \quad (3.35)$$

Já foi definida anteriormente a potência em um dispositivo CAO como o produto da pressão total pela vazão volumétrica, portanto, se forem substituídas as Eqs. (3.27) e (3.31) na Eq. (3.35), é obtida a seguinte expressão:

$$E_{CAO} = \int_0^T P_{total}(t) q(t) dt \quad (3.36)$$

onde p_{total} é a pressão total instantânea e $q(t)$ é a vazão volumétrica instantânea do dispositivo. Essa equação é similar à utilizada em trabalhos como Perdigão e Sarmiento (2003), Zang et al. (2012) e Gomes (2014).

4. MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem computacional é a área que trata da simulação de soluções para problemas científicos, analisando fenômenos e desenvolvendo modelos matemáticos para sua descrição. Em Fortuna (2000), a modelagem compreende em determinar quais grandezas físicas (temperatura, pressão, densidade, etc.) atuam sobre o problema e como o afetam. Outro fato importante é a aplicação de princípios físicos adequados, tais como, conservação de massa, energia e quantidade de movimento.

4.1 Dinâmica de fluidos computacional (CFD)

A dinâmica de fluidos computacional (do inglês *Computational Fluid Dynamics* ou CFD) é a análise de sistemas envolvendo escoamento de fluido, transferência de calor e fenômenos associados, tais como reações químicas, por meio de simulação computadorizada (Versteeg e Malalasekera, 2007). Também, é considerada como uma área do conhecimento, que complementa as análises teóricas e as técnicas experimentais da mecânica dos fluidos. Visto que análises teóricas nem sempre são capazes de descrever certos fenômenos adequadamente e métodos experimentais nem sempre são possíveis de serem realizados (Fortuna, 2000).

Segundo Fortuna (2000) e Çengel e Cimbala (2007), o procedimento de solução pode ser obtido seguindo as etapas a seguir, porém, não necessita obedecer essa ordem. Inicialmente obtém-se o domínio computacional (região do espaço na qual as equações são resolvidas pela CFD), para a geração da malha (o domínio é discretizado). Um fato sobre a malha que deve ser mencionado é com relação a sua qualidade, uma vez que a qualidade da malha interfere diretamente na qualidade dos resultados. Os próximos passos são: a definição das condições de contorno, a especificação do tipo (água, ar, etc.) e das propriedades do fluido (temperatura, densidade, etc.), a seleção dos parâmetros e algoritmos de solução e a inserção dos valores iniciais para as variáveis. A partir disto, as equações discretizadas passam a ser resolvidas iterativamente e, às vezes, para chegar a uma solução final convergente são necessárias milhares de iterações. Ao obter a convergência, as variáveis devem ser representadas e analisadas graficamente. E, por fim, se faz a verificação e/ou validação, procedimentos que conferem credibilidade ao modelo numérico ou demonstra a acurácia da equação diferencial parcial (Versteeg e Malalasekera, 2007).

4.1.1 Domínio computacional

Para representar o princípio de funcionamento do dispositivo CAO, foi gerada uma geometria bidimensional, no software GAMBIT, com as mesmas características do domínio utilizado em

Gomes et al. (2009), que empregou a metodologia ar em seu estudo.

4.1.2 Condições de contorno

Para simular o escoamento do ar no interior da CAO, foi implementado um arquivo através da ferramenta *Table data* no software ANSYS FLUENT 14.0, o qual contém dados discretos de tempo e velocidade, para representar a variação de velocidade na entrada da CAO. Esta condição no software é denominada de *velocity inlet*, e indica a imposição de uma velocidade prescrita.

As demais condições de contorno consistem em pressão atmosférica (*pressure outlet*) na saída da chaminé e condições de não deslizamento e impermeabilidade para as paredes do dispositivo CAO (*wall*). Na Fig. 4.1, apresenta-se das condições de contorno do domínio.

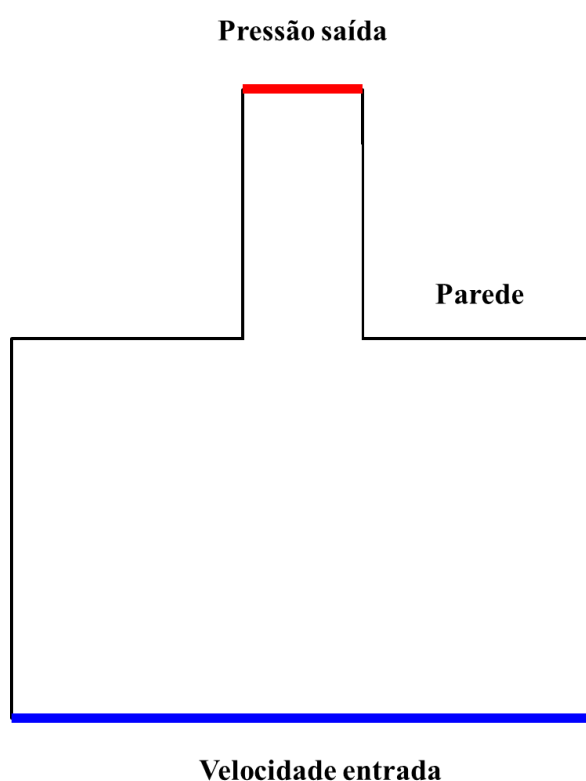


Figura 4.1 – Representação esquemática das condições de contorno

Ferramenta Table data

A ferramenta *Table data* empregada neste trabalho, corresponde a uma opção disponível no software ANSYS FLUENT, presente no menu *Define*, dentro da seção correspondente às *Boundary Conditions*, opção *Profiles*. Essa ferramenta oferece um mecanismo de entrada de dados. Esse recurso permite a utilização, por exemplo, de dados experimentais, dados analíticos ou dados calculados por um programa externo. Um modelo da estruturação deste arquivo, está disponível no

Apêndice 1 (ANSYS FLUENT 12.0, User Guide).

4.1.3 Geração da malha

Conforme mencionado, a qualidade da malha influi nos resultados, por isso, Çengel e Cimbala (2007) define essa etapa como a mais importante. Visto que, para obter uma solução em CFD, é durante a geração da malha que são definidas as variáveis a serem calculadas (velocidade, pressão, etc.) nas células em todo o domínio. Fortuna (2000), informa que quanto maior for o número de elementos da malha, mais confiável será o resultado obtido, porém, isto implica em um esforço computacional maior. Sugere-se, que o usuário de CFD busque uma solução numérica independente da malha, ou seja, uma solução que não se altere, dentro de algum critério de tolerância, quando se refina a malha.

4.2 Simulação numérica

Neste tópico serão apresentados alguns detalhes sobre os algoritmos de solução disponíveis no ANSYS FLUENT 14.0. Neste software são definidos os modelos físicos, condições de contorno, propriedades dos materiais, método do sistema de equações e, também, pode ser realizada a etapa de pós-processamento.

4.2.1 Modelo de turbulência

Para Çengel e Cimbala (2007), o escoamento turbulento é caracterizado pelo movimento altamente irregular e pelas flutuações instantâneas da velocidade e outros escalares. Como consequência dessas flutuações, o escoamento turbulento em um fluido contribui muito no transporte de massa, calor e quantidade de movimento. Estudos envolvendo escoamentos em estado turbulento são extremamente complicados justamente devido a essas flutuações características do escoamento. Nesse contexto, o desenvolvimento de novos modelos de turbulência é de extrema importância do ponto de vista físico, matemático e numérico, por visarem maior simplificação na análise dos efeitos da turbulência.

Dentre os modelos de turbulência disponibilizados pelo ANSYS FLUENT 14.0, está o modelo $k-\epsilon$ padrão, utilizado nessa pesquisa.

Modelo $k-\epsilon$ padrão

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), em camadas de cisalhamento finas e bidimensionais, mudanças na direção do fluxo são sempre tão lentas que a turbulência pode ajustar-se às condições locais. Nos escoamentos onde a convecção e a difusão causam diferenças significativas entre a criação e a destruição da turbulência, e nas recirculações, uma prescrição

algébrica compacta para o comprimento da mistura não é mais viável. Então, o caminho a seguir é considerar declarações sobre a dinâmica da turbulência. O modelo $k-\varepsilon$ enfoca nos mecanismos que afetam a energia cinética turbulenta, onde k é a energia cinética da turbulência e ε a dissipação da energia cinética da turbulência.

É possível desenvolver equações de transporte semelhantes para todas as demais quantidades de turbulência, incluindo ε . A equação exata de ε , no entanto, contém muitos termos desconhecidos e incomuns. O modelo $k-\varepsilon$ padrão possui duas equações modelo, uma para k e outra para ε , com base na melhor compreensão dos processos relevantes que causam mudanças nessas variáveis.

São usados k e ε para definir a escala de velocidade \mathcal{G} e a escala de comprimento ℓ representativa da turbulência em grande escala da seguinte maneira:

$$\mathcal{G} = k^{1/2} \quad (4.2)$$

$$\ell = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (4.3)$$

Aplicando análise dimensional, é possível especificar a viscosidade de turbulência da seguinte forma:

$$\mu_t = C_\mu \rho \mathcal{G} \ell = \rho C_\mu \frac{k^2}{2} \quad (4.4)$$

onde C_μ é uma constante adimensional.

O modelo $k-\varepsilon$ padrão usa as seguintes equações de transporte para k e ε , respectivamente:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t s_{ij} \cdot s_{ij} - \rho \varepsilon \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t s_{ij} \cdot s_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.6)$$

As equações contém cinco constantes, que possuem os seguintes valores apropriados para escoamentos isotrópicos: $C_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,00$, $\sigma_\varepsilon = 1,30$, $C_{1\varepsilon} = 1,44$ e $C_{2\varepsilon} = 1,92$.

Cabe salientar que os parâmetros que não foram mencionados, atuaram nas simulações realizadas nesta pesquisa conforme a configuração padrão do software, como por exemplo a função

de parede, que pode ser visualizada na Fig. A5 do apêndice 2 desta dissertação.

4.2.2 Acoplamento pressão velocidade

A solução segregada das equações de conservação da quantidade de movimento e massa gera o problema do acoplamento pressão-velocidade. Pensando nisso, vários algoritmos foram desenvolvidos para eliminar esse problema. O software ANSYS FLUENT 14.0 apresenta alguns deles, os mesmos são descritos a seguir.

Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE)

O esquema padrão do ANSYS FLUENT 14.0 é considerado por Maliska (2004) robusto, e tem como uma das vantagens, o fato de não ser necessária a solução de um sistema linear para determinar a pressão. Entretanto sua convergência é lenta. Uma análise das dificuldades de convergência do método SIMPLE pode ser encontrada em Raithby e Schneider (1979).

SIMPLE – Consistente (SIMPLEC)

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), este algoritmo segue os mesmos passos que o algoritmo SIMPLE, com a diferença que as equações de quantidade de movimento são manipuladas para que o SIMPLEC omita termos menos significativos que estão presentes no algoritmo SIMPLE. Uma descrição sobre este método pode ser encontrada em Maliska (2004).

Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO)

Altamente recomendado para todos os cálculos de escoamento transiente, especialmente quando se deseja usar um grande passo de tempo (ANSYS FLUENT 14.0, User Guide). Para melhorar seus cálculos, o algoritmo realiza duas correções: correção de vizinhança e correção *skewness*, que de acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), esse procedimento requer armazenamento adicional e um aumento no esforço computacional, porém o método é eficiente e rápido, visto que os autores relatam que o PISO foi aplicado em um problema e apresentou uma redução de tempo, por um fator de 2 em comparação com o SIMPLE. Em Junior (2018) é apresentado os passos de funcionalidade deste método.

Coupled

O solucionador baseado em pressão permite resolver um problema de fluxo de forma segregada ou acoplada. O uso da abordagem acoplada, ou *Coupled* em inglês, oferece algumas vantagens em relação à abordagem não acoplada ou segregada. O esquema acoplado obtém uma implementação de fase única, robusta e eficiente para escoamentos de estado estacionário, com

desempenho superior em comparação aos esquemas de soluções segregadas. Este algoritmo acoplado à pressão oferece uma alternativa ao algoritmo segregado baseado na massa específica e à pressão com acoplamento pressão-velocidade do tipo SIMPLE. Para escoamentos transientes, é necessário o uso do algoritmo acoplado quando a qualidade da malha é fraca ou quando utilizados grandes passos de tempo (ANSYS FLUENT 14.0, User Guide).

4.2.3 Discretização da pressão

O ANSYS FLUENT 14.0 usa uma técnica baseada no volume de controle para converter as equações governantes (EDP) em equações algébricas, que podem ser resolvidas numericamente. Esta técnica consiste em integrar as equações que governam sobre cada volume de controle, resultando em equações discretas (GOMES, 2010). Ainda, é possível a escolha de diferentes, como *upwind* de primeira e segunda ordem, *power law* e *QUICK* (ANSYS FLUENT 6.3, User Guide). Neste texto será mencionado apenas o esquema *upwind* de primeira ordem, pois o mesmo será empregado na solução dos termos advectivos.

PRESTO

O padrão do ANSYS FLUENT 14.0, interpola os valores da pressão nas faces usando coeficientes da equação da quantidade de movimento. Quando há grandes gradientes nos termos fonte entre os volumes, o perfil da pressão tem um gradiente elevado na face da célula, e não pode ser interpolado usando este esquema. *PREssure STaggering Option* (PRESTO) usa o balanço discreto de continuidade para um volume de controle "escalonado" sobre a face para calcular a pressão "escalonada" ou seja, a face (ANSYS FLUENT 6.3, User Guide). Este procedimento é semelhante aos esquemas de grade escalonada usado com malhas estruturadas (Patankar, 1980).

4.2.4 Solução dos termos advectivos

Esquema upwind de primeira ordem

É uma função de interpolação, que produz soluções fisicamente coerentes, e tem a propriedade de suavizar altos gradientes, por ser dissipativo. Maliska (2004) diz que, para evitar o surgimento de coeficiente negativo, lança-se mão deste método. Visto que a presença de coeficientes negativos traz, de imediato, duas dificuldades. A primeira, refere-se ao método iterativo utilizado para solucionar o sistema linear, que se não for robusto, a solução poderá divergir. A segunda interfere na ordem de aproximação da função de interpolação, pois quando de alta ordem, gera instabilidades, produzindo soluções que apresentam oscilações numéricas em regiões de grandes gradientes.

5. MODELO E METODOLOGIA NUMÉRICA

O modelo neste estudo proposto, para simular numericamente o princípio de funcionamento do dispositivo CAO, é uma abordagem simplificada do fenômeno físico, que utiliza a metodologia *piston*, que foi empregada nos estudos desenvolvidos por Conde e Gato (2008), Marjani et al. (2008) e Gomes et al. (2009). Nesse modelo, a incidência das ondas sobre o conversor não será levada em conta. Somente o conversor CAO e o escoamento de ar em seu interior serão considerados. Para isso, a variação da velocidade do escoamento de ar na entrada da câmara hidropneumática é imposta ao modelo como condição de contorno de velocidade prescrita, através da utilização da ferramenta *Table data*, presente no software ANSYS FLUENT 14.0.

Esse modelo computacional se baseia no fato das ondas, ao incidirem no conversor CAO, causam no interior da câmara hidropneumática uma variação na elevação da superfície livre da água. Essa variação de altura da superfície livre da coluna de água dentro do dispositivo pode ser considerada como um pistão que pressuriza e despressuriza o ar. Logo, é possível representar esse movimento de pistão aplicando como condição de contorno uma variação da velocidade do ar na entrada da câmara hidropneumática do conversor CAO. Sendo assim, no interior do domínio computacional bidimensional mostrado na Fig. 5.1a, um escoamento isotérmico e incompressível de ar será numericamente simulado.

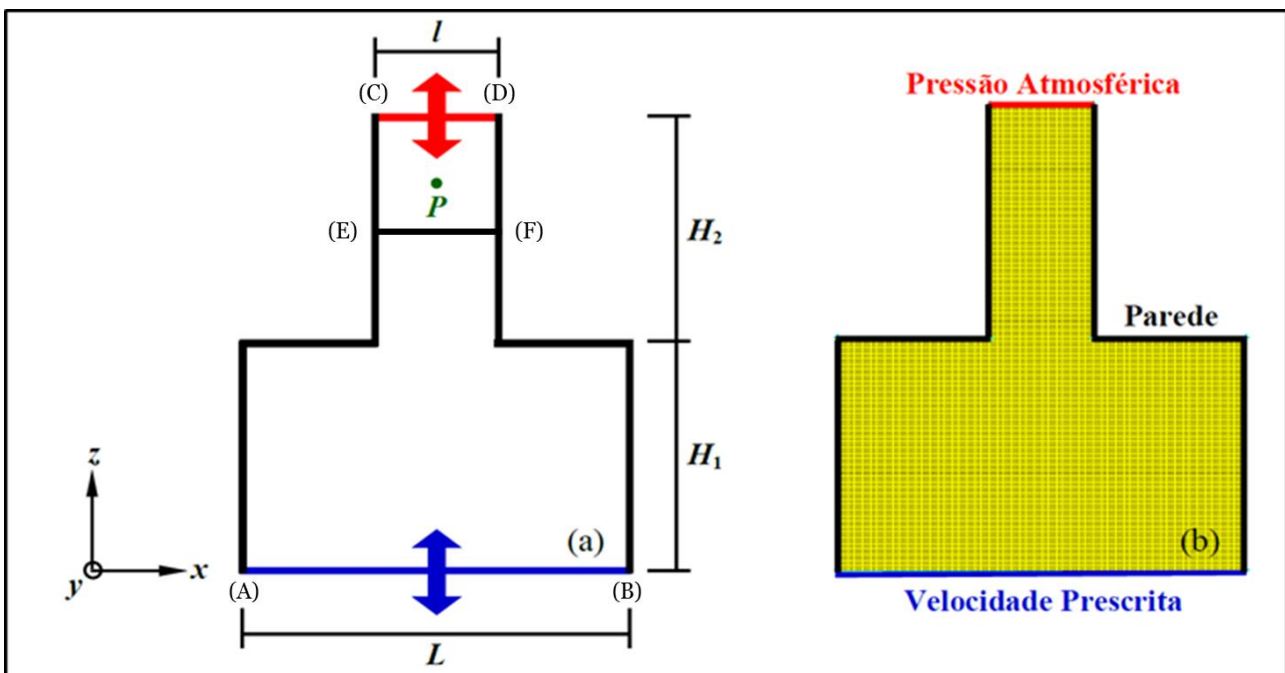


Figura 5.1 – a) Domínio computacional b) Malha e condições de contorno

A Figura 5.1b ilustra a malha, bem como as condições de contorno utilizadas neste modelo.

O modelo matemático neste estudo é composto pelas equações de conservação de massa e quantidade de movimento, para a descrição de escoamentos transientes, incompressível e no regime turbulento, as equações são dadas (Versteeg e Malalasekera, 2007):

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (5.2)$$

onde subscrito $i = 1, 2$ corresponde as coordenadas cartesianas que formam a geometria bidimensional. u_j , p e x_j são, a velocidade, pressão e coordenadas espaciais. f_i representa um campo de todas as forças externas. τ_{ij} é o termo da viscosidade dado por

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.3)$$

onde ρ a massa específica (kg/m^3), μ é a viscosidade dinâmica ($\text{kg/m} \cdot \text{s}$), τ é o tensor de tensões (N/m^2) e \vec{g} é a aceleração da gravidade (m/s^2).

Nas simulações numéricas realizadas nesse trabalho foram adotados: o algoritmo PISO (*Pressure Implicit solution by Split Operator*) para o acoplamento pressão-velocidade; o método PRESTO (*PREssure STaggering Option*) para a discretização da pressão; e o esquema de advecção *upwind* de primeira ordem para os termos advectivos. Além disso, o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ foi empregado. As soluções foram consideradas convergidas para resíduos menores que 1×10^{-5} .

Vale destacar que o software utilizado, ANSYS FLUENT 14.0, considera algumas condições de operação padrão. Entre elas estão as condições de operação, onde o software adota uma massa específica operacional igual a do fluido em escoamento no problema. Para geração da pressão estática durante a simulação, o software inicia suas iterações resolvendo algumas equações onde a massa específica operacional é subtraída da massa específica do fluido, como as duas são iguais essa operação resulta em zero e prejudica a simulação, gerando dados irreais. Então, ao definir as condições iniciais do problema, é necessário adotar a massa específica operacional como zero, isto fará com que a pressão estática resultante possua valores plausíveis.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Verificação do modelo computacional

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), o procedimento de verificação consiste em avaliar se um modelo computacional está resolvendo adequadamente as equações que governam o fenômeno físico estudado. Para isso, é possível comparar os resultados numéricos obtidos com o modelo computacional a ser verificado com outras soluções numéricas ou com soluções analíticas.

6.1.1 Verificação através de comparação com solução numérica

A partir do estudo de caso apresentado em Gomes et al. (2009), uma das verificações propostas nesta pesquisa, do modelo computacional será realizada. Para isso, um conversor CAO, em escala de laboratório, com $L = 0,20$ m, $l = 0,05$ m, $H_1 = 0,15$ m e $H_2 = 0,15$ m (ver Fig. 5.1a) foi usado. O domínio computacional foi discretizado com elementos quadrilaterais de tamanho 0,001 m, gerando uma malha regular com 37500 células computacionais. Enquanto a discretização temporal foi realizada com passo de tempo de 0,01 s, e a simulação numérica foi desenvolvida durante 6,00 s. Para representar a variação de velocidade vertical (w) do ar na entrada da câmara hidropneumática, como condição de contorno, foi considerada a Eq. (6.1) que é uma função transiente utilizada no estudo realizado por Marjani et al. (2008).

$$w(t) = H \left(\frac{2\pi}{T} \right) \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \quad (6.1)$$

sendo que w corresponde à velocidade na direção vertical (m/s), H a amplitude (igual a 0,07 m), T o período (igual a 0,81 s) e t o tempo (s). Porém, cabe destacar que, diferentemente de Gomes et al. (2009) que impôs essa condição de contorno através de uma UDF (*User Defined Function*) no ANSYS FLUENT 6.3, no presente trabalho valores discretos de tempo e velocidade obtidos a partir da Eq. (6.1), a cada 0,01 s, foram impostos como condição de contorno através da ferramenta *Table data* do software ANSYS FLUENT 14.0. Para comparar os resultados obtidos com o modelo computacional proposto com os encontrados em Gomes et al., (2009), foi monitorada a velocidade w (na direção z) do escoamento do ar, ao longo do tempo, em um ponto P localizado na chaminé do conversor CAO (ver Fig. 5.1a), em $x = 0,10$ m e $z = 0,20$ m. No presente estudo, w foi registrada a cada 0,01 s.

Na Fig. 6.1 são apresentadas as curvas resultantes da verificação do modelo numérico proposto em comparação com os resultados obtidos em Gomes et al. (2009), conforme mencionado anteriormente, duas metodologias foram empregadas em tal estudo: metodologia ar que, com

exceção da maneira de imposição da velocidade prescrita, é fundamentalmente o mesmo modelo computacional proposto aqui; e a metodologia VOF, onde as ondas geradas numericamente através do modelo VOF incidem sobre o conversor CAO. Cabe destacar que na metodologia VOF a onda gerada no tanque inicia do repouso, o que exige um determinado tempo de simulação para as ondas, devidamente estabilizadas, incidirem no conversor. Diante do exposto, para fins de comparação entre as três metodologias foi necessário considerar os resultados obtidos durante um intervalo de tempo compreendido entre 4,70 s e 5,50 s.

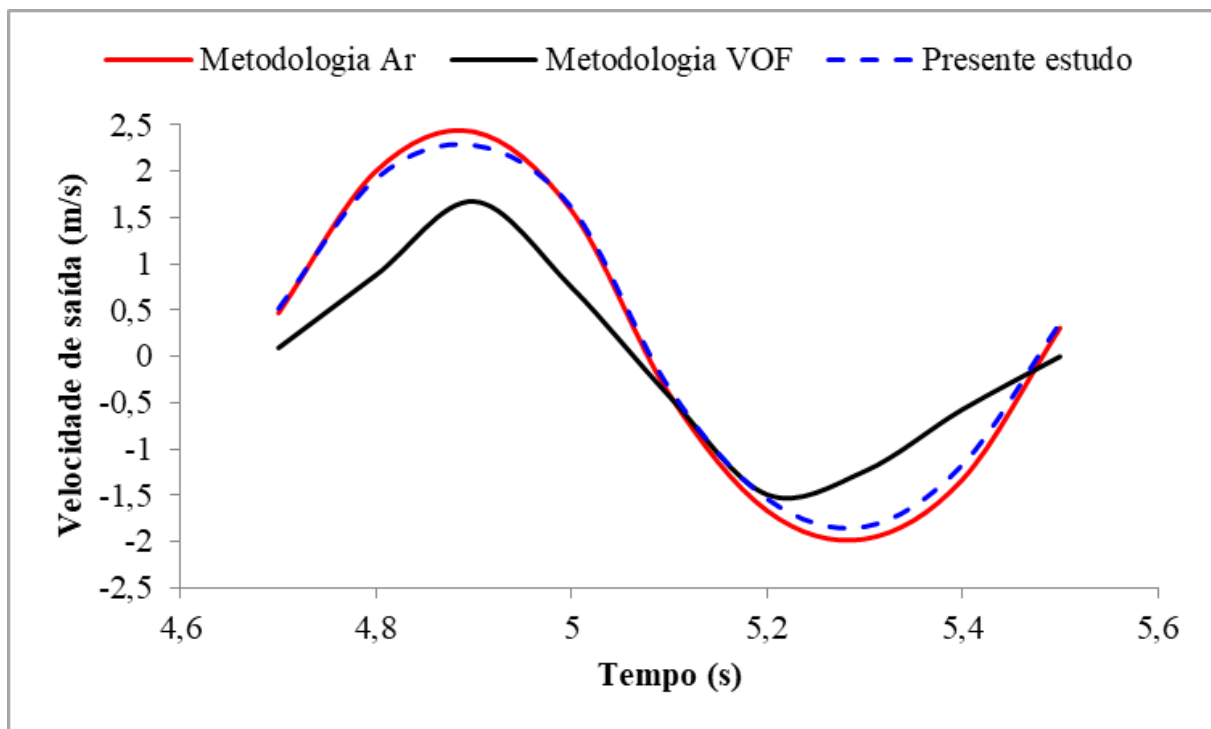


Figura 6.1 – Comparação da variação de velocidade vertical na chaminé do conversor CAO

É possível notar que todas as soluções numéricas apresentam a mesma tendência. Além disso, fica evidente que os resultados do presente estudo estão em concordância com os de Gomes et al. (2009), gerados com a metodologia ar (que neste estudo é chamado de metodologia *piston*), verificando assim a imposição da condição de contorno de velocidade através da ferramenta *table data*. Também, como já era esperado, existe uma diferença em relação à Metodologia VOF, porém os resultados do presente estudo acompanham a mesma tendência de variação da velocidade e são ligeiramente mais próximos do que os gerados em Gomes et al. (2009) com a Metodologia ar. Cabe destacar que o motivo que justifica essa abordagem simplificada através da Metodologia *piston*, é a significativa redução no tempo de processamento. Para o caso da Fig. 6.1, com a Metodologia VOF é necessário um tempo de processamento de aproximadamente 8 h (28800 s), já com a Metodologia *piston* o tempo de processamento é em torno de 0,5 h (1880 s). Essa diferença no tempo de

processamento ocorre devido à redução do domínio computacional.

6.1.2 Verificação através de comparação com solução analítica

Inicialmente, realizou-se o teste de independência de malha, em um domínio com dimensões realísticas onde $L = 12$ m, $l = 2,3$ m, $H_1 = 10$ m e $H_2 = 5$ m (ver Fig. 5.1a), a fim de determinar a quantidade de volumes finitos necessários para que a malha não gere influência sobre os resultados. A malha foi considerada independente quando a diferença relativa entre as velocidades máximas registradas fossem menor que 2%, sendo esta diferença calculada como:

$$\left| 100 \times \left(\frac{V_{\max}^j - V_{\max}^{j+1}}{V_{\max}^j} \right) \right| < 2\% \quad (6.2)$$

Conforme consta na Tab. 6.1, foram utilizadas nove malhas com diferentes refinamentos. Após a realização do teste, observou-se que a malha considerada independente é a malha 7, visto que, a mesma apresentou uma diferença relativa de 1,67%. Na Fig. 6.2 apresenta-se a curva que demonstra a tendência de estabilização da malha conforme ocorre o aumento do refino.

Tabela 6.1 – Diferença relativa entre as malhas

Malha (j)	Quadriláteros (m)	Nº de Vol.	Vel. Max (m/s)	Diferença Relativa
1	0,100	13150	0,949	17,071
2	0,060	36554	1,111	7,471
3	0,050	52600	1,194	7,203
4	0,040	82250	1,280	3,359
5	0,035	07822	1,323	2,646
6	0,030	146392	1,358	2,356
7	0,025	210400	1,390	1,655
8	0,020	328750	1,413	1,415
9	0,015	584549	1,433	-

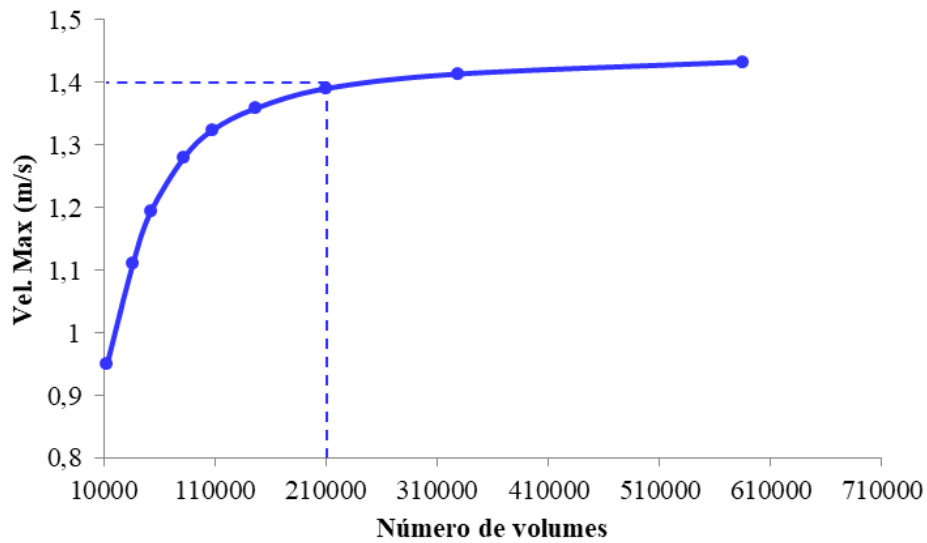


Figura 6.2 – O ponto em destaque, refere-se a malha 7 da Tab. 6.1

Através da Tab. 6.1 e da Fig. 6.2, verifica-se que a malha 7 apresenta um refinamento de acordo com o critério de tolerância estipulado, permitindo cálculos com boa precisão.

Em posse da malha independente, foram definidos valores de velocidade constantes para serem impostos como condição de contorno de velocidade prescrita na entrada da câmara. Estes valores representam os movimentos de sucção, no caso de velocidades negativas, e exaustão, no caso de velocidades positivas. A Tab. 6.2 traz os valores das velocidades utilizadas, que através da distribuição de frequência e do software Excel, os dados provenientes do arquivo *Table data* foram divididos em dois grupos, valores positivos e negativos. Após, foram criados intervalos de classe para cada grupo, predefiniu-se que seriam usados no máximo 10 intervalos de classe para cada grupo e a amplitude dos grupos foi determinada de forma que cada intervalo tivesse a maior frequência possível. Feito isso, foi selecionado o limite inferior dos intervalos de classe como range para velocidades prescritas.

Tabela 6.2 – Velocidades prescritas para o movimento de sucção e exaustão

Sucção V_1 (m/s)	Exaustão V_1 (m/s)
-1,250	1,250
-1,000	1,000
-0,750	0,750
-0,500	0,500
-0,250	0,250
-0,100	0,100
-0,075	0,075
-0,050	0,050
-0,025	0,025
-0,010	0,010

Tendo as dimensões da área de entrada da câmara hidropneumática e da área da saída da chaminé do conversor CAO e sabendo que o fluido pode ser considerado incompressível, obtêm-se através da Eq. (3.8) as velocidades de saída da chaminé (V_2) para cada valor de velocidade prescrita imposta na entrada da câmara, conforme apresentado na Tab. 6.3.

Tabela 6.3 – Velocidades de saída do dispositivo para os movimentos de sucção e exaustão

Sucção V_2 (m/s)	Exaustão V_2 (m/s)
-6,522	6,522
-5,217	5,217
-3,913	3,913
-2,609	2,609
-1,304	1,304
-0,522	0,522
-0,391	0,391
-0,261	0,261
-0,130	0,130
-0,052	0,052

A geometria em estudo possui uma mudança súbita de área, que pode ser evidenciada na Fig. 5.1a, provocando uma perda de carga localizada considerável. Para avaliar esta perda, utilizando a Eq. (3.22), é necessário determinar o coeficiente de perda de carga que pode ser obtido na Fig. 3.2, através da razão de áreas (AR). Sabendo que a relação de áreas na geometria é de $(2,3 \text{ m})b$ para $(12 \text{ m})b$, onde b representa a profundidade (ou largura) do dispositivo CAO, obtêm-se uma razão de áreas de 0,19, gerando um coeficiente de perda de 0,45 para a contração e de 0,65 para a expansão. Definidos os coeficientes, a perda de carga localizada foi calculada através da Eq. (3.22) e seus valores podem ser consultados na Tab. 6.4.

Tabela 6.4 – Perda de carga localizada durante o movimento de sucção e exaustão

Sucção		Exaustão	
V_2 (m/s)	h_{lm} (m)	V_2 (m/s)	h_{lm} (m)
-6,522	1,40910	6,522	0,97553
-5,217	0,90182	5,217	0,62434
-3,913	0,50728	3,913	0,35119
-2,609	0,22546	2,609	0,15609
-1,304	0,05636	1,304	0,03902
-0,522	0,00902	0,522	0,00624
-0,391	0,00507	0,391	0,00351
-0,261	0,00226	0,261	0,00156
-0,130	0,00056	0,130	0,00039
-0,052	0,00009	0,052	0,00006

Para a obtenção da perda de carga distribuída foi utilizada a Eq. (3.21), na qual é necessário conhecer o fator de atrito que é obtido através de dois parâmetros, sendo eles a rugosidade da parede em contato com o fluido e o número de Reynolds decorrente do escoamento completamente desenvolvido. O número de Reynolds (Re), para as diversas velocidades, foi calculado com o emprego da Eq. (3.19). Ele é constante durante o escoamento entre os trechos de dimensões diferentes, pois o mesmo depende da vazão do fluido, massa específica e viscosidade dinâmica. Conhecendo as dimensões da geometria, as velocidades impostas e sabendo que o fluido utilizado é o ar, pode-se adotar uma massa específica $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ e uma viscosidade dinâmica $\mu = 17,4 \times 10^{-6} \text{ N.s/m}^2$, com isso obtêm-se os números de Reynolds para cada caso. Os resultados podem ser conferidos na Tab. 6.5.

Assim, conhecidos os valores do número de Reynolds para cada velocidade e considerando a rugosidade das paredes muito baixas ao adotar a curva para tubo liso, foi utilizado o Diagrama de *Moody*, conforme a Fig. 3.1, onde foi possível obter o fator de atrito para cada caso. Como os valores do número de Reynolds e o fator de atrito dependem apenas do módulo da velocidade, para este caso especificamente onde o problema é bidimensional e a vazão se mantém, então a Tab. 6.5 traz os valores que serão utilizados tanto para o movimento de sucção quanto para o de exaustão.

Tabela 6.5 – Número de Reynolds e fator de atrito utilizados durante a exaustão e sucção

Velocidades (m/s)	Número de Reynolds	Fator de atrito
6,522	1056034,48	0,0115
5,217	844827,59	0,0119
3,913	633620,69	0,0125
2,609	422413,79	0,0135
1,304	211206,9	0,0152
0,522	84482,76	0,0185
0,391	63362,07	0,0195
0,261	42241,38	0,0215
0,130	21120,69	0,0250
0,052	8448,28	0,0320

Como a perda de carga distribuída depende da geometria do trecho em que se deseja determiná-la, foi necessário dividir a geometria em dois trechos, sendo o trecho 1 referente à câmara de altura 10 m e diâmetro 12 m e o trecho 2 à chaminé de altura 5 m e diâmetro 2,3 m. A perda distribuída, seja para o movimento de sucção ou exaustão, depende dos mesmos parâmetros, então, independentemente do sentido do escoamento ela será a mesma. Na Tab. 6.6, podem ser conferidas as perdas localizadas para ambos os trechos, assim como a total durante os movimentos de sucção e exaustão.

Tabela 6.6 – Perda de carga distribuída durante o movimento de sucção e exaustão

Trecho 1 h_{l1} (m)	Trecho 2 h_{l2} (m)	Total h_l (m)
0,00076320	0,05419608	0,05495928
0,00050544	0,03589194	0,03639738
0,00029864	0,02120716	0,02150580
0,00014335	0,01017944	0,01032279
0,00004035	0,00286532	0,00290567
0,00000786	0,00055798	0,00056584
0,00000466	0,00033083	0,00033549
0,00000228	0,00016212	0,00016440
0,00000066	0,00004713	0,00004779
0,00000014	0,00000965	0,00000979

Calculadas as perdas localizadas e distribuídas, as perdas totais podem ser determinadas através da Eq. (3.18) e seus valores são expostos na Tab. 6.7.

Tabela 6.7 – Perda de carga total para a sucção e exaustão

Sucção		Exaustão	
V_2 (m/s)	H (m)	V_2 (m/s)	H (m)
-6,522	1,46405728	6,522	1,03048866
-5,217	0,93822010	5,217	0,66073619
-3,913	0,52878108	3,913	0,37269638
-2,609	0,23577847	2,609	0,16640749
-1,304	0,05926959	1,304	0,04192685
-0,522	0,00958407	0,522	0,00680923
-0,391	0,00540824	0,391	0,00384740
-0,261	0,00241896	0,261	0,00172525
-0,130	0,00061143	0,130	0,00043800
-0,052	0,00009997	0,052	0,00007222

Após determinar as velocidades de saída e perdas de carga na câmara CAO, foi realizado um balanço de energia através da Eq. (3.17), com a finalidade de determinar a diferença de pressão entre a entrada e a saída do dispositivo CAO para cada caso. Os resultados da queda de pressão podem ser consultados na Tab. 6.8.

Tabela 6.8 – Resultados analíticos para diferença de pressão entre a entrada e a saída do dispositivo CAO considerando as perdas de carga

Velocidades (m/s)	Sucção ΔP (Pa)	Velocidades (m/s)	Exaustão ΔP (Pa)
-1,250	172,76	1,250	217,74
-1,000	175,47	1,000	204,26
-0,750	177,58	0,750	193,77
-0,500	179,08	0,500	186,27
-0,250	179,97	0,250	181,77
-0,100	180,21	0,100	180,50
-0,075	180,23	0,075	180,40
-0,050	180,25	0,050	180,32
-0,025	180,26	0,025	180,27
-0,010	180,26	0,010	180,26

A fim de verificar também se o modelo numérico estava calculando as perdas de carga, foi empregada a Eq. (3.10) onde o balanço de energia foi realizado desconsiderando a perda de carga. Os resultados podem ser conferidos na Tab. 6.9.

Tabela 6.9 – Resultados analíticos para diferença de pressão entre a entrada e a saída do dispositivo CAO desconsiderando as perdas de carga

Sucção ΔP (Pa)	Exaustão ΔP (Pa)
155,16	205,35
164,20	196,32
171,22	189,29
176,24	184,27
179,25	181,26
180,10	180,42
180,17	180,35
180,22	180,30
180,25	180,27
180,26	180,26

Ao se aplicar o modelo numérico que está sendo proposto, foram monitorados os valores de velocidade de saída da chaminé e pressão total tanto na entrada quanto na saída da CAO. Todos os dados foram monitorados através de sondas numéricas do tipo linha. Para as informações de saída, foi utilizada a mesma linha da condição de contorno de pressão atmosférica (*pressure outlet*) que foi formada pelos seguintes pontos: C(4,85;15) e D(7,15;15) (ver Fig. 5.1a). Enquanto para monitorar os dados na entrada da CAO, se usou a linha da condição de contorno de entrada para velocidade (*velocity inlet*) formada pelos pontos A(0;0) e B(12;0) (ver Fig. 5.1a). As velocidades obtidas na saída da chaminé podem ser consultadas na Tab. 6.10.

Tabela 6.10 – Resultados numéricos para a velocidade na saída da chaminé

Sucção V_2 (m/s)	Exaustão V_2 (m/s)
-6,521739	6,521739
-5,217391	5,217391
-3,913043	3,913043
-2,608696	2,608696
-1,304348	1,304348
-0,521739	0,521739
-0,391304	0,391304
-0,260870	0,260870
-0,130435	0,130435
-0,052174	0,052174

As pressões totais monitoradas na entrada da câmara e saída da chaminé durante o movimento de sucção e de exaustão podem ser consultadas nas Tabs. 6.11 e 6.12, respectivamente.

Tabela 6.11 – Pressão total na entrada da câmara e saída da chaminé durante o movimento de sucção

Sucção				
V_1 (m/s)	P_1 (Pa)	V_2 (m/s)	P_2 (Pa)	
-1,250	162,246044	-6,522	0,343040	
-1,000	168,658715	-5,217	0,149510	
-0,750	173,690521	-3,913	0,344617	
-0,500	177,310524	-2,609	0,345220	
-0,250	179,416960	-1,304	0,150246	
-0,100	179,946418	-0,522	0,345545	
-0,075	179,994473	-0,391	0,345522	
-0,050	180,035911	-0,261	0,345499	
-0,025	180,073092	-0,130	0,150211	
-0,010	180,094377	-0,052	0,345487	

As pressões totais monitoradas na entrada da câmara e saída da chaminé durante o movimento de exaustão, podem ser consultadas na Tab. 6.12.

Tabela 6.12 – Pressão total na entrada da câmara e saída da chaminé durante o movimento de exaustão

Exaustão				
V_1 (m/s)	P_1 (Pa)	V_2 (m/s)	P_2 (Pa)	
1,250	220,515044	6,522	26,581074	
1,000	206,061340	5,217	17,038981	
0,750	194,810042	3,913	9,626690	
0,500	186,752421	2,609	4,346076	
0,250	181,875589	1,304	1,193989	
0,100	180,455800	0,522	0,317097	
0,075	180,326511	0,391	0,244093	
0,050	180,226818	0,261	0,191945	
0,025	180,155204	0,130	0,160653	
0,010	180,124478	0,052	0,151888	

Ao se realizar a diferença entre a pressão total na entrada da câmara com a pressão total na saída da chaminé, obtêm-se a queda de pressão total que será utilizada para comparar com os resultados analíticos. A diferença de pressão total numérica para ambos os movimentos de sucção e exaustão podem ser consultados na Tab. 6.13.

Tabela 6.13 – Diferença de pressão total numérica para os movimentos de sucção e exaustão

Velocidade (m/s)	Sucção ΔP (Pa)	Velocidade (m/s)	Exaustão ΔP (Pa)
-1,250	161,903004	1,250	193,933970
-1,000	168,509205	1,000	189,022359
-0,750	173,345904	0,750	185,183352
-0,500	176,965304	0,500	182,406345
-0,250	179,266714	0,250	180,681100
-0,100	179,600873	0,100	180,138704
-0,075	179,648950	0,075	180,082417
-0,050	179,690110	0,050	180,034873
-0,025	179,922881	0,025	179,994551
-0,010	179,748890	0,010	179,972590

Ao analisar previamente os resultados, comparando a diferença de pressão total analítica e numérica, percebe-se que os resultados se aproximam mais quando as perdas de carga são desconsideradas analiticamente. Constatado isso, é necessário avaliar se o modelo utilizado é o responsável por, aparentemente, não computar a perda de carga ou se essa é uma limitação do software ANSYS FLUENT 14.0.

Na Tab. 6.14 pode-se comparar a diferença de pressão entre a entrada da câmara e a saída da chaminé do dispositivo CAO, obtida através do método analítico ao se considerar as perdas de carga aplicando a Eq. (3.17), e os resultados obtidos através do método numérico. Também é possível analisar as diferenças calculadas em relação aos resultados analíticos.

Tabela 6.14 – Resultados analíticos e numéricos para a diferença de pressão entre a entrada e a saída do dispositivo CAO considerando as perdas de carga

Sucção				Exaustão			
V_1 (m/s)	Numérico ΔP (Pa)	Analítico ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)	V_1 (m/s)	Numérico ΔP (Pa)	Analítico ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)
-1,250	161,90	172,76	6,28	1,250	193,93	217,74	10,93
-1,000	168,51	175,47	3,97	1,000	89,02	204,26	7,46
-0,750	173,35	177,58	2,38	0,750	185,18	193,77	4,43
-0,500	176,97	179,08	1,18	0,500	182,41	186,27	2,08
-0,250	179,27	179,97	0,39	0,250	180,68	181,77	0,60
-0,100	179,60	180,21	0,34	0,100	180,14	180,50	0,20
-0,075	179,65	180,23	0,32	0,075	180,08	180,40	0,17
-0,050	179,69	180,25	0,31	0,050	180,03	180,32	0,16
-0,025	179,92	180,26	0,18	0,025	179,99	180,27	0,16
-0,010	179,75	180,26	0,28	0,010	179,97	180,26	0,16

É possível notar, através da Tab. 6.14, que quanto maior o valor absoluto da velocidade maior também é a diferença relativa entre os resultados obtidos, e essa diferença apresenta valores de no máximo 10,93% para o caso da velocidade de magnitude 1,25 (m/s).

São apresentados na Tab. 6.15 os resultados da solução analítica desconsiderando as perdas de carga e as diferenças apresentadas em comparação com a solução numérica.

Tabela 6.15 – Resultados analíticos e numéricos para a diferença de pressão entre a entrada e a saída do dispositivo CAO desconsiderando as perdas de carga

V_1 (m/s)	Sucção			V_1 (m/s)	Exaustão		
	Numérico ΔP (Pa)	Analítico ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)		Numérico ΔP (Pa)	Analítico ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)
-1,250	161,90	155,16	4,34	1,250	193,93	205,35	5,56
-1,000	168,51	164,20	2,68	1,000	189,02	196,32	3,72
-0,750	173,35	171,22	1,24	0,750	185,18	189,29	2,17
-0,500	176,97	176,24	0,41	0,500	182,41	184,27	1,01
-0,250	179,27	179,25	0,01	0,250	180,68	181,26	0,32
-0,100	179,60	180,10	0,28	0,100	180,14	180,42	0,16
-0,075	179,65	180,17	0,29	0,075	180,08	180,35	0,15
-0,050	179,69	180,22	0,29	0,050	180,03	180,30	0,15
-0,025	179,92	180,25	0,18	0,025	179,99	180,27	0,15
-0,010	179,75	180,26	0,28	0,010	179,97	180,26	0,16

Através da Tab. 6.15, é possível observar que as diferenças relativas entre as soluções numérica e analítica são um pouco menores se comparadas com os resultados da Tab. 6.14. Isso é devido ao fato da Tab. 6.15 apresentar resultados analíticos onde as perdas de carga são desconsideradas. Para as velocidades de maior magnitude, a maior diferença ocorre para o caso de exaustão, sendo que, enquanto ao se considerar as perdas de carga analiticamente a diferença entre o resultado analítico e numérico para a velocidade de 1,25 (m/s) foi de 10,93%, quando se desconsidera a perda de carga analiticamente a diferença entre o resultado analítico e numérico, para a mesma velocidade, foi de 5,56%, aproximadamente a metade.

Na Fig. 6.3 são apresentadas as curvas geradas a partir dos resultados analítico e numérico para a diferença de pressão entre a entrada da câmara e a saída da chaminé do dispositivo CAO, considerando e desconsiderando as perdas de carga na solução analítica. Cabe destacar, que o gráfico contém as soluções obtidas tanto para o movimento de sucção como para o movimento de exaustão, o que pode ser constatado através da variação de velocidades no eixo horizontal.

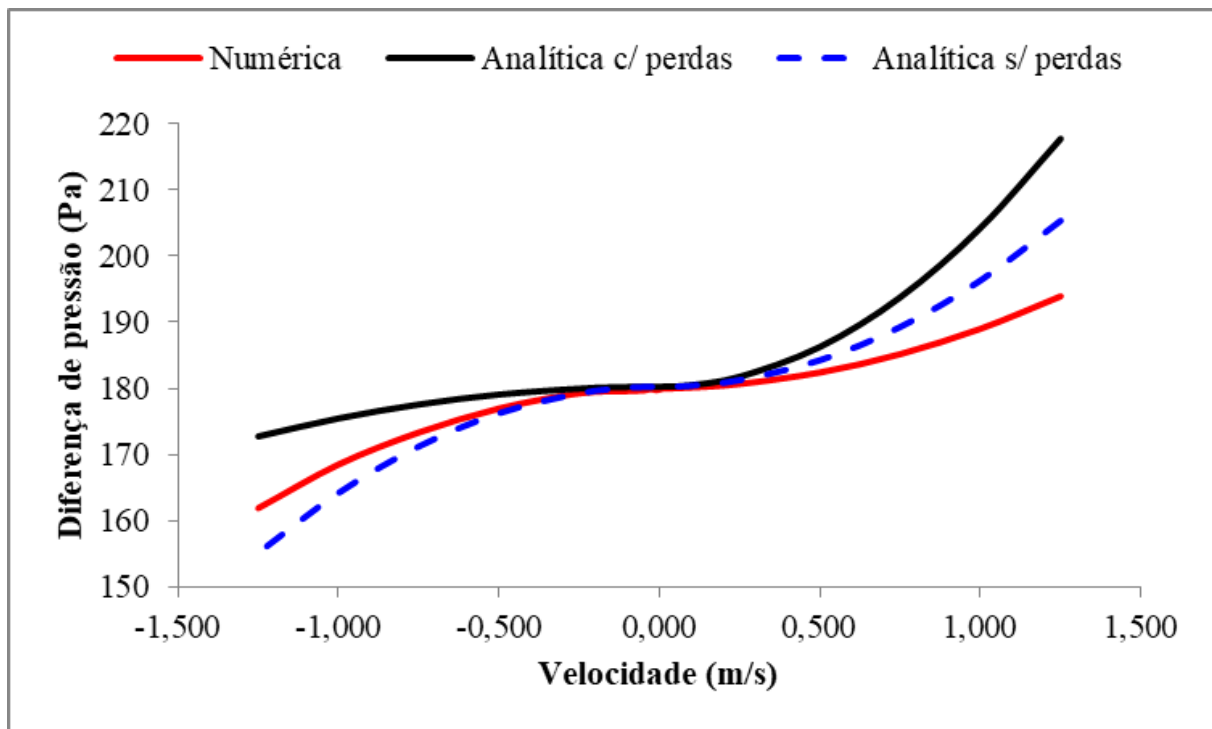


Figura 6.3 – Curvas resultantes das soluções numérica e analítica considerando e desconsiderando as perdas de carga

Os resultados obtidos para velocidade de saída da chaminé, calculados analiticamente por meio da Eq. (3.8), são apresentados na Tab. 6.16, onde podem ser comparados com os valores resultantes da solução numérica.

Tabela 6.16 – Resultados analíticos e numéricos para a velocidade na saída da chaminé

Sucção		Diferença	Exaustão		Diferença
Analítico	Numérico		Analítico	Numérico	
-6,52173913	-6,52172844	0,00016%	6,52173913	6,52172820	0,00017%
-5,21739130	-5,21738212	0,00018%	5,21739130	5,21738272	0,00016%
-3,91304348	-3,91303788	0,00014%	3,91304348	3,91303713	0,00016%
-2,60869565	-2,60869196	0,00014%	2,60869565	2,60869166	0,00015%
-1,30434783	-1,30434686	0,00007%	1,30434783	1,30434684	0,00008%
-0,52173913	-0,52173940	0,00005%	0,52173913	0,52173940	0,00005%
-0,39130435	-0,39130453	0,00005%	0,39130435	0,39130463	0,00007%
-0,26086957	-0,26086988	0,00012%	0,26086957	0,26086986	0,00011%
-0,13043478	-0,13043452	0,00020%	0,13043478	0,13043508	0,00023%
-0,05217391	-0,05217373	0,00035%	0,05217391	0,05217414	0,00043%

É possível constatar, através da Tab. 6.16, que a continuidade do escoamento está sendo bem representada pelo modelo, visto que as diferenças relativas entre as soluções analítica e numérica, para a velocidade na saída da chaminé, são extremamente pequenas. Os dados da Tab. 6.16 estão

representados graficamente na Fig. 6.4.

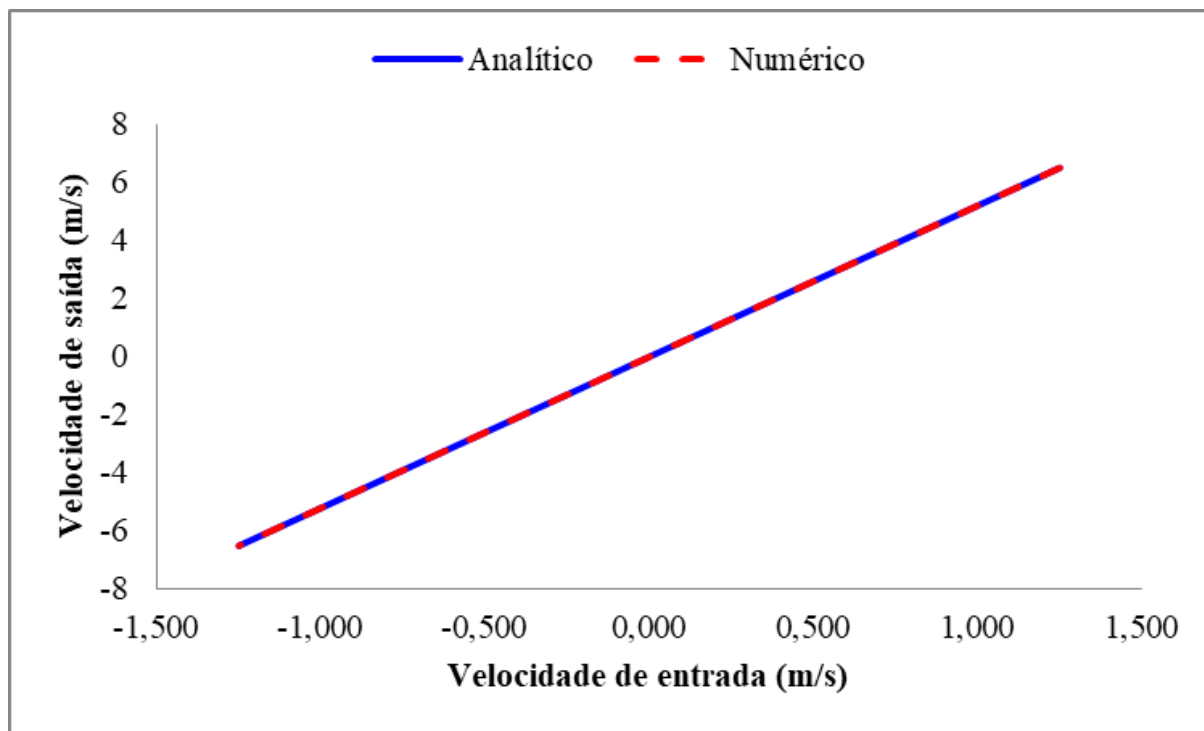


Figura 6.4 – Curvas das velocidades de saída obtidas por meio do método analítico e numérico

Não é possível perceber, através da Fig. 6.4, a diferença entre as soluções analítica e numérica para a velocidade na saída da chaminé. O que ocorre, devido a pequena diferença entre essas soluções, ser muito pequena fazendo com que uma curva sobreponha a outra.

Com os resultados das Tabelas 6.14 e 6.15, é possível constatar que há uma diferença significativa entre os resultados analíticos e numéricos quando se considera e desconsidera as perdas de carga analiticamente. Fica evidente que esses resultados são mais próximos quando se desconsidera as perdas de carga analiticamente. O passo seguinte é verificar se o modelo empregado nas simulações que geraram os dados até aqui expostos, possui dificuldades em computar as perdas de carga durante o escoamento. A pressão total calculada através da Eq. (3.17), possui basicamente duas componentes, sendo uma delas a pressão dinâmica, decorrente da velocidade do escoamento, e a outra, a pressão estática resultante da pressão hidrostática e as perdas de carga.

Como evidenciado pela Fig. 6.4, as soluções analítica e numérica apresentam uma aproximação muito grande para as velocidades obtidas na saída da chaminé, isso já é suficiente para ser descartada a possibilidade de a pressão dinâmica estar sendo determinada incorretamente. Tem-se consciência, que a solução analítica carrega um erro ao se utilizar valores tabelados para determinação das perdas e aceitar simplificações nas equações utilizadas para determinar a

diferença de pressão total. O que realmente intriga, é o fato da solução numérica ter uma maior aproximação com a solução analítica quando as perdas são desconsideradas analiticamente. Com isso, o próximo passo desta pesquisa, consiste em analisar os esquemas de solução, visando obter uma combinação que possa reduzir as diferenças entre as soluções analítica e numérica.

6.2 Análise dos esquemas de solução

Outra análise realizada nesta pesquisa, se refere à combinação dos esquemas de solução para o acoplamento pressão-velocidade, para a discretização da pressão e o para o tratamento dos termos advectivos. As diferenças encontradas entre as soluções numérica e analítica foram analisadas, a fim de avaliar se as perdas não estavam sendo computadas pela combinação recomendada em Gomes (2009).

Para o acoplamento pressão-velocidade o ANSYS FLUENT 14.0 disponibiliza os algoritmos PISO, SIMPLE, SIMPLEC e *Coupled*. Para a discretização da pressão, são disponibilizados os algoritmos *Body Force*, *Standard*, PRESTO, Linear e *Second Order Upwind*. Para a resolução dos termos advectivos é disponibilizado os algoritmos *First Order Upwind*, *Second Order Upwind*, *Power Law*, *Quick* e *Third Order Muscl*.

Nessas simulações foram consideradas apenas a velocidade de 1,25 m/s, simulando o movimento de exaustão durante o escoamento, e -1,25 m/s, a fim de simular o movimento de sucção durante o escoamento. A escolha destas duas únicas velocidades foi realizada com o intuito de reduzir o tempo total para a realização da análise, já que, para cada velocidade são necessárias 100 simulações para considerar todas as possibilidades decorrentes das combinações entre os algoritmos disponibilizados pelo ANSYS FLUENT 14.0 para acoplamento pressão-velocidade, discretização da pressão e resolução da quantidade de movimento. A seguir, são apresentados comparativos entre os resultados numéricos e analíticos, considerando e desconsiderando a perda de carga analiticamente com o intuito de verificar se existe outro conjunto de algoritmos que apresente resultados com uma aproximação maior em relação à solução analítica do que o modelo proposto na bibliografia.

A Tab. 6.17 apresenta os resultados obtidos adotando o algoritmo SIMPLE para o acoplamento pressão-velocidade em conjunto com os demais algoritmos para um movimento de sucção com velocidade de -1,25 m/s. São apresentadas também as diferenças encontradas entre as soluções analítica e numérica.

Tabela 6.17 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo SIMPLE como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de -1,25 m/s representando o movimento de sucção

Algoritmos	Sem perda			Com perda	
	Numérica ΔP (Pa)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)
SIMPLE - Standard - First Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLE - Standard - Second Order	162,08	155,16	4,46	172,76	6,18
SIMPLE - Standard - Power Law	162,09	155,16	4,46	172,76	6,17
SIMPLE - Standard - QUICK	162,07	155,16	4,45	172,7	6,19
SIMPLE - Standard - Third Order	162,08	155,16	4,46	172,76	6,18
SIMPLE - PRESTO - First Order	162,09	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLE - PRESTO - second order	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
SIMPLE - PRESTO - power law	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
SIMPLE - PRESTO - QUICK	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
SIMPLE - PRESTO - third order	162,08	155,16	4,45	172,76	6,18
SIMPLE - Linear - First Order	162,12	155,16	4,48	172,76	6,16
SIMPLE - Linear - Second Order	162,09	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLE - Linear - Power Law	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLE - Linear - QUICK	162,09	155,16	4,46	172,76	6,17
SIMPLE - Linear - Third Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLE - Second Order - First Order	162,11	155,16	4,48	172,76	6,16
SIMPLE - Second Order - Second Order	162,09	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLE - Second Order - Power Law	162,09	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLE - Second Order - QUICK	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLE - Second Order - Third Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLE - Body Force - First Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLE - Body Force - Second Order	162,06	155,16	4,44	172,76	6,19
SIMPLE - Body Force - Power Law	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
SIMPLE - Body Force - QUICK	162,06	155,16	4,44	172,76	6,19
SIMPLE - Body Force - Third Order	162,06	155,16	4,45	172,76	6,19

Pode ser evidenciado na Tab. 6.17 que não existe uma diferença significativa entre as configurações escolhidas adotando o algoritmo SIMPLE para o acoplamento pressão-velocidade. Outro aspecto que foi analisado diz respeito ao tempo de processamento, que para estas combinações duraram aproximadamente 4 h.

Na Tab. 6.18 são apresentados os resultados obtidos adotando o algoritmo PISO para o

acoplamento pressão-velocidade em conjunto com os demais algoritmos para um movimento de sucção com velocidade de -1,25 m/s. São apresentadas também as diferenças encontradas entre as soluções analítica e numérica.

Tabela 6.18 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo PISO como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de -1,25 m/s representando o movimento de sucção

Algoritmos	Sem perda			Com perda	
	Númérica ΔP (Pa)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)
PISO - Standard - First Order	162,11	155,16	4,47	172,76	6,17
PISO - Standard - Second Order	162,08	155,16	4,46	172,76	6,18
PISO - Standard - Power Law	162,09	155,16	4,46	172,76	6,17
PISO - Standard - QUICK	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
PISO - Standard - Third Order	162,09	155,16	4,46	172,76	6,18
PISO - PRESTO - First Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
PISO - PRESTO - Second Order	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
PISO - PRESTO - Power Law	162,07	155,16	4,45	172,76	6,18
PISO - PRESTO - QUICK	162,07	155,16	4,45	172,76	6,18
PISO - PRESTO - Third Order	162,08	155,16	4,46	172,76	6,18
PISO - Linear - First Order	162,12	155,16	4,48	172,76	6,16
PISO - Linear - Second Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
PISO - Linear - Power Law	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
PISO - Linear - QUICK	162,09	155,16	4,47	172,76	6,17
PISO - Linear - Third Order	162,09	155,16	4,47	172,76	6,17
PISO - Second Order - First Order	-	155,16	-	172,76	-
PISO - Second Order - Second Order	-	155,16	-	172,76	-
PISO - Second Order - Power Law	-	155,16	-	172,76	-
PISO - Second Order - QUICK	-	155,16	-	172,76	-
PISO - Second Order - Third Order	-	155,16	-	172,76	-
PISO - Body Force - First Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
PISO - Body Force - Second Order	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
PISO - Body Force - Power Law	162,08	155,16	4,45	172,76	6,18
PISO - Body Force - QUICK	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
PISO - Body Force - Third Order	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19

Pode ser evidenciado na Tab. 6.18, além da possível incompatibilidade entre os algoritmos PISO e *Second Order*, que não existe uma diferença significativa entre as configurações escolhidas adotando o algoritmo PISO para o acoplamento pressão-velocidade. Cabe destacar que, Gomes (2009), utilizou o algoritmo PISO para solução do acoplamento pressão velocidade, o esquema PRESTO para discretização de pressão e *First Order Upwind* para os termos advectivos. Nestes casos, o tempo de processamento durou um pouco mais de 4 h.

Na Tab. 6.19 são apresentados os resultados obtidos adotando o algoritmo SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade em conjunto com os demais algoritmos para um movimento de sucção com velocidade de -1,25 m/s. São apresentadas também as diferenças entre as soluções analítica e numérica.

Tabela 6.19 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo SIMPLEC como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de -1,25 m/s representando o movimento de sucção

Algoritmos	Sem perda			Com perda	
	Numérica ΔP (Pa)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)
SIMPLEC - Standard - First Order	162,22	155,16	4,55	172,76	6,10
SIMPLEC - Standard - Second Order	162,08	155,16	4,46	172,76	6,18
SIMPLEC - Standard - Power Law	162,09	155,16	4,46	72, 6	6,17
SIMPLEC - Standard - QUICK	162,37	155,16	4,65	172,76	6,01
SIMPLEC - Standard - Third Order	162,08	155,16	4,46	172,76	6,18
SIMPLEC - PRESTO - First Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLEC - PRESTO - Second Order	161,25	155,16	3,92	172,76	6,66
SIMPLEC - PRESTO - Power Law	161,26	155,16	3,93	172,76	6,66
SIMPLEC - PRESTO - QUICK	161,21	155,16	3,90	172,76	6,68
SIMPLEC - PRESTO - Third Order	161,27	155,16	3,93	172,76	6,65
SIMPLEC - Linear - First Order	161,23	155,16	3,91	172,76	6,67
SIMPLEC - Linear - Second Order	161,13	155,16	3,84	172,76	6,73
SIMPLEC - Linear - Power Law	161,48	155,16	4,07	172,76	6,53
SIMPLEC - Linear - QUICK	161,11	155,16	3,83	172,76	6,74
SIMPLEC - Linear - Third Order	161,14	155,16	3,85	172,76	6,73
SIMPLEC - Second Order - First Order	162,11	155,16	4,48	172,76	6,16
SIMPLEC - Second Order - Second Order	162,09	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLEC - Second Order - Power Law	162,09	155,16	4,46	172,76	6,17
SIMPLEC - Second Order - QUICK	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLEC - Second Order - Third Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLEC - Body Force - First Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
SIMPLEC - Body Force - Second Order	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
SIMPLEC - Body Force - Power Law	162,08	155,16	4,45	172,76	6,18
SIMPLEC - Body Force - QUICK	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
SIMPLEC - Body Force - Third Order	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19

Através da Tab. 6.19 fica evidente que, ao escolher algoritmo SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade, há uma ligeira redução na diferença entre os resultados numéricos e analíticos desconsiderando a perda de carga, quando se utiliza os métodos PRESTO e Linear para discretização da pressão, cabe destacar que para este grupo de combinações o tempo de processamento durou em média 6 h.

Na Tab. 6.20 são apresentados os resultados obtidos adotando o algoritmo *Coupled* para o acoplamento pressão-velocidade em conjunto com os demais algoritmos para um movimento de sucção com velocidade de -1,25 m/s. São apresentadas também as diferenças encontradas entre as soluções analítica e numérica.

Tabela 6.20 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo Coupled como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de -1,25 m/s representando o movimento de sucção

Algoritmos	Sem perda			Com perda	
	Numérica ΔP (Pa)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)
Coupled - Standard - First Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
Coupled - Standard - Second Order	162,08	155,16	4,46	172,76	6,18
Coupled - Standard - Power Law	162,09	155,16	4,46	172,76	6,17
Coupled - Standard - QUICK	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
Coupled - Standard - Third Order	162,08	155,16	4,46	172,76	6,18
Coupled - PRESTO - First Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
Coupled - PRESTO - Second Order	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
Coupled - PRESTO - Power Law	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
Coupled - PRESTO - QUICK	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
Coupled - PRESTO - Third Order	162,08	155,16	4,46	172,76	6,18
Coupled - Linear - First Order	162,12	155,16	4,48	172,76	6,16
Coupled - Linear - Second Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
Coupled - Linear - Power Law	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
Coupled - Linear - QUICK	162,09	155,16	4,47	172,76	6,17
Coupled - Linear - Third Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
Coupled - Second Order - First Order	162,12	155,16	4,48	172,76	6,16
Coupled - Second Order - Second Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
Coupled - Second Order - Power Law	162,09	155,16	4,47	172,76	6,17
Coupled - Second Order - QUICK	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
Coupled - Second Order - Third Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
Coupled - Body Force - First Order	162,10	155,16	4,47	172,76	6,17
Coupled - Body Force - Second Order	162,07	155,16	4,45	172,76	6,19
Coupled - Body Force - Power Law	162,07	155,16	4,45	172,76	6,18
Coupled - Body Force - QUICK	162,06	155,16	4,45	172,76	6,19
Coupled - Body Force - Third Order	162,08	155,16	4,45	172,76	6,18

Pode ser verificado através da Tab. 6.20 que não existe uma diferença significativa entre as configurações escolhidas adotando o algoritmo *Coupled* para o acoplamento pressão-velocidade. No que se refere ao tempo de processamento, as simulações duraram cerca de 5 h.

Na Tab. 6.21 são apresentados os resultados obtidos adotando o algoritmo SIMPLE para o acoplamento pressão-velocidade em conjunto com os demais algoritmos para um movimento de

exaustão com velocidade de 1,25 m/s. São apresentadas também as diferenças encontradas entre as soluções analítica e numérica.

Tabela 6.21 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo SIMPLE como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de 1,25 m/s representando o movimento de exaustão

Algoritmos	Sem perda			Com perda	
	Numérica ΔP (Pa)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)
SIMPLE - Standard - First Order	193,93	205,35	5,56	217,74	10,93
SIMPLE - Standard - Second Order	193,49	205,35	5,78	217,74	11,14
SIMPLE - Standard - Power Law	193,58	205,35	5,73	217,74	11,09
SIMPLE - Standard - QUICK	193,42	205,35	5,81	217,74	11,17
SIMPLE - Standard - Third Order	193,45	205,35	5,80	217,74	11,15
SIMPLE - PRESTO - First Order	193,95	205,35	5,55	217,74	10,92
SIMPLE - PRESTO - Second Order	193,41	205,35	5,82	217,74	11,17
SIMPLE - PRESTO - Power Law	193,52	205,35	5,76	217,74	11,12
SIMPLE - PRESTO - QUICK	193,37	205,35	5,84	217,74	11,19
SIMPLE - PRESTO - Third Order	193,26	205,35	5,89	217,74	11,24
SIMPLE - Linear - First Order	193,59	205,35	5,73	217,74	11,09
SIMPLE - Linear - Second Order	193,47	205,35	5,79	217,74	11,15
SIMPLE - Linear - Power Law	193,95	205,35	5,55	217,74	10,92
SIMPLE - Linear - QUICK	193,41	205,35	5,81	217,74	11,17
SIMPLE - Linear - Third Order	193,42	205,35	5,81	217,74	11,17
SIMPLE - Second Order - First Order	193,90	205,35	5,58	217,74	10,95
SIMPLE - Second Order - Second Order	193,40	205,35	5,82	217,74	11,18
SIMPLE - Second Order - Power Law	193,54	205,35	5,75	217,74	11,12
SIMPLE - Second Order - QUICK	193,35	205,35	5,84	217,74	11,20
SIMPLE - Second Order - Third Order	193,33	205,35	5,85	217,74	11,21
SIMPLE - Body Force - First Order	194,01	205,35	5,52	217,74	10,90
SIMPLE - Body Force - Second Order	193,53	205,35	5,76	217,74	11,12
SIMPLE - Body Force - Power Law	193,65	205,35	5,70	217,74	11,06
SIMPLE - Body Force - QUICK	193,48	205,35	5,78	217,74	11,14
SIMPLE - Body Force - Third Order	193,49	205,35	5,78	217,74	11,14

Pode ser verificado através da Tab. 6.21 que não existe uma diferença significativa entre as configurações escolhidas adotando o algoritmo SIMPLE para o acoplamento pressão-velocidade. O tempo de processamento nestes casos foi de aproximadamente 1 h e 30 min.

Na Tab. 6.22 são apresentados os resultados obtidos adotando o algoritmo PISO para o acoplamento pressão-velocidade em conjunto com os demais algoritmos para um movimento de exaustão com velocidade de 1,25 m/s. São apresentadas também as diferenças encontradas entre as soluções analítica e numérica.

Tabela 6.22 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo PISO como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de 1,25 m/s representando o movimento de exaustão

Algoritmos	Sem perda			Com perda	
	Numérica ΔP (Pa)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)
PISO - Standard - First Order	193,92	205,35	5,57	217,74	10,94
PISO - Standard - Second Order	193,48	205,35	5,78	217,74	11,14
PISO - Standard - Power Law	193,57	205,35	5,74	217,74	11,10
PISO - Standard - QUICK	193,41	205,35	5,82	217,74	11,17
PISO - Standard - Third Order	193,44	205,35	5,80	217,74	11,16
PISO - PRESTO - First Order	193,93	205,35	5,56	217,74	10,93
PISO - PRESTO - Second Order	193,39	205,35	5,82	217,74	11,18
PISO - PRESTO - Power Law	193,51	205,35	5,77	217,74	11,13
PISO - PRESTO - QUICK	193,35	205,35	5,85	217,74	11,20
PISO - PRESTO - Third Order	193,24	205,35	5,90	217,74	11,25
PISO - Linear - First Order	193,94	205,35	5,56	217,74	10,93
PISO - Linear - Second Order	193,46	205,35	5,79	217,74	11,15
PISO - Linear - Power Law	193,59	205,35	5,73	217,74	11,09
PISO - Linear - QUICK	193,41	205,35	5,82	217,74	11,17
PISO - Linear - Third Order	193,42	205,35	5,81	217,74	11,17
PISO - Second Order - First Order	-	205,35	-	217,74	-
PISO - Second Order - Second Order	-	205,35	-	217,74	-
PISO - Second Order - Power Law	-	205,35	-	217,74	-
PISO - Second Order - QUICK	-	205,35	-	217,74	-
PISO - Second Order - Third Order	-	205,35	-	217,74	-
PISO - Body Force - First Order	194,00	205,35	5,53	217,74	10,90
PISO - Body Force - Second Order	193,52	205,35	5,76	217,74	11,12
PISO - Body Force - Power Law	193,64	205,35	5,71	217,74	11,07
PISO - Body Force - QUICK	192,67	205,35	6,18	217,74	11,51
PISO - Body Force - Third Order	193,48	205,35	5,78	217,74	11,14

Através da Tab. 6.22, pode ser verificado, além de uma possível incompatibilidade entre os algoritmos PISO e *Second Order*, que não existe uma diferença significativa entre as configurações escolhidas adotando o algoritmo PISO para o acoplamento pressão-velocidade. O tempo de processamento nestas combinações esteve em torno de 2 h.

Na Tab. 6.23 são apresentados os resultados obtidos adotando o algoritmo SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade em conjunto com os demais algoritmos para um movimento de exaustão com velocidade de 1,25 m/s. São apresentadas também as diferenças encontradas entre as soluções analítica e numérica.

Tabela 6.23 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo SIMPLEC como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de 1,25 m/s representando o movimento de exaustão

Algoritmos	Sem perda			Com perda	
	Numérica ΔP (Pa)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)
SIMPLEC - Standard - First Order	193,70	205,35	5,68	217,74	11,04
SIMPLEC - Standard - Second Order	193,54	205,35	5,75	217,74	11,11
SIMPLEC - Standard - Power Law	193,66	205,35	5,70	217,74	11,06
SIMPLEC - Standard - QUICK	193,77	205,35	5,64	217,74	11,01
SIMPLEC - Standard - Third Order	193,49	205,35	5,78	217,74	11,14
SIMPLEC - PRESTO - First Order	193,74	205,35	5,65	217,74	11,02
SIMPLEC - PRESTO - Second Order	193,69	205,35	5,68	217,74	11,04
SIMPLEC - PRESTO - Power Law	193,75	205,35	5,65	217,74	11,02
SIMPLEC - PRESTO - QUICK	193,55	205,35	5,75	217,74	11,11
SIMPLEC - PRESTO - Third Order	193,69	205,35	5,68	217,74	11,05
SIMPLEC - Linear - First Order	193,94	205,35	5,56	217,74	10,93
SIMPLEC - Linear - Second Order	193,46	205,35	5,79	217,74	11,15
SIMPLEC - Linear - Power Law	193,58	205,35	5,73	217,74	11,10
SIMPLEC - Linear - QUICK	193,41	205,35	5,82	217,74	11,17
SIMPLEC - Linear - Third Order	193,41	205,35	5,81	217,74	11,17
SIMPLEC - Second Order - First Order	193,76	205,35	5,65	217,74	11,01
SIMPLEC - Second Order - Second Order	193,55	205,35	5,75	217,74	11,11
SIMPLEC - Second Order - Power Law	193,65	205,35	5,70	217,74	11,06
SIMPLEC - Second Order - QUICK	193,51	205,35	5,77	217,74	11,13
SIMPLEC - Second Order - Third Order	193,52	205,35	5,76	217,74	11,12
SIMPLEC - Body Force - First Order	194,00	205,35	5,53	217,74	10,90
SIMPLEC - Body Force - Second Order	193,52	205,35	5,76	217,74	11,12
SIMPLEC - Body Force - Power Law	193,63	205,35	5,71	217,74	11,07
SIMPLEC - Body Force - QUICK	193,47	205,35	5,78	217,74	11,14
SIMPLEC - Body Force - Third Order	193,48	205,35	5,78	217,74	11,14

Através da Tab. 6.23, pode ser verificado que não existe uma diferença significativa entre as configurações escolhidas adotando o algoritmo SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade. As simulações neste casos duraram um pouco mais de 2 h.

Na Tab. 6.24 são apresentados os resultados obtidos adotando o algoritmo *Coupled* para o acoplamento pressão-velocidade em conjunto com os demais algoritmos para um movimento de exaustão com velocidade de 1,25 m/s. São apresentadas também as diferenças encontradas entre as soluções analítica e numérica.

Tabela 6.24 – Comparação de resultados analíticos e numéricos considerando o algoritmo *Coupled* como acoplamento pressão-velocidade e uma velocidade de 1,25 m/s representando o movimento de exaustão

Algoritmos	Sem perda			Com perda	
	Numérica ΔP (Pa)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)	Analítica ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)
Coupled - Standard - First Order	193,96	205,35	5,55	217,74	10,92
Coupled - Standard - Second Order	193,50	205,35	5,77	217,74	11,13
Coupled - Standard - Power Law	193,60	205,35	5,73	217,74	11,09
Coupled - Standard - QUICK	193,44	205,35	5,80	217,74	11,16
Coupled - Standard - Third Order	193,46	205,35	5,79	217,74	11,15
Coupled - PRESTO - First Order	193,98	205,35	5,54	217,74	10,91
Coupled - PRESTO - Second Order	193,44	205,35	5,80	217,74	11,16
Coupled - PRESTO - Power Law	193,54	205,35	5,75	217,74	11,11
Coupled - PRESTO - QUICK	193,39	205,35	5,82	217,74	11,18
Coupled - PRESTO - Third Order	193,29	205,35	5,88	217,74	11,23
Coupled - Linear - First Order	193,98	205,35	5,54	217,74	10,91
Coupled - Linear - Second Order	193,49	205,35	5,78	217,74	11,13
Coupled - Linear - Power Law	193,61	205,35	5,72	217,74	11,08
Coupled - Linear - QUICK	193,44	205,35	5,80	217,74	11,16
Coupled - Linear - Third Order	193,45	205,35	5,80	217,74	11,16
Coupled - Second Order - First Order	193,93	205,35	5,56	217,74	10,94
Coupled - Second Order - Second Order	193,41	205,35	5,81	217,74	11,17
Coupled - Second Order - Power Law	193,55	205,35	5,75	217,74	11,11
Coupled - Second Order - QUICK	193,37	205,35	5,84	217,74	11,19
Coupled - Second Order - Third Order	193,35	205,35	5,85	217,74	11,20
Coupled - Body Force - First Order	194,04	205,35	5,51	217,74	10,88
Coupled - Body Force - Second Order	193,56	205,35	5,74	217,74	11,10
Coupled - Body Force - Power Law	193,67	205,35	5,69	217,74	11,05
Coupled - Body Force - QUICK	193,51	205,35	5,77	217,74	11,13
Coupled - Body Force - Third Order	193,52	205,35	5,76	217,74	11,12

Na Tab. 6.24, pode ser verificado que não existe uma diferença significativa entre as configurações escolhidas adotando o algoritmo *Coupled* para o acoplamento pressão-velocidade. O tempo de processamento destas combinações duraram cerca de 3 h.

Diante dos resultados apresentados, não foram encontradas diferenças significativas em relação à combinação utilizada em Gomes et al. (2009), que adotou o algoritmo PISO para o acoplamento pressão-velocidade, o esquema PRESTO para discretização da pressão e *Upwind* de primeira ordem para solucionar os demais termos advectivos. Sendo assim, neste trabalho optou-se por continuar com a recomendação da literatura.

6.3 Análise da qualidade da malha

A fim de reduzir as diferenças encontradas entre as soluções analítica e numérica, apresentadas nas Tabs. 6.14 e 6.15 da seção 6.1.2 desta pesquisa, foram realizadas simulações com as recomendações obtidas na seção 6.2, porém envolvendo a malha independente (210400 elementos) com aplicação do efeito de camada limite na mesma, ou seja, foi inserido um refinamento maior junto às paredes do domínio, como pode ser visto na Fig. 6.5.

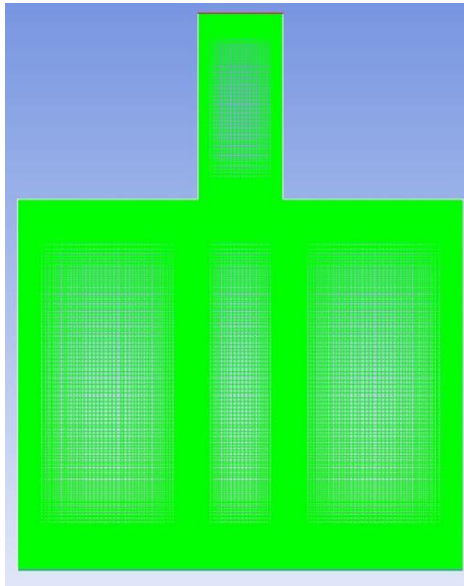


Figura 6.5 – Malha com refinamento maior nas bordas

Ao monitorar as diferenças de pressão total entre a entrada e a saída da CAO, foram obtidos os resultados disponíveis na Tab. 6.25 para o movimento de sucção e exaustão.

Tabela 6.25 – Resultados analíticos e numéricos para a diferença de pressão entre a entrada e a saída do dispositivo CAO considerando as perdas de carga

V_1 (m/s)	Sucção			V_1 (m/s)	Exaustão		
	Numérico ΔP (Pa)	Analítico ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)		Numérico ΔP (Pa)	Analítico ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)
-1,250	165,10	172,76	4,64	1,250	201,36	217,74	8,14
-1,000	169,58	175,47	3,47	1,000	193,70	204,26	5,45
-0,750	173,88	177,58	2,12	0,750	187,78	193,77	3,19
-0,500	177,42	179,08	0,94	0,500	183,62	186,27	1,44
-0,250	179,54	179,97	0,24	0,250	181,17	181,77	0,27
-0,100	180,07	180,21	0,08	0,100	180,47	180,50	0,02
-0,075	180,12	180,23	0,06	0,075	180,40	180,40	0,00
-0,050	180,16	180,25	0,04	0,050	180,34	180,32	0,01
-0,025	180,21	180,26	0,03	0,025	180,29	180,27	0,01
-0,010	180,23	180,26	0,02	0,010	180,26	180,26	0,00

É possível verificar, através da Tab. 6.25, que para o caso onde se aplicou a velocidade de absoluta 1,25 (m/s), a diferença entre solução analítica e numérica, cai de 10,93% (conforme Tab. 14), para 8,14%, para o movimento de exaustão e para sucção também apresenta redução, passa de 6,28% para 4,64%.

Já na Tab. 6.26 estão os resultados da solução analítica desconsiderando as perdas de carga e as diferenças apresentadas em comparação com a solução numérica.

Tabela 6.26 – Resultados analíticos e numéricos para a diferença de pressão entre a entrada e a saída do dispositivo CAO desconsiderando as perdas de carga

V_1 (m/s)	Sucção			V_1 (m/s)	Exaustão		
	Numérico ΔP (Pa)	Analítico ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)		Numérico ΔP (Pa)	Analítico ΔP (Pa)	Diferença ΔP (%)
-1,250	165,10	155,16	6,02	1,250	201,36	205,35	1,98
-1,000	169,58	164,20	3,17	1,000	193,70	196,32	1,35
-0,750	173,89	171,22	1,53	0,750	187,78	189,29	0,80
-0,500	177,42	176,24	0,66	0,500	183,62	184,27	0,35
-0,250	179,54	179,25	0,16	0,250	181,17	181,26	0,05
-0,100	180,07	180,10	0,02	0,100	180,47	180,42	0,03
-0,075	180,12	180,17	0,03	0,075	180,40	180,35	0,03
-0,050	180,16	180,22	0,03	0,050	180,34	180,30	0,02
-0,025	180,21	180,25	0,02	0,025	180,29	180,27	0,01
-0,010	180,23	180,26	0,02	0,010	180,26	180,26	0,00

Nota-se na Tab. 6.26 que os resultados para a diferença de pressão se aproximam ainda mais da solução analítica ao desconsiderar as perdas de carga.

Na Fig. 6.6 são apresentadas as curvas geradas a partir dos resultados analítico e numérico para a diferença de pressão entre a entrada da câmara e a saída da chaminé do dispositivo CAO, considerando e desconsiderando as perdas de carga na solução analítica. Cabe destacar, que o gráfico contém as soluções obtidas tanto para o movimento de sucção como para o de exaustão.

Através da Fig. 6.6, é possível observar que a curva (linha amarela) gerada pela malha com refinamento junto as paredes (ver Fig. 6.5), se aproxima bem mais da curva (linha preta) gerada pela solução analítica considerando as perdas, tanto pelo movimento de sucção como o de exaustão, se comparada com a curva (linha vermelha) produzida pela malha independente (sem refinamento de malha na prede). Nesse sentido, a malha com refinamento junto à parede será adotada para os estudo de caso realizado nesta pesquisa.

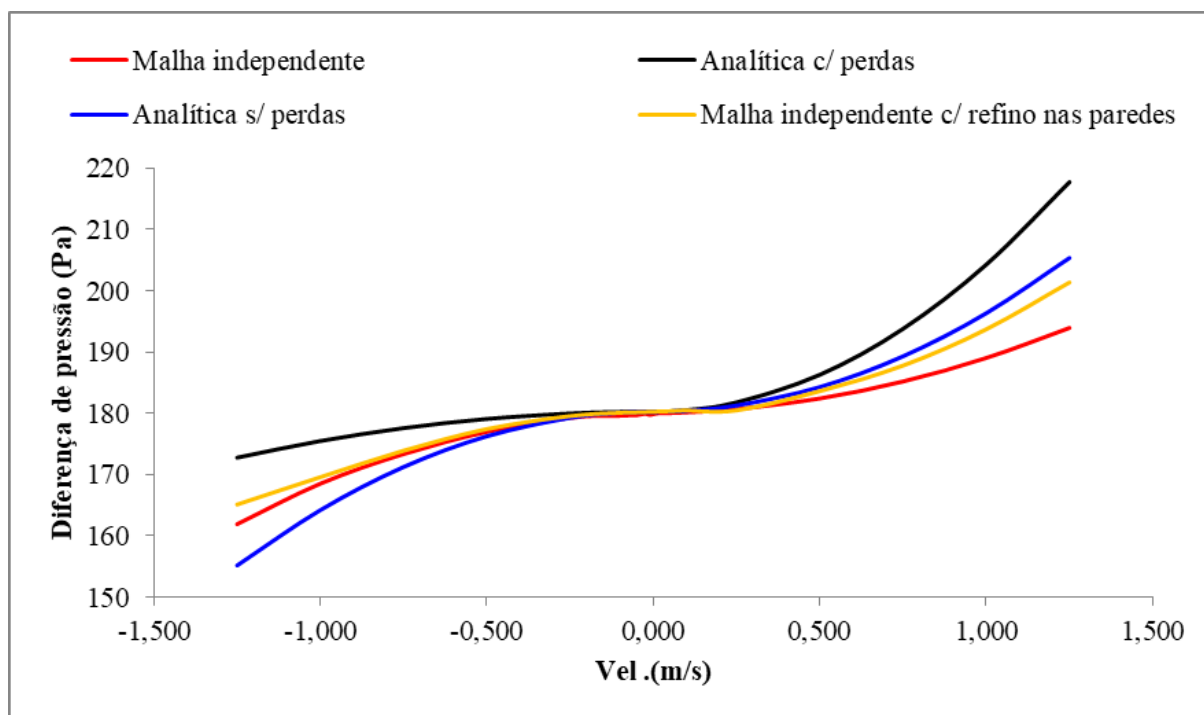


Figura 6.6 – Comparação entre as curvas

6.4 Estudo de caso

A partir da verificação do modelo computacional proposto, um estudo de caso foi desenvolvido considerando dados simulados de um estado de mar realístico. A ideia consiste em simular numericamente o princípio de funcionamento de um conversor CAO, utilizando dados discretos de tempo e velocidade, como condição de contorno, com o propósito de calcular o potencial hidropneumático do dispositivo e, também, a quantidade de energia absorvida pelo mesmo.

Para este estudo, os dados realísticos de estado de mar correspondem à região do cabo de Santa Marta, na cidade de Laguna/SC.

6.4.1 Obtenção dos dados realísticos de estado de mar

Os dados realísticos³ utilizados neste estudo de caso foram calculados a partir do trabalho desenvolvido por Oleinik (2017). Neste trabalho, o autor desenvolveu um método para transformar o espectro de variância do estado de mar em uma série temporal de elevação da superfície livre correspondente.

Em seu trabalho, Oleinik (2017) utilizou o modelo de estado de mar TOMAWAC, que simula a conservação da densidade de ação da onda que é, para cada frequência discreta de onda, a variância

³ Dados discretos de tempo e velocidade obtidos de um modelo que simula o estado de mar utilizando condições atmosféricas e oceânicas realísticas.

espectral dividida pela frequência angular da onda. Ele pode ser aplicado tanto em águas profundas como rasas e considera diversos processos físicos, no entanto não é recomendado para regiões costeiras complexas que possam gerar reflexão ou que necessitem de um resultado confiável da difração (Awk, 2017).

O TOMAWAC usa o Método dos Elementos Finitos em uma malha com elementos triangulares. Para resolver a ação da onda em cada ponto do domínio numérico o TOMAWAC discretiza as ondas em um número finito de frequências de onda, e também distribui as ondas em um número finito de direções de propagação de onda. Neste caso, o espectro recebe o nome de “Espectro Direcional” (Fig. 6.7).

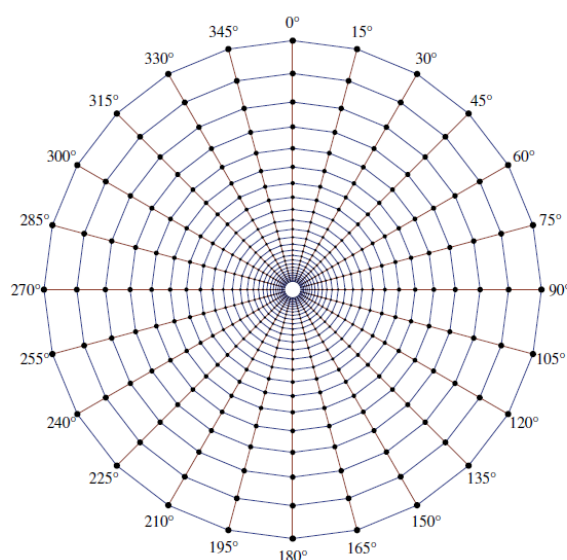


Figura 6.7 – Representação do espectro direcional do TOMAWAC em um ponto da malha –
Adaptada de Oleinik (2017)

Para que o TOMAWAC possa representar um estado de mar realístico, é necessário forçá-lo com condições de contorno condizentes com a realidade. Para simular a área de estudo é necessária uma malha numérica que se estende mais além, a fim de minimizar o efeito direto dos contornos da malha sobre a região de interesse.

A região escolhida da costa brasileira foi desde a cidade de Mostardas/RS no extremo sul, até Santos/SP na parte mais ao norte totalizando, aproximadamente 1 000 km de linha de costa. A malha também se estende aproximadamente 700 km em direção ao mar (Oleinik, 2017).

O método desenvolvido por Oleinik (2017) consiste em transformar o espectro de variância das ondas (domínio da frequência) em uma série temporal de elevação da superfície (domínio do tempo) utilizando a Transformada Inversa de Fourier. No entanto para fazer a transformação do

domínio da frequência para o domínio do tempo não basta apenas utilizar a Transformada Inversa de Fourier.

O espectro de variância das ondas contém apenas a informação da amplitude (a variância é metade do quadrado da amplitude: $var = a^2/2$), e a fase das ondas do oceano é considerada aleatória no intervalo fechado $[0, 2\pi]$ (Holthuijsen, 2007), é possível descrever a Transformada de Fourier da elevação da superfície $\mathcal{F}(\eta)$ como a combinação do espectro de amplitude discreto simulado pelo TOMAWAC e do espectro aleatório de fase das ondas. A elevação da superfície pode então ser obtida numericamente utilizando a Transformada Inversa de Fourier em $\mathcal{F}(\eta)$:

$$\eta = \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(\eta)) \quad (6.1)$$

onde \mathcal{F}^{-1} representa a Transformada Inversa de Fourier.

Utilizando o espectro discreto de ondas simulado pelo TOMAWAC no ponto situado a $-28,674^\circ$ de latitude e $-48,574^\circ$ de longitude, a uma profundidade de 69,13 m, o método de Oleinik (2017) descrito acima foi utilizado para fazer a transformação do espectro de variância discreto em uma série temporal discreta de elevação da superfície do mar. Essa série temporal de elevação da superfície foi então derivada numericamente em relação ao tempo para obter a série temporal de velocidade vertical da superfície utilizada neste trabalho. A derivada discreta da elevação da superfície pode ser escrita como:

$$w = \frac{\Delta\eta}{\Delta t} \quad (6.2)$$

onde a $\Delta\eta$ é a diferença da elevação da superfície entre dois dados adjacentes e Δt é o intervalo de tempo entre esses dados.

Essas velocidades foram calculadas no período de 24 h, entre as 15 h do dia 26/02/2014 e as 15 h do dia 27/02/2014, com intervalo de tempo de 1 s, totalizando 86400 dados de velocidade. A escolha destas 24 h de informação se deu em virtude de que neste intervalo de tempo, ocorreu a maior altura significativa registrada naquele ano. A Figura 6.8 mostra a altura significativa no ponto indicado durante o ano de 2014, e na Fig. 6.7 mostra as 24 h que foram escolhidas para obter os dados que seriam utilizados nesta pesquisa. A altura significativa foi calculada pelo TOMAWAC integrando o espectro direcional das ondas ao longo das direções θ_i e frequências f_i discretizadas (Fig. 6.7).

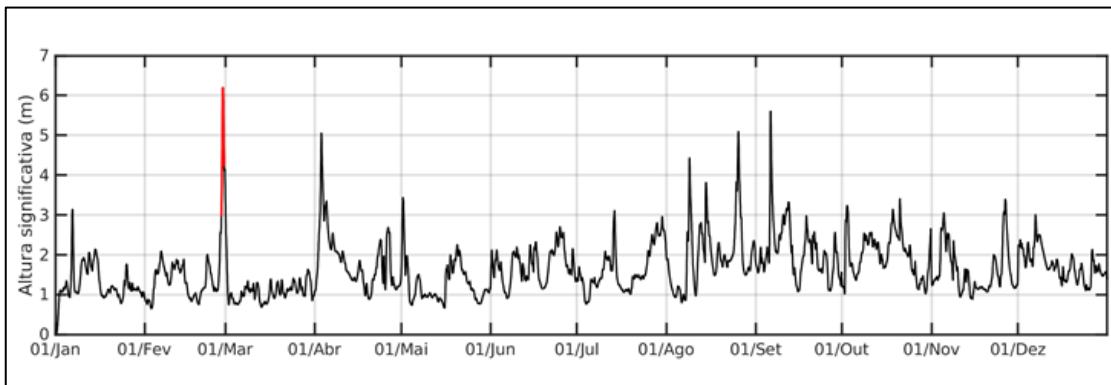


Figura 6.8 – Altura significativa no ponto durante o ano de 2014

Vale ressaltar que tanto a série temporal de elevação da superfície quanto a altura significativa são calculadas, de forma independente, a partir do espectro direcional do TOMAWAC. Embora ambas as informações representem o mesmo estado de mar, elas são independentes uma da outra.

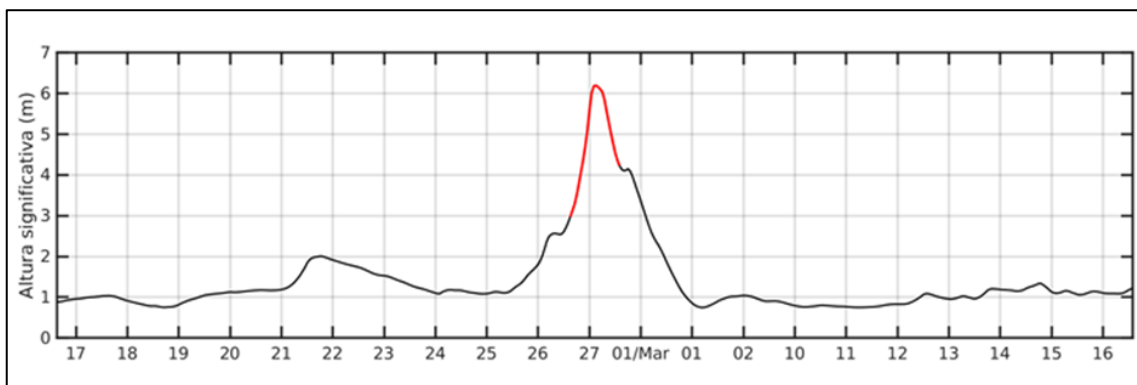


Figura 6.9 – A parte em destaque compreende entre 15h de 26/02/2014 até 15h de 27/02/2014

Outras informações que foram obtidas em Oleinik (2017) são referentes ao período médio e comprimento de ondas correspondente a cada hora, dentro do intervalo de tempo destacado na Fig. 6.9. A Tab. 6.27 apresenta esses valores.

Tabela 6.27 – Informações de período médio e comprimento de onda a cada hora

Hora	Período médio T_m (s)	Comprimento de onda L (m)	Hora	Período médio T_m (s)	Comprimento de onda L (m)
1	9,43	138,41	13	9,24	132,95
2	9,63	144,12	14	9,18	131,34
3	9,74	147,40	15	9,09	128,67
4	9,73	147,00	16	9,23	132,70
5	9,65	144,65	17	9,32	135,31
6	9,54	141,44	18	9,29	134,43
7	9,42	137,93	19	9,17	130,82
8	9,35	135,99	20	9,08	128,54
9	9,32	135,17	21	9,06	127,96
10	9,28	134,15	22	9,10	128,87
11	9,26	133,53	23	9,18	131,16
12	9,24	132,90	24	9,30	134,62

6.4.2 Teste de independência de malha

Neste teste, utilizou-se como velocidade prescrita na entrada do conversor CAO dados realísticos de estado de mar.. Destaca-se que para a realização do teste de independência de malha o arquivo *Table data* foi formado com apenas 30 s de dados discretos de tempo e velocidade. Na Tab. 6.28 são apresentadas as diferenças relativas entre as malhas, onde mostra que a malha 5 apresentou uma diferença relativa de 1,17%. Na Fig. 6.10 é possível notar que a partir da malha 5, a curva das velocidades começa a apresentar certa estabilidade, à medida em que o refino da malha vai aumentando.

Tabela 6.28 – Diferença relativa entre as malhas

Malha (j)	Quadriláteros (m)	Nº de Vol.	Vel. Max (m/s)	Diferença Relativa (%)
1	0,100	13150	0,9491594	10,61
2	0,060	36554	0,8216871	11,68
3	0,050	52600	0,9176559	7,43
4	0,040	82250	0,9857942	4,99
5	0,035	107822	1,0350310	1,18
6	0,030	146392	1,0471990	0,16
7	0,025	210400	1,0488750	-

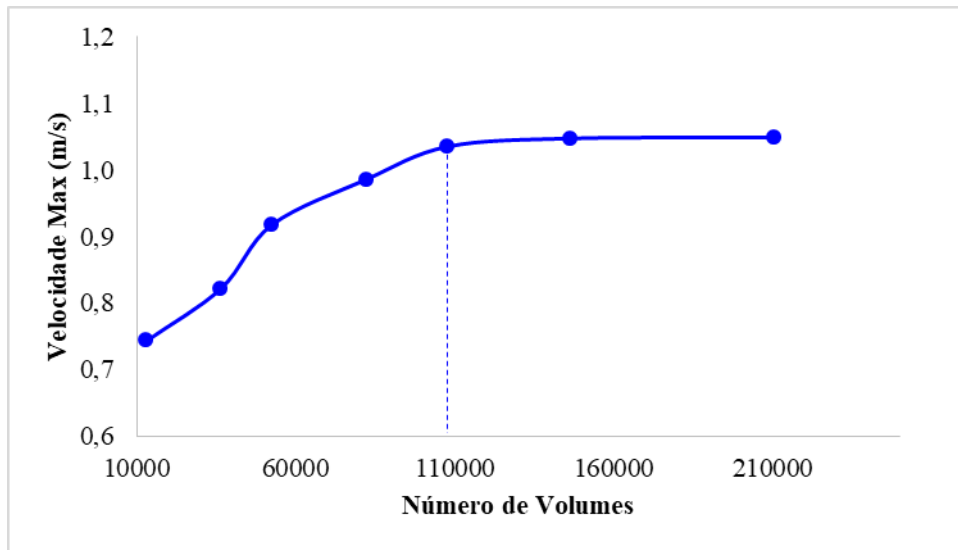


Figura 6.10 – O ponto em destaque, refere-se a malha 5 da Tab. 6.28

6.4.3 Teste de independência de passo de tempo

Para determinar o passo de tempo que seria utilizado, inicialmente se inseriu no ANSYS FLUENT 14.0 um arquivo *Table data* com um número menor de dados, ou seja, um arquivo que continha apenas os primeiros 180 s de dados discretos de tempo e velocidade, registrados a cada 1 s. A Fig. 6.11 apresenta a curva gerada pelos dados de entrada.

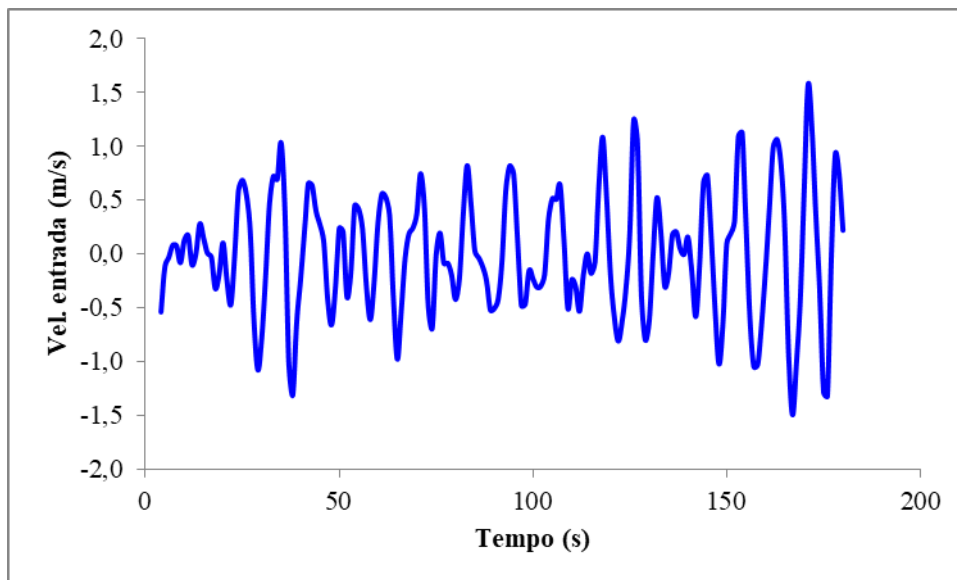


Figura 6.11 – Velocidades de entrada

Ainda neste teste, se fez uso de um artifício, visando facilitar a convergência da solução. Para isso a leitura dos primeiros segundos do arquivo *Table data*, foram discretizados com um passo de tempo menor. O tempo total da simulação corresponde ao produto entre o tamanho do passo de tempo (*Time Step Size*) versus o número de passos de tempo (*Number of Time Steps*), que são inseridas nos campos em vermelho da Fig. 6.12;

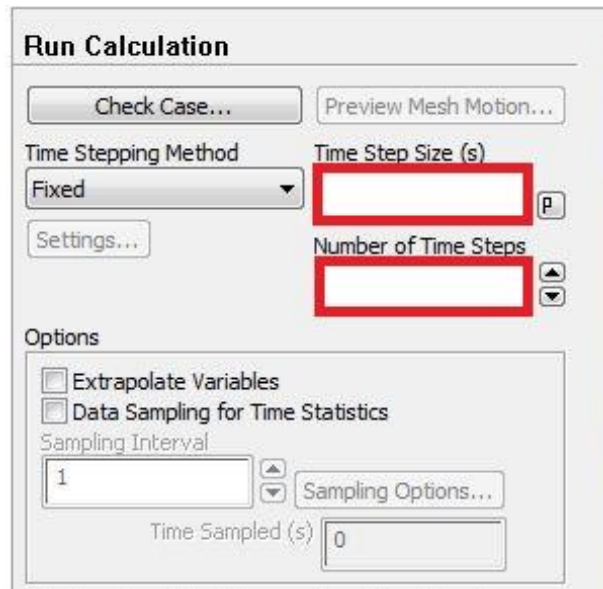


Figura 6.12 – Janela de configuração do espaço de tempo da simulação

Como foram analisados quatro casos, onde as velocidades de saída da CAO foram monitoradas a cada 0,5; 1,0; 2,0 e 3,0 s, então a discretização temporal para cada caso, se deu de acordo com a Tab. 6.29.

Tabela 6.29 – Discretização temporal de cada caso

	TSS	NTS	TSS x NTS
caso 1 $\Delta t = 0,5s$	0,001	1000	1
	0,01	100	1
	0,1	20	2
	0,5	352	176
		Total	180 s
	TSS	NTS	TSS x NTS
caso 2 $\Delta t = 1,0s$	0,001	1000	1
	0,01	100	1
	0,1	10	1
	1	177	177
		Total	180s
	TSS	NTS	TSS x NTS
caso 3 $\Delta t = 2,0s$	0,001	1000	1
	0,01	100	1
	0,1	10	1
	1	1	1
	2	88	176
		Total	180 s
	TSS	NTS	TSS x NTS
caso 4 $\Delta t = 3,0s$	0,001	1000	1
	0,01	100	1
	0,1	10	1
	3	59	177
		Total	180 s

Cabe destacar que a coluna que contem a sigla TSS, corresponde ao campo *Time Step Size* (s) da Fig. 6.12 e a sigla NTS, se refere a *Number of Time Steps* da Fig. 6.12. Após a determinação da discretização temporal e utilizando a malha independente, foram monitoradas as velocidades de saída da CAO, através de uma sonda numérica do tipo linha formada pelos pontos E(4,85; 12,5) e F(7,15; 12,5), ver na Fig. 5.1a.

Nesta etapa, deve-se comparar o comportamento das curvas geradas pelas simulações, representadas pelas Figs. 6.13(a, b, c e d), com a curva dos dados de entrada representada na Fig. 6.11.

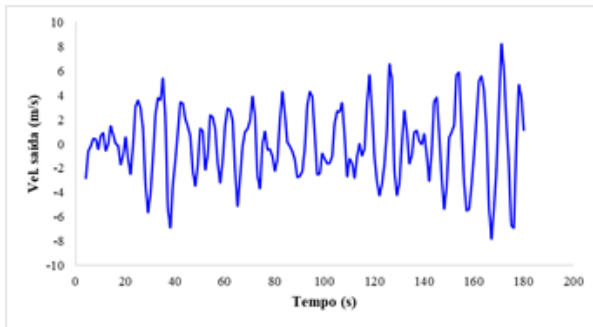


Figura 6.13(a) – Velocidades de saída registradas a cada 0,5 s

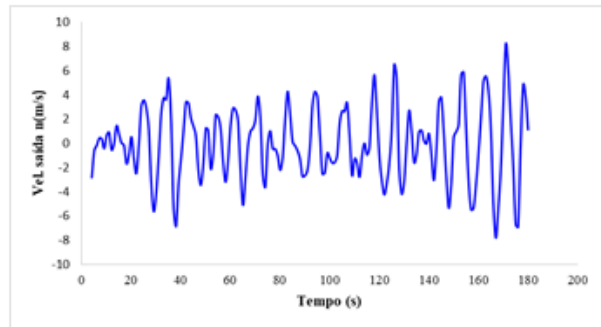


Figura 6.13(b) – Velocidades de saída registradas a cada 1,0 s

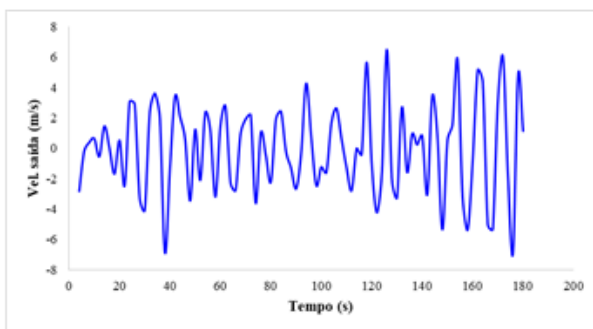


Figura 6.13(c) – Velocidades de saída registradas a cada 2,0 s

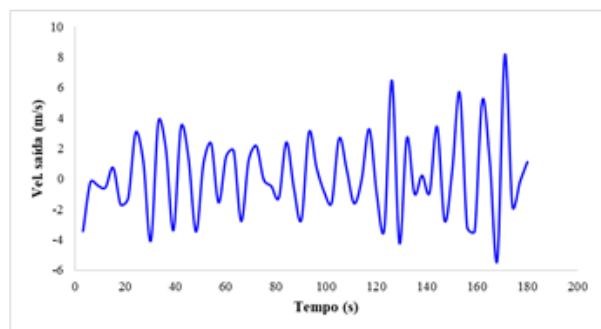


Figura 6.13(d) – Velocidades de saída registradas a cada 3,0 s

Figura 6.13 – Velocidades de saída registradas em cada caso

Ao realizar a comparação, nota-se que não há diferença significativa no comportamento das curvas representadas nas Figs. 6.13(a) e 6.13(b) em relação à curva plotada na Fig. 6.11. É importante destacar que, as curvas das Figs. 6.13(a) e 6.13(b) são visualmente idênticas, porém a Fig. 6.13(a) conta com o dobro de dados que a Fig. 6.13(b) e, o que se pode destacar é que, esses dados a mais não alteram o comportamento gráfico se comparado com a curva da Fig. 6.13(b). Foi percebida uma pequena diferença na curva da Fig. 6.13(c) em relação à curva da Fig. 6.11. Essa diferença é ainda mais acentuada ao se comparar as curvas da Fig. 6.13(d) com a da Fig. 6.11. As diferenças observadas representam uma perda de dados, e isso é o argumento para não utilizar as discretizações de tempo dos casos 3 e 4 da Tab. 6.29. Diante das observações apontadas, se optou por utilizar a discretização de tempo de acordo com o caso 2 da Tab. 6.29.

6.4.4 Simulação numérica empregando os dados realísticos de estado de mar

Na simulação numérica deste estudo de caso, foi aplicado o modelo computacional proposto, onde se inseriu⁴ um arquivo *Table data* com 86400 dados discretos de tempo e velocidade, obtidos conforme o tópico 6.4.1 deste estudo de caso, como condição de contorno de velocidade vertical prescrita. Também foi utilizada a malha considerada independente para esta etapa do estudo, ou seja, com 107822 elementos, como indicado na Tab. 6.28, considerando o efeito de camada limite. A discretização temporal utilizada foi definida conforme o caso 2 da Tab. 6.29. Para monitorar os dados de vazão mássica, pressão total, pressão estática e pressão dinâmica, um monitor do tipo linha, localizado na região central da chaminé do domínio computacional, formada pelos pontos E e F, como ilustra a Fig. 5.1a, foi adotado. O Apêndice 2 ilustra a configuração do modelo no ANSYS FLUENT 14.0. Com relação ao tempo de processamento necessário para simular essas 24h, foi de aproximadamente 24 dias.

A partir dos dados de pressão total e vazão mássica aplicados, a Eq. (3.32) foi empregada para o cálculo do potencial hidrostático instantâneo do dispositivo. Com a Eq. (3.33) foram determinadas as médias de potência para cada hora dentro do período de 24 h que foi simulado. Esses resultados para cada hora podem ser consultados na Tab. 6.30:

Tabela 6.30 – Potencial hidrostático obtido por hora

Hora	Potência (W)	Hora	Potência (W)	Hora	Potência (W)
1	144,00	9	599,91	17	899,59
2	176,21	10	852,32	18	837,56
3	178,97	11	846,14	19	837,15
4	241,59	12	879,64	20	737,76
5	317,78	13	1021,8	21	668,14
6	408,11	14	986,11	22	528,68
7	430,65	15	964,55	23	509,23
8	514,01	16	1076,34	24	515,71
				Média	632,15

É possível determinar a quantidade de ondas que incidem no dispositivo CAO através da razão entre o intervalo de tempo de 1 h (3600 s) pelo período médio das ondas em cada hora, os valores obtidos são expostos na Tab. 6.31, onde são estimados os grupos de ondas que compõem cada hora deste estudo.

⁴ O Apêndice 2 desta pesquisa ilustra como é realizada a inserção do arquivo *Table data* no ANSYS FLUENT 14.0

Tabela 6.31 – Grupo de ondas por hora

Hora	Grupo ondas	Hora	Grupo ondas	Hora	Grupo ondas
1	382	9	386	17	386
2	374	10	388	18	387
3	369	11	389	19	393
4	370	12	390	20	396
5	373	13	390	21	397
6	377	14	392	22	396
7	382	15	396	23	392
8	385	16	390	24	387

Pode-se obter, através do produto entre o grupo de ondas pela potência instantânea a energia absorvida pelo dispositivo por hora, conforme segue a Tab. 6.32

Tabela 6.32 – Energia absorvida por hora

Hora	Energia absorvida (kWh)	Hora	Energia absorvida (kWh)	Hora	Energia absorvida (kWh)
1	54,95	9	231,73	17	347,30
2	65,86	10	330,50	18	324,43
3	66,13	11	328,88	19	328,80
4	89,39	12	342,73	20	292,37
5	118,56	13	398,04	21	265,39
6	154,03	14	386,54	22	209,24
7	164,64	15	382,04	23	199,75
8	197,93	16	419,69	24	199,62
Total					5.898,55

Pode-se observar através da Tab. 6.32 que o dispositivo foi capaz de absorver aproximadamente 5.898,55 kWh de energia para o período de tempo simulado. Com este dado, é possível determinar a quantidade de casas que poderiam ser abastecidas neste dia. Para isto, basta comparar o consumo residencial diário de energia com a energia disponibilizada pelo dispositivo, já que o período simulado foi de um dia. A obtenção desta informação se deu através da divisão da quantidade de kWh estimada mensalmente, por 30 que é o número de dias comercial.

De acordo com o Anexo 1 desta pesquisa, uma residência com seis cômodos pode consumir cerca de 370,39 kWh por mês, ao dividir esse valor por 30, temos o consumo diário médio de uma casa. Tendo em vista que o dispositivo foi capaz de absorver 5.898,55 kWh para o dia que foi

simulado, e que uma residência de seis cômodos consome em média 12,35 kWh por dia. Foi possível constatar que para o clima de ondas da região do cabo de Santa Marta/SC, o dispositivo seria capaz de abastecer 477 moradias.

7. CONCLUSÃO

Por meio desta pesquisa foi possível realizar um levantamento das diferentes metodologias que vem sendo utilizadas para a pesquisa de conversores de energia das ondas do tipo CAO, através do estado da arte.

A verificação do modelo proposto, ocorreu em duas etapas, inicialmente foi realizada uma comparação entre os dados da velocidade de saída, obtidos através da simulação numérica aplicando o modelo em questão, com os resultados apresentados em Gomes et al. (2009), utilizando um domínio computacional em escala de laboratório. Foi observada uma concordância entre as curvas na Fig. 6.1, para o presente estudo, e a Metodologia Ar, dando assim confiabilidade para a utilização da ferramenta *Table data*. No que se refere à comparação entre a curva gerada pela Metodologia VOF e a do presente estudo, pode-se dizer que, mesmo apresentando certa diferença, o que já era esperado, pois são abordagens diferentes, ambas metodologias apresentaram a mesma tendência de variação da velocidade.

A segunda etapa da verificação consistiu em comparar as quedas de pressão (entre a entrada e saída da CAO) obtidas através da simulação numérica, com a solução analítica tanto para os movimentos de exaustão como para os de sucção, considerando um domínio computacional em escala real. Com os resultados obtidos, observou-se que as soluções analítica e numérica possuem certa diferença que aumenta conforme os valores absolutos de velocidade também aumentam. Ainda no processo de verificação, pode-se conferir na Tab. 6.16 e Fig. 6.4 que as velocidades de saída da CAO, obtidos pelo modelo numérico apresentado, representam com precisão a continuidade do escoamento no interior do domínio computacional. Com isso, é possível considerar que o modelo foi devidamente verificado.

Além disso, foram simulados casos onde se testou diferentes combinações entre os esquemas de solução disponíveis no ANSYS FLUENT 14.0, para o acoplamento pressão-velocidade⁵, discretização da pressão⁶ e termos advectivos⁷. Com isso, gerou-se 100 casos para o movimento de sucção e mais 100 casos para o movimento de exaustão, totalizando 200 simulações. A intenção era encontrar uma configuração que fosse capaz de reduzir as diferenças entre as soluções analítica e numérica, e também obter tempo de processamento menor. Pode-se constatar que, na maioria dos casos simulados, não se obteve diferenças significativas nas diferenças de pressão, tão pouco no tempo de processamento. Cabe destacar que, nesta análise, também foi possível perceber a

⁵ Dispõe de quatro algoritmos

⁶ Dispõe de cinco algoritmos

⁷ Dispõe de cinco algoritmos

incompatibilidade entre os algoritmos PISO e o *Second Order*. Diante destas constatações, a recomendação literária foi mantida no modelo, ou seja, utilizar o algoritmo PISO para o acoplamento pressão-velocidade, o método PRESTO para a discretização da pressão e o esquema de advecção *upwind* de primeira ordem para os termos advectivos.

Outra análise realizada nesta pesquisa refere-se à qualidade da malha independente. Foi possível constatar que, ao inserir o efeito de camada limite na malha independente, as diferenças entre solução analítica e numérica, quando se considerou o maior valor absoluto da velocidade⁸, diminuíram tanto para o movimento de sucção como de exaustão para o caso em que se consideram as perdas de carga na solução analítica. Com base na redução da diferença entre os resultados, se inseriu a malha com esta configuração ao modelo.

No estudo de caso, foi analisada a capacidade do dispositivo em absorver energia, pode-se constatar que o mesmo possui uma potência média diária de 632,15 W e observou-se também que, para o período de tempo simulado, o dispositivo foi capaz de absorver aproximadamente 5.898,55 kWh de energia. Tendo em vista que se uma residência com característica de consumo de energia similar a apresentada no Anexo 1, onde foi apontado um consumo de 370,39 kWh por mês, é possível estimar que o dispositivo em estudo, seria capaz de abastecer cerca de 477 casas, para um clima de ondas da região do cabo de Santa Marta/SC, o que é uma ordem de grandeza coerente. Isso indica que a presente modelagem é promissora em aplicações mais realísticas.

Por fim, é importante ressaltar que, mesmo possuindo algumas simplificações, como utilizar uma abordagem 2D e considerar apenas o escoamento do ar, o potencial mostrado pelo modelo computacional apresentado nesse estudo, indica que sua capacidade em fornecer boa precisão do princípio de funcionamento do dispositivo, bem como, a utilização dos dados fornecidos pelo trabalho de Oleinik (2017), deu ao modelo características realísticas do clima de ondas da região estudada.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são feitas algumas sugestões que podem dar prosseguimento ao trabalho desenvolvido ou até complementar o mesmo.

- Implementar ao modelo o uso de malha móvel, para reproduzir o movimento de pistão;
- Desenvolver uma avaliação geométrica (dimensão e formato) para o conversor CAO;
- Considerar a presença da turbina no interior do dispositivo;

⁸ O maior valor absoluto, para etapa de cálculo de diferença de pressão foi de 1,25

- Recomenda-se uma análise deste modelo, utilizando os esquemas de solução SIMPLE para o acoplamento pressão velocidade, linear para discretização da pressão e *Power Law* para os demais termos advectivos.

8. REFERÊNCIAS

- AWK, T. (2017). **Tomawac User Manual Version 7.2**. The TELEMAC-Mascaret Consortium, 7.2.3 edition.
- BARAKAZ, A. EL, MARJANI, A. EL, “**A one-dimensional flow analysis in OWC device for wave energy conversion**”. 3rd Internacional Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC’15) Marrakech – Ouarzazate, Morocco, 2015.
- BARAKAZ, A. EL, MARJANI, A. EL, ”**The oscillatory free water surface motion inside OWC chambre for wave energy conversion**”. In: *Proceedings of 2016 IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference*, IRSEC 2016.
- BOUALI, B., LARBI, S., “**Contribution to geometry optimization of an oscillating water column wave energy converter**”. *Energy Procedi.*, Vol. 36, pp. 565-573, 2013.
- BOUALI, B., LARBI, S., “**Sequential optimization and performance prediction of an oscillating water column wave energy converter**” *Ocean Engineering*, vol. 131, pp. 162-173, 2017.
- BOUHRIM, H., EL MARJANI A., “**On numerical Modeling in OWC systems for wave energy conversion**”. 3rd Internacional Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Internacional. IEEE, pp. 431-435, 2015.
- BOUHRIM H., EL MARJANI A., “**On the Flow Simulation Based on Piston models in OWC Devices for Wave Energy Conversion**” . in *Proceedings of 2016 IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference*, IRSEC 2016.
- CARVALHO, J. T.; **Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil. 2010;
- CLEMENT, A.; MCCULLEN, P.; FALCAO, A.; FIORENTINO, A.; GARDNER, F.; HAMMARLUND, K.; et al. Wave energy in Europe: current status and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, pp. 405-431, 2002.
- CONDE, J.M.P., GATO, L.M.C., “**Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter**”, *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 2637-2644, 2008.
- CRESPO, A. A., **Estatística Fácil**. 18º ed. São Paulo: Saraiva 2002;
- CRUZ, J.M.B.P., e SARMENTO, A.J.N.A., **Energia das ondas**. Instituto do Ambiente, Alfragide, 2004.
- ÇENGEL, Y. A., e CIMBALA, J. M., “**Mecânica dos fluidos – fundamentos e aplicações**”, Editora McGraw-Hill – São Paulo, 2007.
- DANTAS, C. E. B.; **Estudo dos conversores de energia ondomotriz em energia elétrica**. Projeto

de Graduação (Bacharel em Engenheiro Mecânico) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil. 2015;

DIZADJI, N.; SAJADIAN, S.E., “**Modeling and optimization of the chambre of OWC sistem**”. *Energy*, V. 36, pp.2360-2366, 2011;

DOS SANTOS, E.D., MACHADO, B.N., LOPES, N., SOUZA, J.A., TEXEIRA, P.R.F., GOMES, M.N., ISOLDI, L.A., E ROCHA, L.A.O., 2013, “**Constructal Design of Wave Energy Converters**”. In: *Constructal Law and the Unifying Principle of Design* - Rocha, L. A. O.; Lorente, S.; Bejan, A. (Org.). Understanding Complex Systems. 1ed. New York: Springer New York, vol. 1, pp. 275-294.

EDMINISTER, J. A., “**Circuitos elétricos**”, 2ª ed – São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1991;

FALCÃO, A.F.O., **Wave energy utilization: A review of the tecnologies**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp.899-918, 2010.

FALCÃO, A.F.O., e HENRIQUES, J.C.C., **Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review**, *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1391-1424, 2016.

FLUENT (version 14.0), 2014, User Manual, ANSYS Inc.;

FORTUNA, A. de O., “**Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações**”, São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, (acadêmica; 30), 2000.

GASPARATOS, A., DOLL, C.N.H., ESTEBAN, M., AHMED, A., OLANG, T. A., “**Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy**”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 161-184, 2017.

GOMES, M. das N., OLINTO, C.R., ISOLDI, L.A., SOUZA, J.A., ROCHA, L.A.O., “**Computational modeling of the air-flow in na oscillating water column system**”. In: *Proceedings of 20th Internacional Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*, Gramado, RS, Brasil, p. 1-10, 2009.

GOMES, M. DAS N. “**Modelagem computacional de um dispositivo coluna d’água oscilante para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica**, Master thesis, Rio Grande, RS, Brazil: Universidade Federal do Rio Grande – FURG, 2010.

GOMES, M. DAS N., “**Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante**”, Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil, 2014.

HIRT, C.W., NICHOLS, B.D., 1981. “**Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries**”, *Journal of Computational Physics*, vol. 39, nº 1, pp. 201-225;

HOLTHUIJSEN, L.H., 2007. **Waves in Oceanic and Coastal Waters**. 1ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, 387 p;

- HORKO, M., 2007, "CFD Optimizations of an Oscillating Water Column Energy converter", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência, Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Western, Austrália;
- JOHNSON, D. E.; HILBURN, J. L.; JOHNSON, J. R.; "Fundamentos de análise de circuitos elétricos", Pretence-Hall do Brasil LTDA, 4ª ed. – Rio de Janeiro, 1994.
- LÓPEZ, I.; ANDREU, J.; CEBALLOS, S.; ALEGRÍA, I. M.; KORTABARRIA, I. Review of wave energy Technologies and the necessary power-equipment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, pp. 413-434, 2013.
- MAHNAMFAR F., ALTUNKAYNAK A., "Comparison of numerical and experimental analyses for optimizing the geometry of OWC systems", *Ocean Engineering*, vol. 130, pp. 10-24, 2017.
- MALISKA, C.R., "Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional", LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2004.
- MARJANI, A.EL, CASTRO F., BAHAJI, M., FILALI B., "3D Unsteady Flow Simulation in na OWC Wave Converter Plant". ICREPQ'06. Palma de Mallorca, Spain, 2006;
- MARJANI, A., RUIZ, F.C., RODRIGUEZ, M.A., E SANTOS, M.T.P., "Numerical modelling in wave energy conversion systems", *Energy*, vol. 33, pp. 1246-1256, 2008.
- OLEINIK, P.H., "Desenvolvimento e aplicação de um modelo acoplável de conversão de energia de ondas", Trabalho de Conclusão de Curso. Rio Grande, RS, Brazil: Universidade Federal do Rio Grande – FURG, 2017.
- OLIVEIRA, L., TEXEIRA, P.R.F., SANTOS, E.D. dos, ISOLDI, L.A. "Constructal design applied to the geometric optimization of the hydropneumatic chambre dimensions of na oscillating water column wave energy device", In Proceedings of the 11th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, Brasov, Romenia, 2012;
- PACESILA, M., BURCEA, S. G., COLESCA.; "Analysis of renewable energies in European Union", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 156-170, 2016.
- PERDIGÃO, J., SARMENTO, A., "Overall-efficiency optimisation in OWC devices", *Applied Ocean Research*, Vol. 25, pp.157-166, 2003;
- REZANEJAD K., GUEDES SOARES C., LÓPEZ I., CARBALLO R., "Experimental and Numerical Investigation of the Hydrodynamic Performance of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter", *Renewable Energy*, Vol. 106, pp. 1-16, doi:10.1016/j.renene.2017.01.003, 2017.
- RUSU, L. e ONEA, F. "The performance of some state-of-the-art wave energy converters in locations with the worldwide highest wave power". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75:1348–1362, 2017;
- SCHAEFFER, R. **Revolução energética: Rumo a um Brasil com 100% de energias limpas e renováveis**. São Paulo, (Prefácio, Pósfacio/Prefácio), 2016.

- TEIXEIRA, P.R.F., DAVYT, D.P., DIDIER, E., RAMALHAIS, R., “**Numerical simulation of na oscillating water column devide using a code based on Navier-Stokes equations**”, *Energy*, Vol.61, pp.513-530, 2013.
- TESKE, S., **Revolução energética: a caminho do desenvolvimento limpo**. São Paulo, Greenpeace, 2013.
- VERSTEEG, H.K., MALALASEKERA, W., 2007, “**An introduction to computational fluid dynamics – The finite volume method**”, Pearson, Inglaterra.
- VYZIKAS T., DESHOULIÈRES S., GIROUX O., BARTON M., GREAVES D., “**Numerical study of fixed Oscillating Water Column with RANS-type two-phase CFD model**”, *Renewable Energy*, Vol. 102, Part B, pp. 294-305 doi: 10.1016/j.renene.2016.10.044, 2017.
- WANG, L., ISBERG, J., e TEDESCHI, E. “**Review of control strategies for wave energy conversionsystems and their validation: the wave-to-wire approach**”. *Renewable and SustainableEnergy Reviews*, 81:366–379, 2018;
- ZHANG, Y., ZOU, Q.P., GREAVES, D., “**Air-water two-phase flow modelling of hydrodynamic performance of na oscillating water column devide**”, *Renewable Energy*, Vol. 41, pp. 159-170, 2012.

ANEXO 1 – Resultado da simulação de consumo de energia elétrica mensal para uma casa com 06 cômodos



Simulador de Consumo

*Verificar os valores no site

Sala

Item:	Unidades:	Potência em Watts:	Tempo de uso:	Período:	kWh por mês:	Custo por mês (R\$):
Lâmpada Fluorescente	1	9	5	Horas/Dia	1,35	R\$ 0,92
Televisor	1	100	5	Horas/Dia	15,00	R\$ 10,26
TOTAL:					16,35	R\$ 11,18

Quarto

Item:	Unidades:	Potência em Watts:	Tempo de uso:	Período:	kWh por mês:	Custo por mês (R\$):
Lâmpada Fluorescente	1	9	5	Horas/Dia	1,35	R\$ 0,92
Televisor	1	100	6	Horas/Dia	18,00	R\$ 12,31
Ventilador	1	120	12	Horas/Dia	43,20	R\$ 29,55
TOTAL:					62,55	R\$ 42,78

Lavanderia

Item:	Unidades:	Potência em Watts:	Tempo de uso:	Período:	kWh por mês:	Custo por mês (R\$):
Lâmpada Fluorescente	1	9	5	Horas/Dia	1,35	R\$ 0,92
Máquina de lavar	1	350	3	Horas/Dia	31,50	R\$ 21,55
TOTAL:					32,85	R\$ 22,47

Cozinha

Item:	Unidades:	Potência em Watts:	Tempo de uso:	Período:	kWh por mês:	Custo por mês (R\$):
Forno Elétrico (mini)	1	800	10	Minutos/Dia	4,00	R\$ 2,74
Geladeira	1	130	24	Horas/Dia	93,60	R\$ 64,03
Lâmpada Fluorescente	1	9	5	Horas/Dia	1,35	R\$ 0,92
Microondas	1	1200	15	Minutos/Dia	9,00	R\$ 6,16
TOTAL:					107,95	R\$ 73,85

Banheiro

Item:	Unidades:	Potência em Watts:	Tempo de uso:	Período:	kWh por mês:	Custo por mês (R\$):
-------	-----------	--------------------	---------------	----------	--------------	----------------------

Chuveiro	1	3500	30	Minutos/Dia	52,50	R\$ 35,92
Lâmpada Fluorescente	1	9	5	Horas/Dia	1,35	R\$ 0,92
Chapinha/Prancha alisadora	1	1500	20	Minutos/Dia	15,00	R\$ 10,26
Secador de cabelo	1	1400	10	Minutos/Dia	7,00	R\$ 4,79
TOTAL:					75,85	R\$ 51,89

Escritório

Item:	Unidades:	Potência em Watts:	Tempo de uso:	Período:	kWh por mês:	Custo por mês (R\$):
Carregador de Celular	1	1.5	1	Horas/Dia	0,05	R\$ 0,03
Computador	1	300	6	Horas/Dia	54,00	R\$ 36,94
Lâmpada Fluorescente	1	9	5	Horas/Dia	1,35	R\$ 0,92
modem	1	27	24	Horas/Dia	19,44	R\$ 13,30
TOTAL:					74,84	R\$ 51,19

Resultado da Simulação - tarifa com data de: 24/06/2017

Soma total dos aparelhos elétricos adicionados em cada cômodo

Consumo aproximado da conta de luz: Valor aproximado:

370,39 kWh

R\$ 253,36

APÊNDICE 1 – Modelo de arquivo inserido no ANSYS FLUENT 14.0, como condição de contorno, contendo valores discretos de tempo (s) e velocidade (m/s).

```
tabledata_dt_1.0 - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
((Velocity transient 86398 0)
(time
1.0
2.0
3.0
.
.
.
86396.0
86397.0
86398.0
)
(Vy
0.655729
0.007795
-0.653940
.
.
.
-0.770946
-0.211891
0.792161
)
)
```

APÊNDICE 2 – Passo a passo, da configuração do modelo no ANSYS FLUENT 14.0.

Como o modelo é 2D, o mesmo é informado logo na primeira janela do software. Outro passo prudente logo no início é, informa ao programa a pasta onde estão os arquivos como malha e o *Table data* (ver Fig. 1).

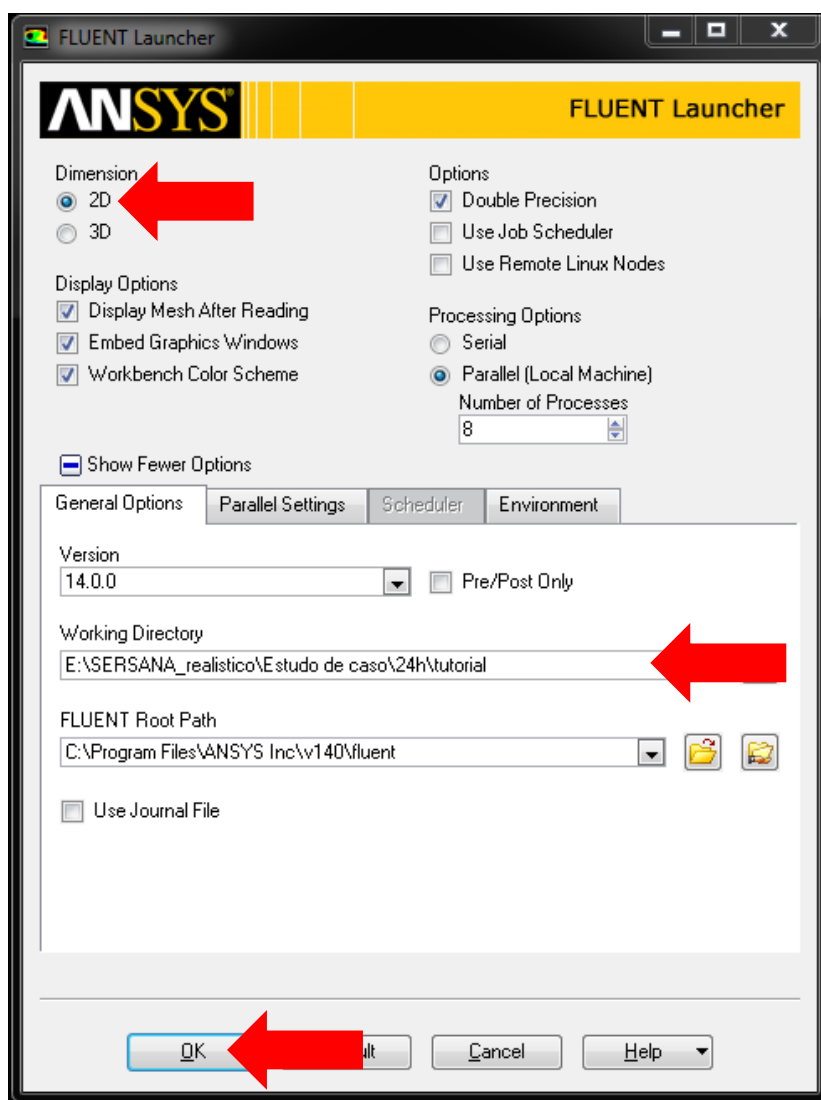


Figura A.1 – Janela de entrada do ANSYS FLUENT 14.0

O passo seguinte, consiste em inserir a malha no software. As Figs. 2 e 3, mostram como é feita essa etapa.

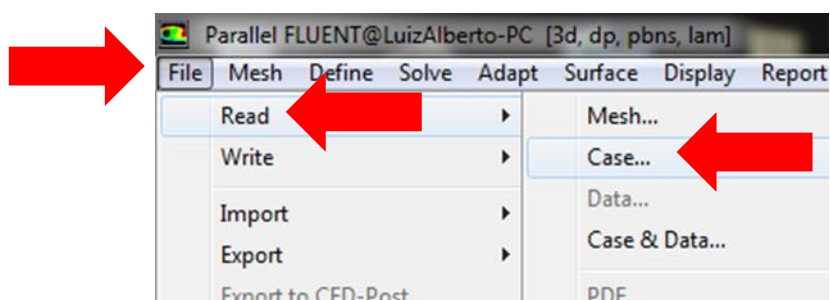


Figura A.2 – File >> Read >> Case

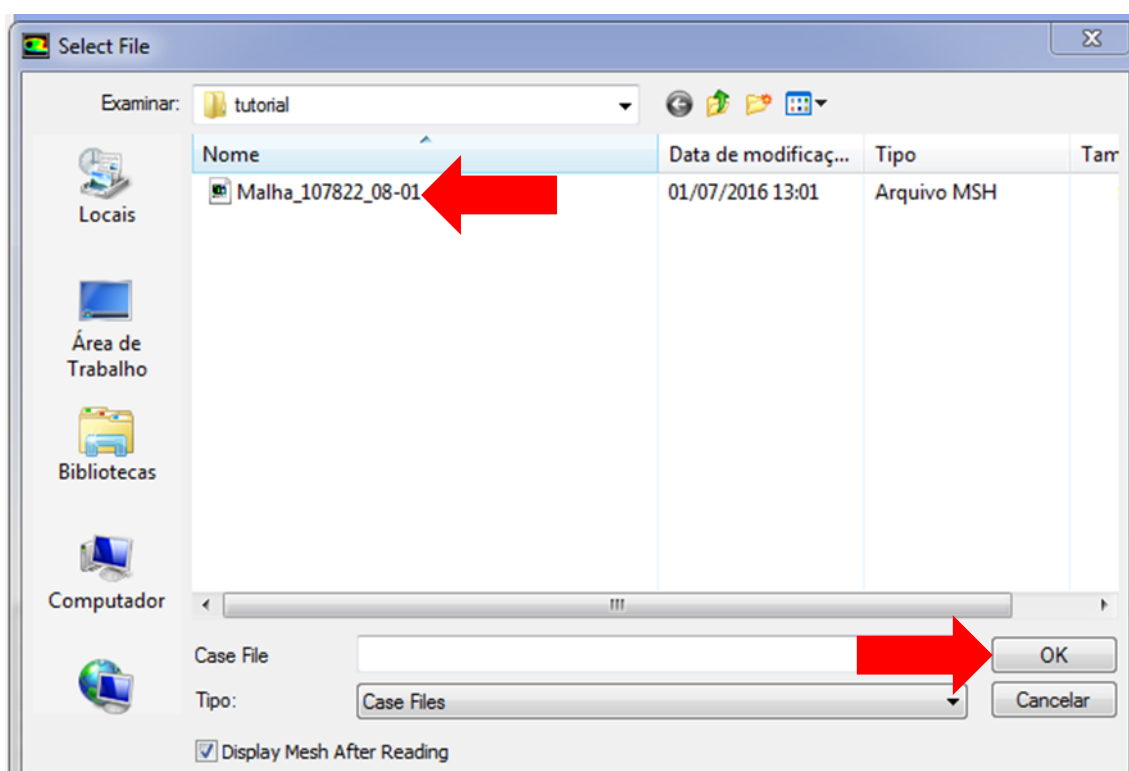


Figura A.3 – Seleciona a malha

Tendo em vista, que o modelo é transiente e a gravidade é configurada negativa, na Fig. 4 isto é ilustrado.

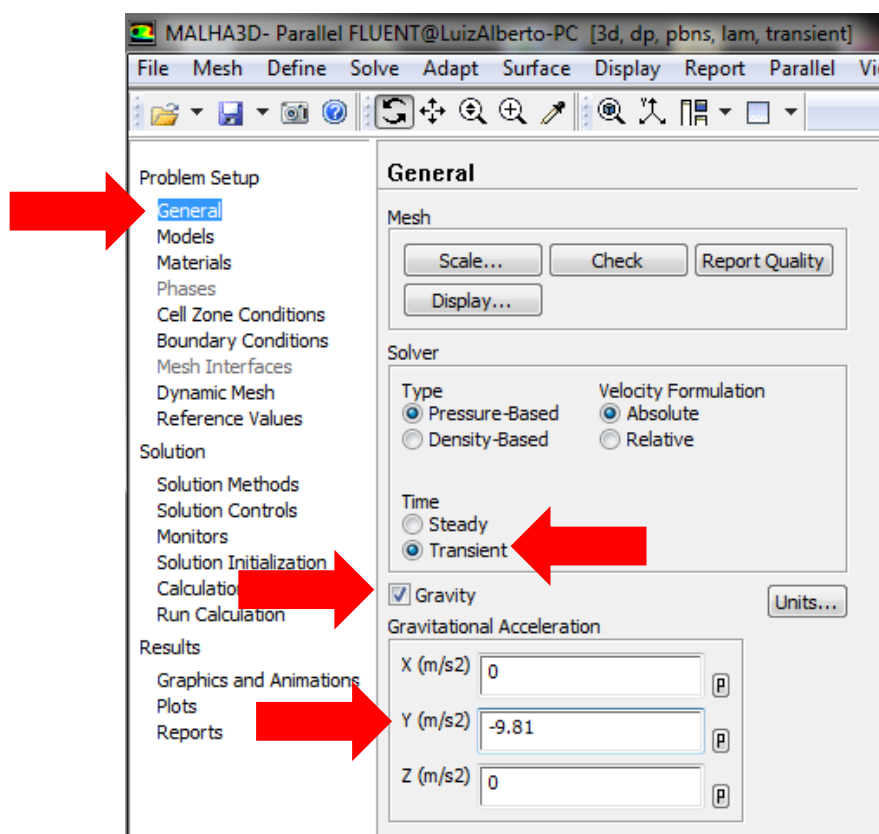


Figura A.4 – General >> Transient >> Gravity >> -9.81

O regime de escoamento do modelo é turbulento. Na Fig. 5 se ilustra o procedimento de configuração e escolha do modelo de turbulência.

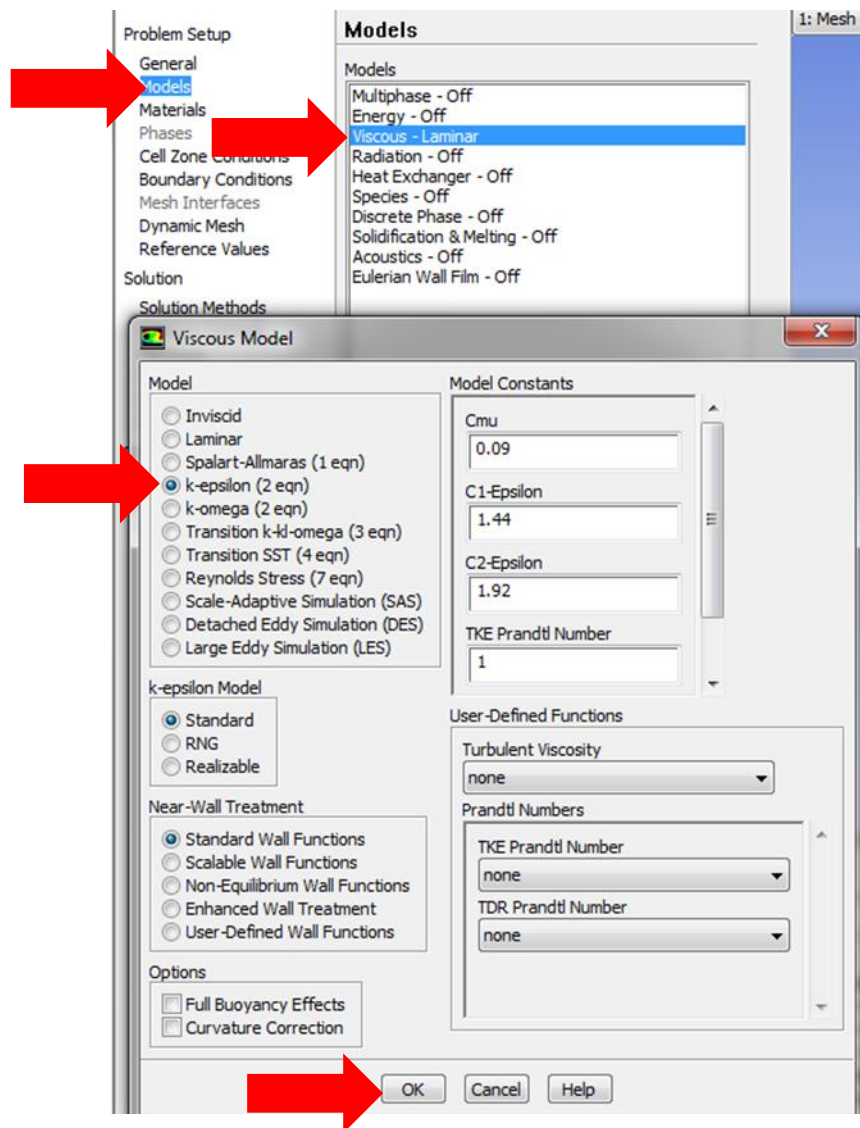


Figura A.5 – Models >> Viscous Model >> $k-\epsilon$

A Fig. 6 mostra como se escolhe o fluido (ar).

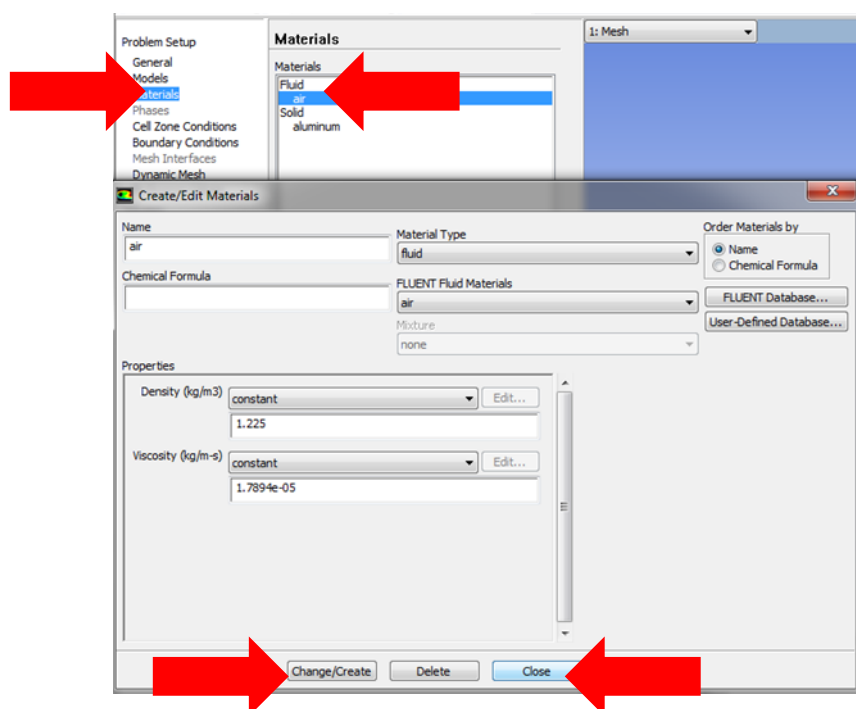


Figura A.6 – Informa o fluido do escoamento

Nas Figs. 7, 8, 9 e 10, é mostrado como se insere no ANSYS FLUENT 14.0, o arquivo *Table data* (no apêndice 1, é apresentado o formato do arquivo).

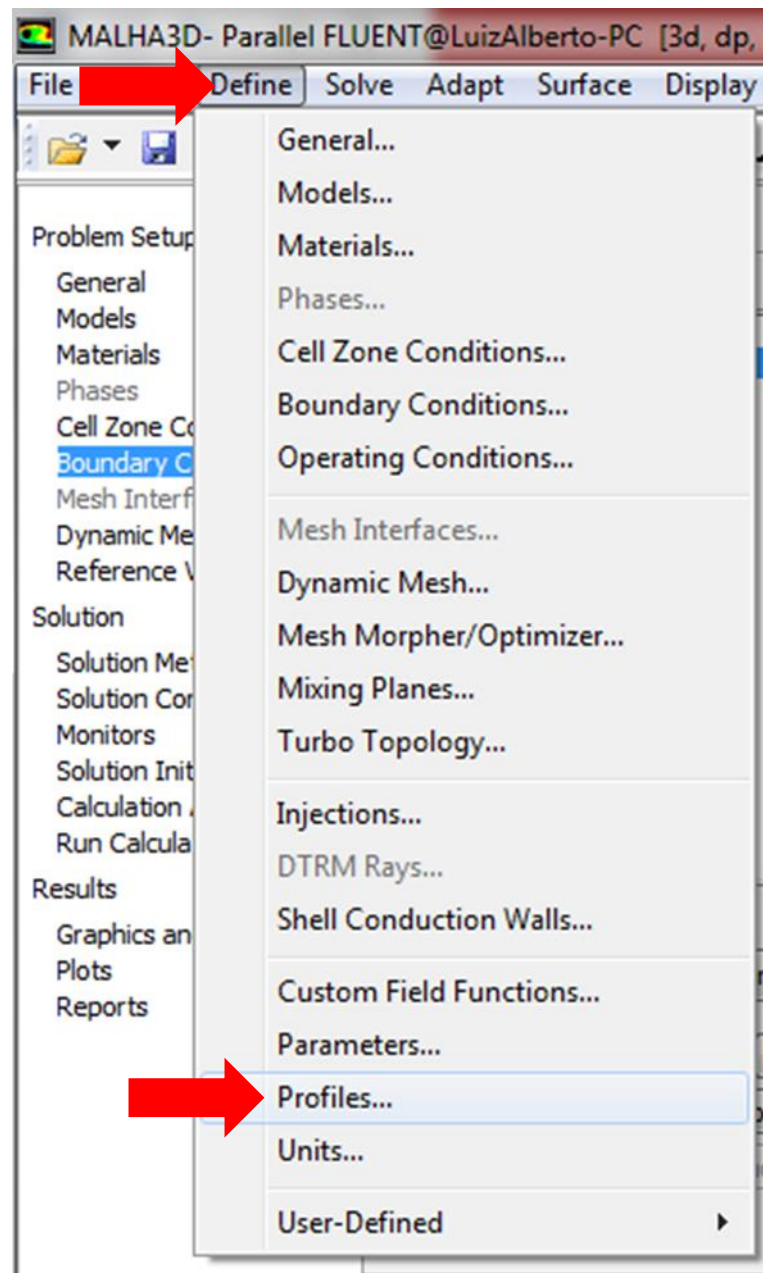


Figura A.7 – Define >> Profiles

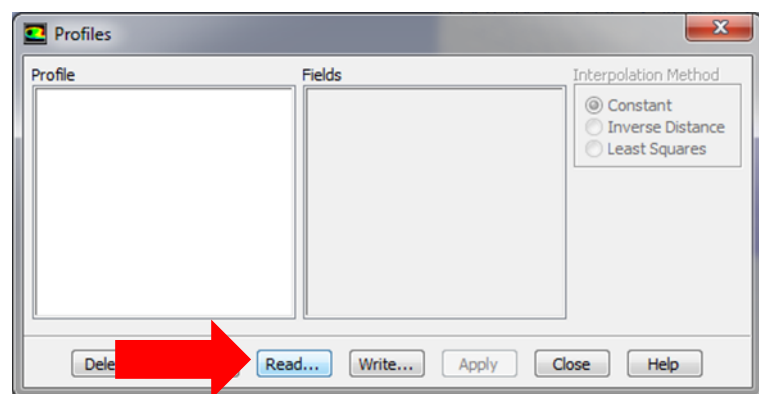


Figura A.8 - Read

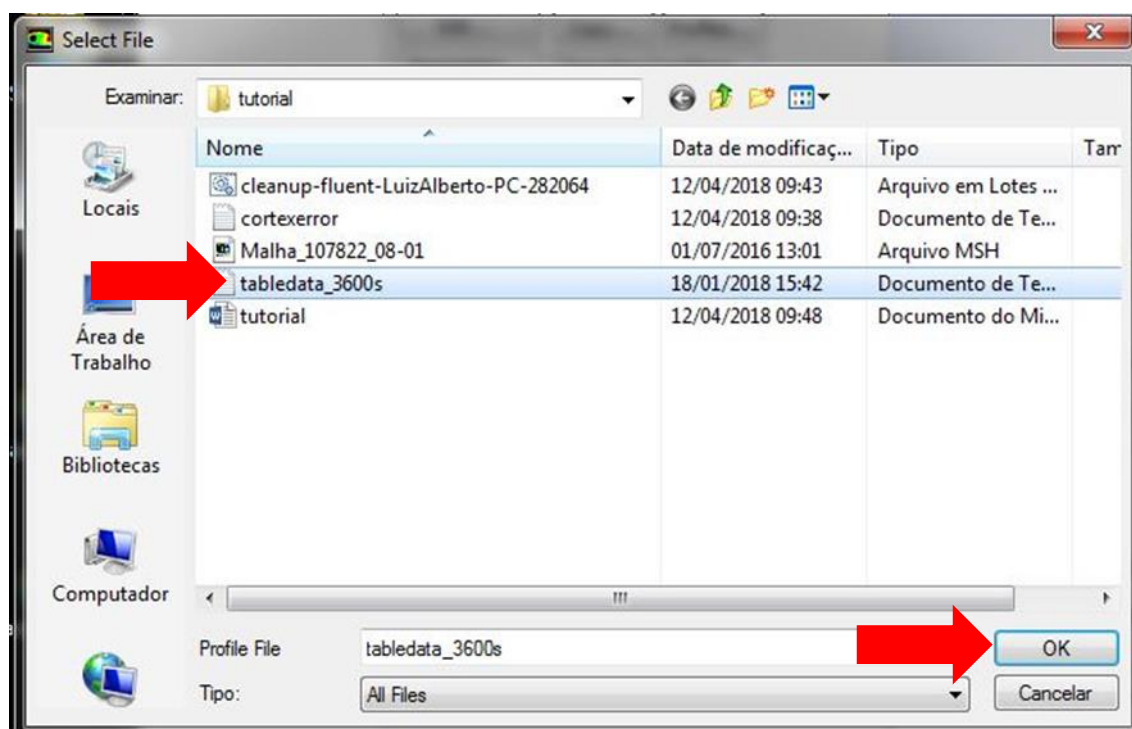


Figura A.9 – Seleciona o arquivo *Table data*

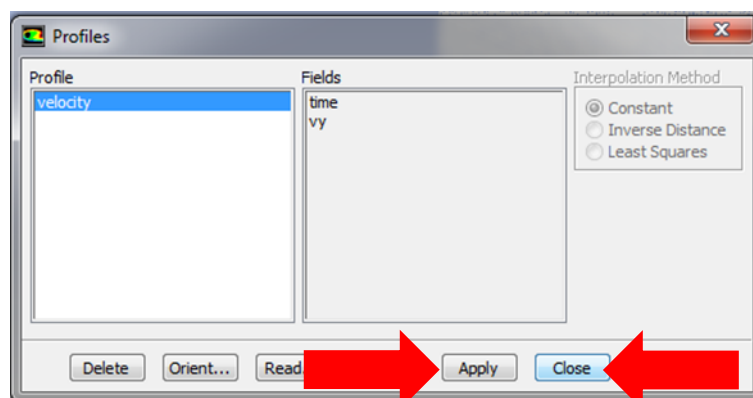


Figura A.10 – Apply >> Close

No modelo que esta sendo proposto, o parâmetro que equivale a massa especifica, deve ser zerado. A Fig. 11, mostra exatamente esse procedimento.

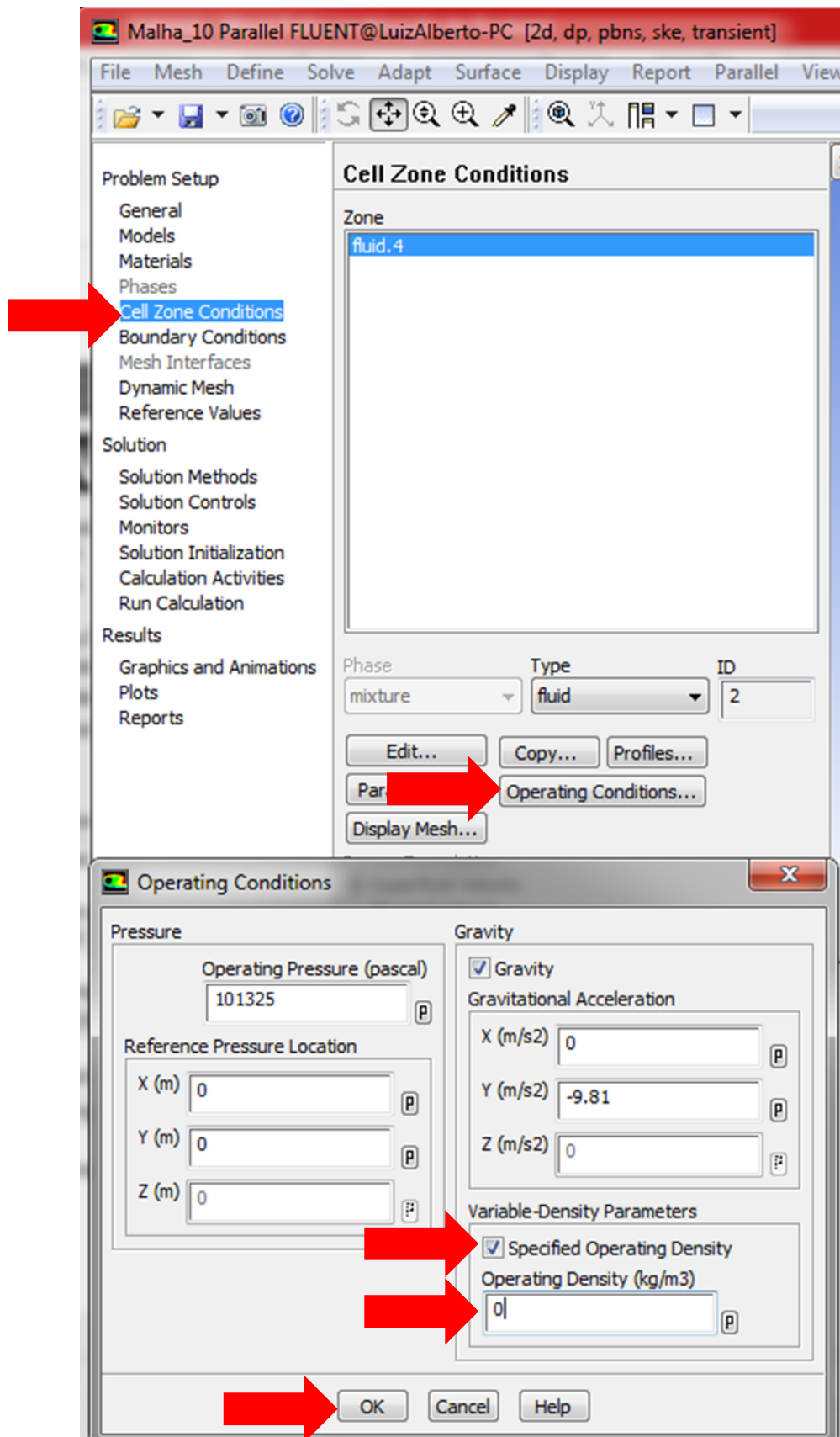


Figura A.11– Cell Zone conditions >> Operating Conditions >> Specified Operating Density >> zero

Com a Fig. 12, é possível observar como a condição de contorno de entrada é configurada no ANSYS FLUENT 14.0

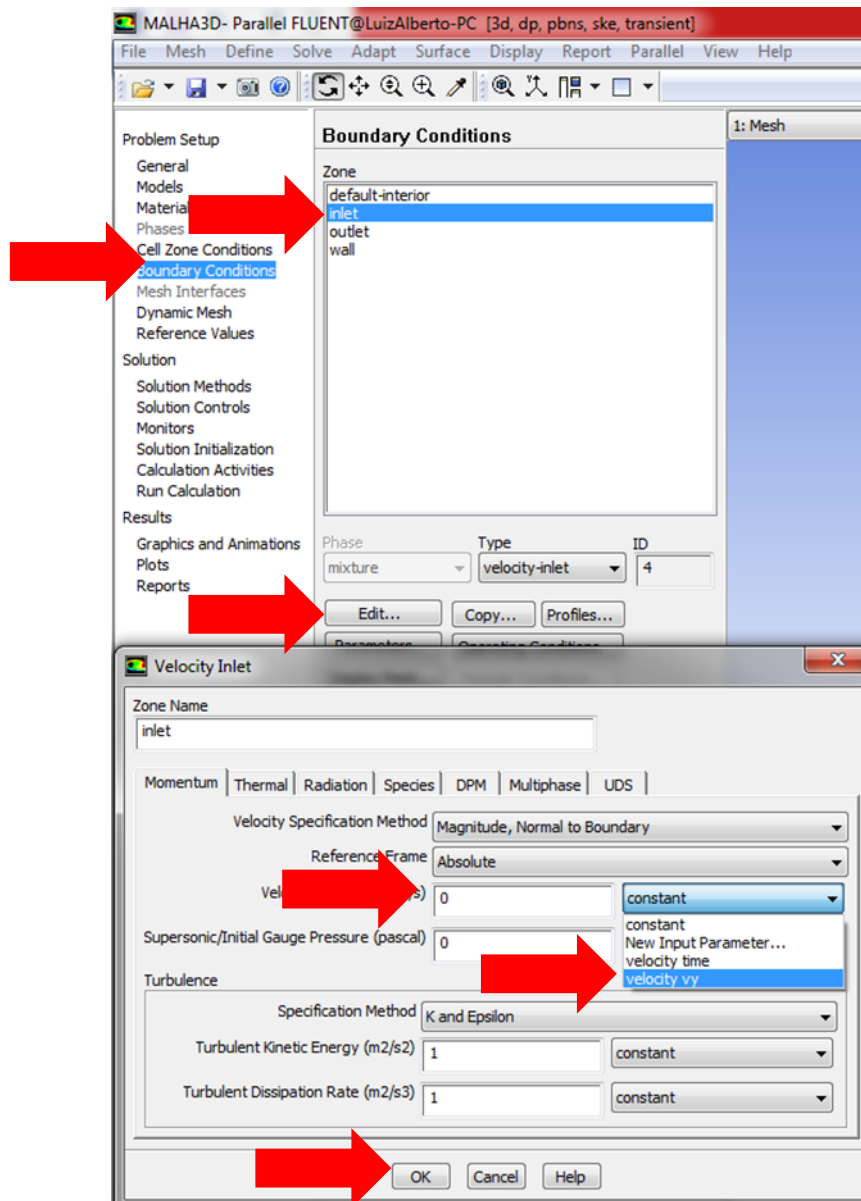


Figura A.12 – Boundary Conditions >> inlet >> edit >> velocity magnitude >> velocity vy

Os esquemas de solução, são definidos de acordo com a Fig. 13, para o acoplamento pressão-velocidade, discretização de pressão e demais termos advectivos.

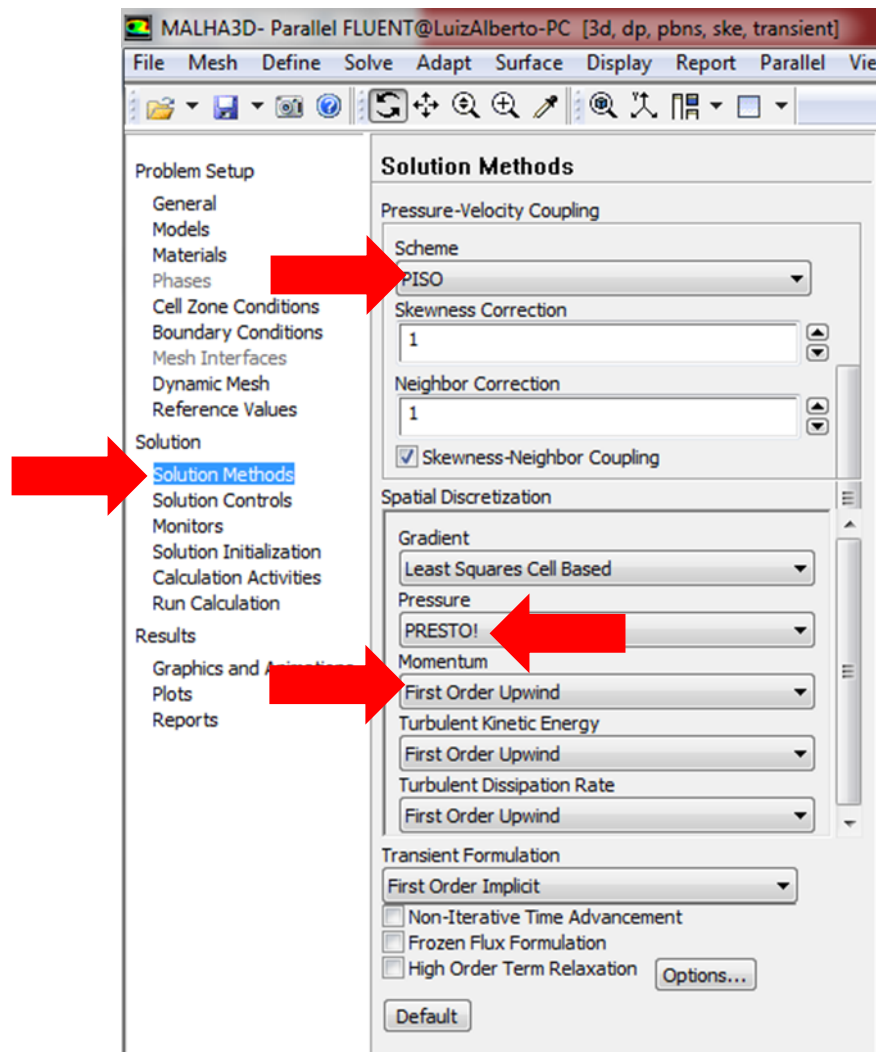


Figura A.13 – Solutions Methods >> Pressure-Velocity Coupling (PISO) >> Pressure (PRESTO) >> Momentum (First Order Upwind)

Para solução residual, com exceção da simulação do estudo de caso, as demais simulação desta pesquisa, a convergência se deu a partir de $1e^{-5}$, conforme a Fig. 14.

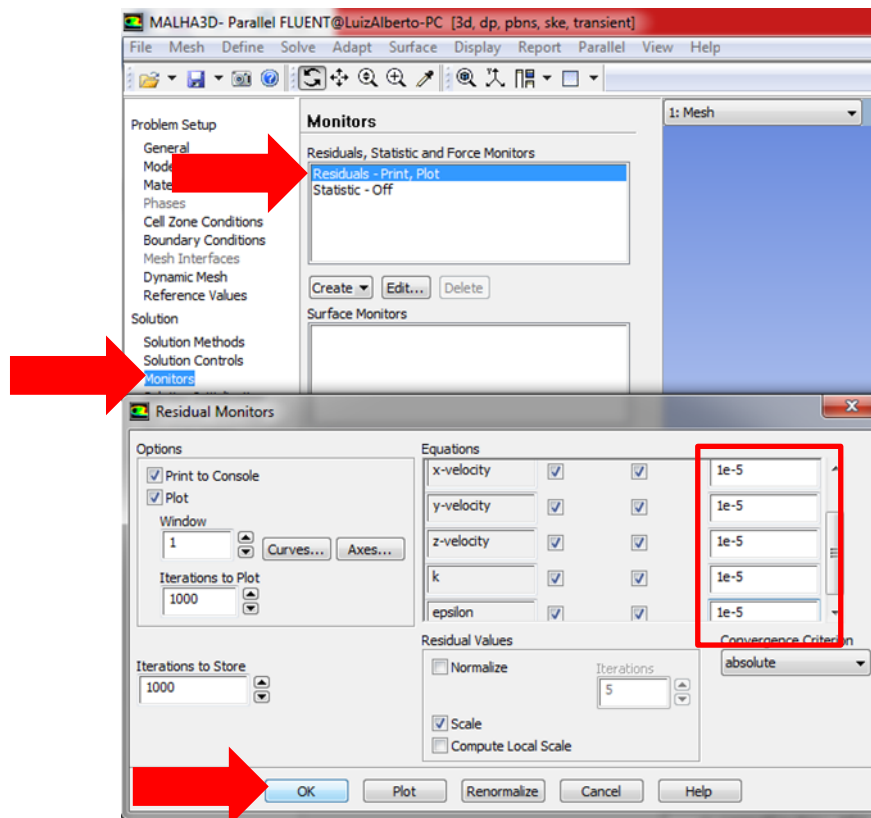


Figura A.14 – Monitors >> Residuals >> $1e^{-5}$

A Fig. 15, mostra como a sonda numérica foi configurada, para monitorar a pressão absoluta na entrada da câmara, por exemplo.

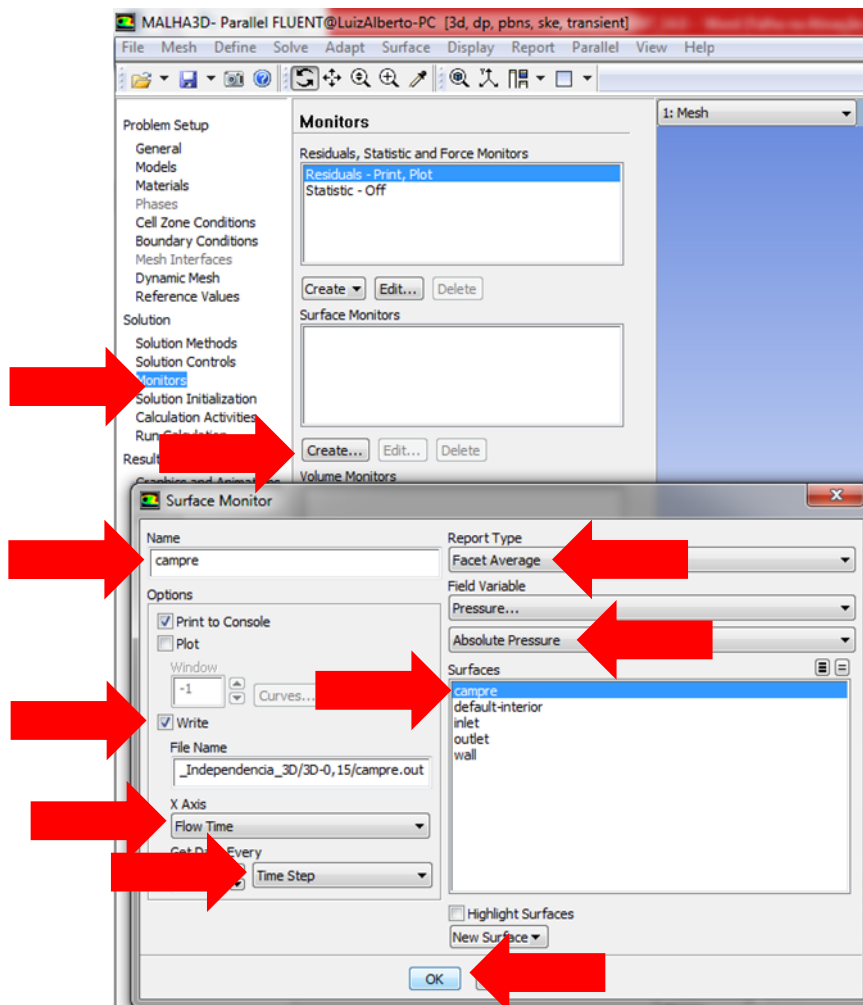


Figura A.15 – Janela de configuração da sonda numérica

O seguinte passo, consiste em informar ao programa, a parte do domínio (condição de contorno) onde o escoamento terá início (ver Fig. 16)

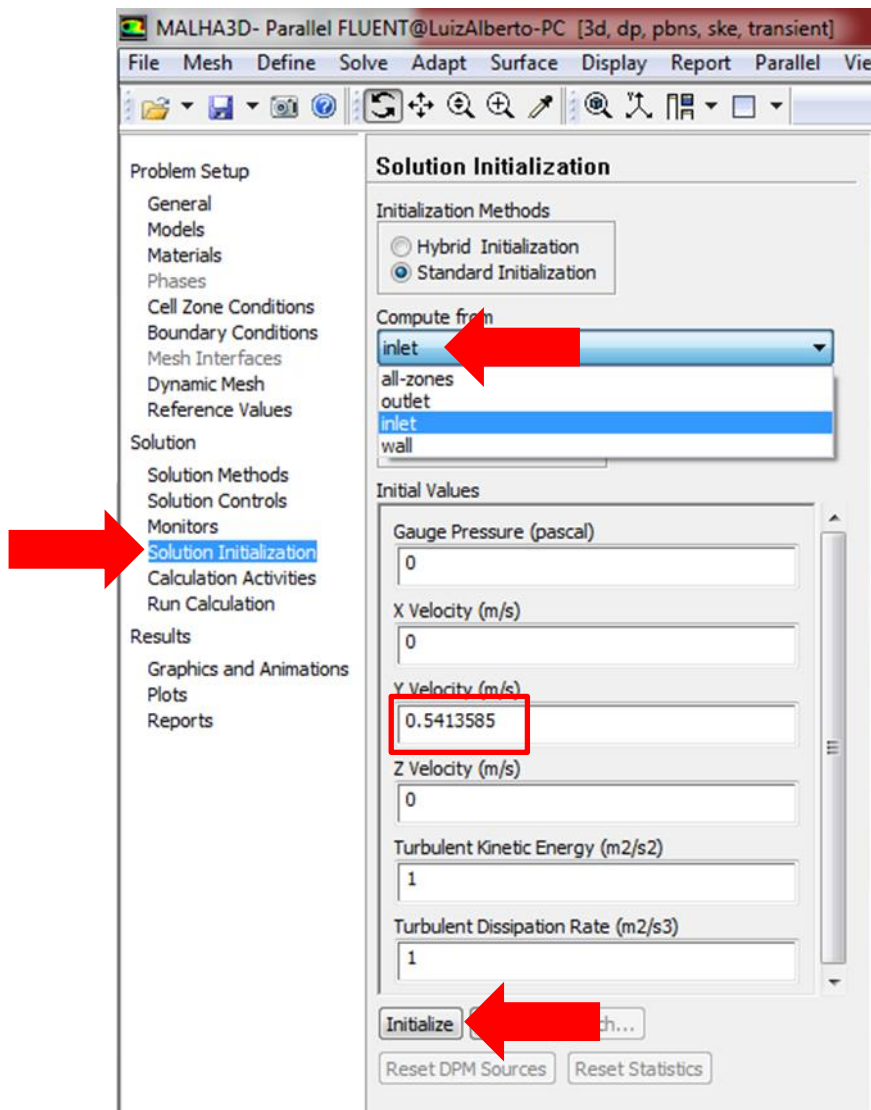


Figura A.16 – Ao selecionar a região de início, o campo y Velocity (m/s) vai assumir a informação de velocidade do *Table data*

Depois de configurar o programa com os paramentos, é importante que o caso que será simulado seja salvo em uma pasta. E finalmente a Fig. 17 corresponde a janela onde são inseridas as informações sobre o tempo de simulação e início da mesma.

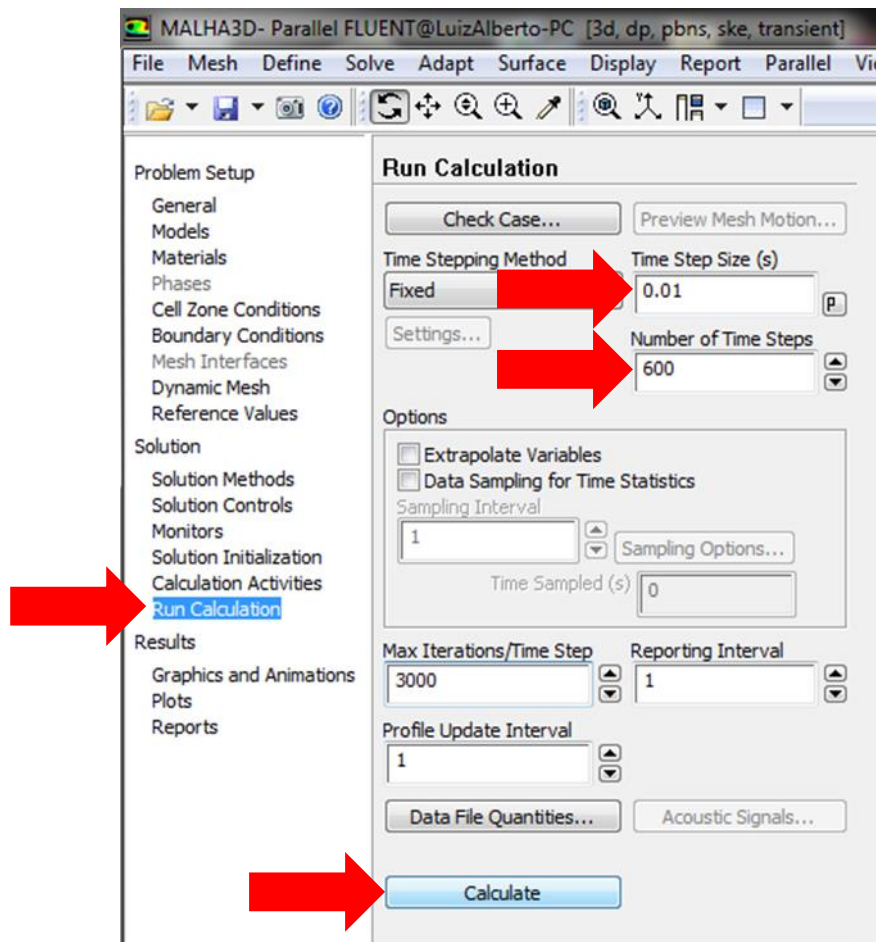


Figura A.17 – Ao clicar sobre a opção *Calculate*, a simulação automaticamente se inicia.