

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
ENGENHARIA AUTOMOTIVA

MURILO BRUNAZZO MEDEIROS

MODELAGEM NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE AR NA CABINE DE UM
AUTOMÓVEL UTILIZANDO FERRAMENTAS DE CÓDIGO ABERTO

Joinville
2023

MURILO BRUNAZZO MEDEIROS

MODELAGEM NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE AR NA CABINE DE UM
AUTOMÓVEL UTILIZANDO FERRAMENTAS DE CÓDIGO ABERTO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Automotiva, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Prof. Dr. Ernane Silva

Coorientador(a): Prof. Dr. Filipe Dutra da Silva

Joinville

2023

MURILO BRUNAZZO MEDEIROS

MODELAGEM NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE AR NA CABINE DE UM
AUTOMÓVEL UTILIZANDO FERRAMENTAS DE CÓDIGO ABERTO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Automotiva, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 1 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ernane Silva/Presidente
Orientador/Presidente

Prof. Dr. Filipe Dutra da Silva
Coorientador

Prof. Dr. Diogo Nardelli Siebert
Membro(a)
UFSC

Prof. Dr. Thiago Dutra
Membro(a)
UFSC - Araranguá

Dedico este trabalho a *famiglia* Brunazzo e à família Figueira Medeiros, em especial,
aos meus pais, Valéria e Elton.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus pela vida e pela oportunidade de ter ingresso na Universidade Federal de Santa Catarina em 2018. À minha mãe Valéria e ao meu pai Elton por todos os ensinamentos transmitidos e por estarem ao meu lado tanto nos bons quanto nos maus momentos aos longos desses anos, aos meus irmãos Gustavo e Rafael por terem me dado a oportunidade de ser o irmão mais velho da casa e por serem meus pequenos grandes companheiros na vida, à minha vó Edith e à minha tia Edemir por todo carinho recebido, à minha tia Licinia por toda ajuda e apoio, à minha prima Jéssica por todo auxílio e ajuda, ao meu padrasto Elcias por todo suporte dado, à minha madrasta Luíza pelos incentivos passados, à minha namorada Leticia por todo suporte, carinho e momentos felizes compartilhados nesta reta final de minha graduação e aos meus avós maternos Walter Campello Brunazzo e Neide Brunazzo que, embora desencarnados, deixaram-me memórias e sentimentos felizes, os quais estão guardados comigo.

Ao Professor orientador Dr. Ernane Silva por todo suporte, conhecimento e incentivo na área de mecânica dos fluidos computacional e pelo convite para participar do TEG (Thermofluids Engineering Group) ao fim de 2019, ao Professor coorientador Dr. Filipe Dutra da Silva pelo auxílio nas simulações feitas neste trabalho, ao Professor Dr. Maurício de Campos Porath por ter me incentivado e me ajudado com minha permanência na Alemanha durante meu intercâmbio, ao Professor Dr. Harald Göllinger por ter me recebido em seu laboratório de mecatrônica na THI e de ter me motivado com meus sonhos profissionais, à Engenheira Karin Ebenbeck por toda ajuda e pelas conversações em alemão e aos professores Diego Duarte, Fátima Machado, Sérgio Idehara por serem os ótimos professores que são.

A todos os meus amigos da UFSC, em especial ao Antonio Alencar, ao Henrique B.W., ao Igor Freire, ao Lucas Manica, ao Thiago A. de Azevedo e aos amigos do time *Santo Vraau* por todo suporte, conselhos e amizade ao longo da graduação, ao meu amigo André Rossano por todos conselhos e risadas, aos amigos que conheci na Alemanha, Enrico Nardi, Fábio Reway, Georges Lemos, Jialiang Qin, Samuel Queiroz e Yuri Poledna, pelas conversas, pelos almoços no *Mensa* e por toda a amizade e aos meus parentes Gabriella Brunazzo e Chiara Brunazzo pelo reencontro da *famiglia* Brunazzo depois de muitos anos e pelas lembranças familiares compartilhadas.

Muito obrigado, *grazie mille* e *Dankeschön* a todos por terem feito parte de uma forma em minha jornada da graduação, serei sempre grato por isso.

No entanto, a pergunta de o porquê um escoamento, em vez de fluir ao longo da parede, separa-se dela, não saiu da minha mente até três anos depois, quando a teoria da camada limite trouxe a solução.

(PRANDTL, 1948)

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma modelagem numérica de um escoamento de ar dentro de uma cabine de um veículo por meio de *softwares* de código aberto. A importância desse estudo se deve ao fato de que o ar-condicionado automotivo desempenha um papel fundamental no conforto térmico dos ocupantes durante a condução, sendo essencial modelar e compreender os fatores que influenciam o desempenho desse sistema. Um modelo CAD da cabine de um automóvel, baseado no modelo da cabine Duster 2011 da Renault, é simplificado no Blender e utilizado para realizar simulações CFD. O processo de simulação envolve a discretização espacial do modelo usando a ferramenta *snappyHexMesh* e a utilização do *solver simpleFoam* para processar a simulação, sendo ambos utilitários do *software* OpenFOAM. Os resultados obtidos são analisados no programa Paraview, permitindo a análise do comportamento dos campos de propriedades como pressão e velocidade do escoamento no habitáculo do veículo. A partir dos resultados, pôde-se apontar que o uso de ferramentas de código-aberto são grandes potenciais para a modelagem de um escoamento de ar dentro de uma cabine automotiva, o que serve de base para outras linhas de análises nas áreas de condicionamento de ar automotivo e de conforto térmico.

Palavra-chave: CFD. Código-aberto. OpenFOAM. Condicionamento de ar automotivo. GCI.

ABSTRACT

The present work aims to perform a numerical modeling of airflow within a vehicle cabin using open-source softwares. The importance of this study lies in the fact that automotive air conditioning plays a crucial role in the thermal comfort of occupants during driving, making it essential to model and understand the factors influencing the performance of this system. A CAD model of the vehicle cabin, based on the 2011 Renault Duster cabin model, is simplified in Blender and used to conduct CFD simulations. The simulation process involves the spatial discretization of the model using the *snappyHexMesh* tool and the use of the *simpleFoam solver* to process the simulation, both being utilities of the OpenFOAM software. The obtained results are analyzed in the Paraview program, allowing the analysis of property fields such as the velocity and pressure fields within the vehicle cabin. Based on the results, it could be pointed out that the use of open-source tools holds great potential for modeling airflow within an automotive cabin. This serves as a foundation for further analysis in the areas of automotive air conditioning and thermal comfort.

Keywords: CFD. Open-source. OpenFOAM. Automotive air conditioning. GCI.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo do sistema de ar-condicionado	21
Figura 2 – Operação de um evaporador	21
Figura 3 – Sistema de acionamento do compressor	22
Figura 4 – Posicionamento do condensador	23
Figura 5 – Elemento de fluido utilizado no desenvolvimento das equações que governam o escoamento de fluidos	25
Figura 6 – Balanço de massa no elemento de fluido	26
Figura 7 – Tensões atuantes no elemento de fluido na direção x	27
Figura 8 – Decomposição das variáveis turbulentas médias e oscilantes: (a) em relação à velocidade; (b) em relação à pressão	32
Figura 9 – Fluxo de energia dentre as escalas de turbulência	34
Figura 10 – Capacidade dos métodos de resolver com base na escala dos redemoinhos	35
Figura 11 – Exemplo de malhas com elementos triangulares (imagem à esquerda) e com elementos tetraédricos (imagem à direita)	40
Figura 12 – Estrutura do OpenFOAM	43
Figura 13 – Malha inicial ao redor e dentro da geometria STL	44
Figura 14 – Divisão de células refinadas que intersectam a superfície do objeto.	45
Figura 15 – Uma ilustração de um ponto material localizado fora do objeto e a malha correspondente (imagens superiores) e outro exemplo em que o ponto de material é posicionado dentro do objeto, juntamente com a malha correspondente (imagens inferiores)	46
Figura 16 – Malha final após o processo de remoção de células	47
Figura 17 – Região selecionada para o refino de malha	47
Figura 18 – Malha final após o processo de refino de região	48
Figura 19 – Malha ajustada sobre a superfície da geometria após o processo de <i>snapping</i>	49
Figura 20 – Adição de camadas alinhadas à superfície selecionada do objeto	49
Figura 21 – Fluxo de trabalho da simulação CFD realizada neste estudo	52
Figura 22 – Dimensões, em m , reais do veículo	53
Figura 23 – Imagem renderizada da geometria STL do veículo	53
Figura 24 – Geometria do veículo no ambiente do Blender	54
Figura 25 – Dimensões em, mm , da geometria STL do automóvel	54
Figura 27 – Parte traseira da cabine	54
Figura 26 – Parte frontal da cabine	55

Figura 28 – A região destacada em vermelho corresponde ao habitáculo do veículo	55
Figura 29 – Processo de remoção de faces da geometria STL no Blender	56
Figura 30 – Vistas da cabine isolada	56
Figura 31 – Grupo de faces correspondentes aos bocais de entrada do ar do sistema de condicionamento de ar no habitáculo	56
Figura 32 – Grupo de faces correspondentes à região de exaustão do ar da cabine	57
Figura 33 – Malha de base gerada no <i>blockMesh</i>	57
Figura 34 – Imagem seccionada da malha base mostrando que a geometria da cabine é totalmente envolvida	58
Figura 35 – Malha gerada no interior da cabine pelo <i>snappyHexMesh</i>	58
Figura 36 – Parte da geometria do assento traseiro ultrapassa a geometria da cabine	59
Figura 37 – Vista da malha da cabine seccionada	59
Figura 38 – Algoritmo SIMPLE	62
Figura 39 – Inclinação do vetor velocidade nos locais de entrada do ar na cabine	66
Figura 40 – Interface da ferramenta de cálculo de propriedades turbulentas desenvolvida por CFD Online (2023b)	67
Figura 41 – Vista de seção da malha #3 (grosseira)	71
Figura 42 – Vista de seção da malha #2 (intermediária)	72
Figura 43 – Vista de seção da malha #1 (fina)	72
Figura 44 – Esfera de amostragem dos pontos cujas propriedades são comparadas	73
Figura 45 – Distribuição da magnitude do campo de velocidade do escoamento de ar nas regiões de condições de contorno	75
Figura 46 – Distribuição da magnitude do campo de velocidade do escoamento de ar ao longo da saída de um bocal de refrigeração	76
Figura 47 – Distribuição de linhas de corrente do escoamento de ar ao longo da cabine (vista lateral)	76
Figura 48 – Distribuição de linhas de corrente do escoamento de ar ao longo da cabine (vista superior)	77
Figura 49 – Distribuição de pressão ao longo da cabine (vista superior)	78
Figura 50 – Distribuição de pressão ao longo da cabine (vista lateral)	78
Figura 51 – Aumento de pressão em parte do vidro da porta dianteira	78
Figura 52 – Aumento de k em parte da cabine devido às colisões do escoamento com a geometria	79
Figura 53 – Distribuição de k no interior da cabine	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Processos de transporte destacados pela equação geral de transporte (Equação 20)	30
Quadro 2 – Classificação dos modelos de turbulência	37
Quadro 3 – Esquemas de discretização utilizados	63
Quadro 4 – Variáveis de interesse do escoamento	65
Quadro 5 – Condições de contorno utilizadas no OpenFOAM	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Detalhes das malhas computacionais geradas	71
Tabela 2 – Valores da média da magnitude do campo de velocidade para cada malha	73
Tabela 3 – Valores dos parâmetros atrelados ao método GCI	74
Tabela 4 – Valores dos parâmetros atrelados ao método GCI	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

bM – blockMesh

CAD – Computer Aided Design

CFD – Computacional Fluid Dynamics

DNS – Direct Numerical Simulation

GCI – Grid-Convergence Index

HVAC – Heating, ventilation, and air conditioning

LES – Large Eddy Simulation

MDF – Método das Diferenças Finitas (*Finite Difference Method*)

MEF – Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method*)

MVF – Método dos Volumes Finitos (*Finite Volume Method*)

OpenFOAM – Open-source Field Operation And Manipulation

RANS – Reynolds-averaged Navier-Stokes

SIMPLE – Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

sHM – snappyHexMesh

SST – Shear Stress Transport

STL – Stereolithography

$\forall C$ – Volume de controle

LISTA DE SÍMBOLOS

p	Pressão
ρ	Densidade
\mathbf{U}	Campo de velocidade
u	Componente x do campo de velocidade
v	Componente y do campo de velocidade
w	Componente z do campo de velocidade
δx	Dimensão na direção x de um volume diferencial de fluido
δy	Dimensão na direção y de um volume diferencial de fluido
δz	Dimensão na direção z de um volume diferencial de fluido
t	Tempo
$\frac{\partial}{\partial t}$	Derivada parcial temporal
div	Operador divergente
τ_{ij}	Componente do tensor de tensão
$\sum F_x$	Somatório das forças em x
a_x	Aceleração em x
$m_{elemento}$	Massa do elemento diferencial de fluido
$\frac{D}{Dt}$	Derivada material temporal
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
S_{Mx}	Termo fonte do momento linear em x
S_{My}	Termo fonte do momento linear em y
S_{Mz}	Termo fonte do momento linear em z
$grad$	Operador gradiente
ϕ	Propriedade genérica
Γ	Coefficiente de difusão genérico
S_ϕ	Termo fonte da equação de transporte da propriedade ϕ
\bar{U}	Componente de valor médio do campo de velocidade
\mathbf{U}'	Componente flutuante do campo de velocidade
T	Intervalo de tempo
\forall	Volume de um volume de controle

N	Número de experimentos idênticos
V_i	i-ésimo volume de controle
δV_i	Volume do i-ésimo volume de controle
V_{malha}	Volume da malha
$[A]$	Matriz que contém termos advectivos e difusivos
$[b]$	Matriz que contém termos fontes
ψ	<i>Blending factor</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR	20
2.1.1	Componentes	20
2.1.1.1	Evaporador	20
2.1.1.2	Compressor	22
2.1.1.3	Condensador	22
2.1.1.4	Válvula de expansão	23
2.2	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	23
2.2.1	Equações governantes do escoamento de fluidos	24
2.2.1.1	Equação da conservação da massa	25
2.2.1.2	Equação da conservação de momento	26
2.2.2	Turbulência	30
2.2.2.1	Métodos de turbulência	34
2.2.2.2	Modelos de turbulência	36
2.2.3	Preâmbulo	38
2.2.4	Método dos volumes finitos (MVF)	39
2.2.5	OpenFOAM	42
2.2.6	<i>snappyHexMesh</i>	43
2.2.6.1	<i>Castellated Mesh Step</i>	44
2.2.6.2	<i>Snapping Step</i>	48
2.2.6.3	<i>Layer Addition</i>	49
2.2.6.4	<i>Mesh Quality Assessment</i>	50
2.2.7	Blender	50
3	METODOLOGIA	52
3.1	PRÉ-PROCESSAMENTO	52
3.1.1	Geometria e sua preparação	52
3.1.2	Malha computacional	56
3.2	ESQUEMAS NUMÉRICOS	59
3.2.1	<i>Solver</i>	60
3.2.2	Esquemas de discretização das equações diferenciais	62
3.2.3	Condições de contorno	64
3.2.3.1	<i>inlet</i>	65

3.2.3.2	<i>outlet</i>	68
3.2.3.3	<i>body</i>	68
3.3	CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA UTILIZADA	68
3.4	ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA - PROCEDIMENTO GCI	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1	ANÁLISE DE MALHA	71
4.2	CAMPOS DE PROPRIEDADES	75
4.2.1	Campo de velocidade	75
4.2.2	Campo de pressão	77
4.2.3	Campo de energia cinética turbulenta específica	79
5	CONCLUSÃO	80
	REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

O condicionamento de ar automotivo é uma tecnologia que se tornou comum nos veículos modernos, proporcionando conforto térmico aos ocupantes durante a condução. Para Costa (2022), habitantes de capitais e metrópoles no Brasil chegam a passar, em média, 21 dias inteiros dentro de um veículo por ano, dessa forma, o conforto térmico diário de grande parte das pessoas depende da capacidade térmica de refrigeração e condicionamento de ar dos automóveis, o que inclui carros. Nesse contexto, a investigação sobre o conforto térmico dos usuários de automóveis tem se tornado um assunto relevante para diversos estudiosos ao redor do mundo.

O conforto térmico dos usuários é um elemento crucial no projeto de veículos. Diversos métodos de pesquisa têm sido empregados para explorar esse tópico. Testes com participantes humanos foram realizados em veículos reais para analisar a relação entre a temperatura média da pele e a sensação térmica média dos condutores em condições de direção ao ar livre (ZHOU et al., 2019). Em Feng et al. (2023), parâmetros característicos da percepção térmica foram coletados para desenvolver um método de avaliação do conforto térmico adequado a populações específicas. Musat e Helerea (2009) empregaram modelos matemáticos para calcular o conforto térmico no ambiente interno dos veículos. Além desses métodos de pesquisa apontados, a dinâmica dos fluidos computacional (CFD *computational fluid dynamics*) é outro método de pesquisa utilizado para investigar o conforto térmico dos usuários de carros.

EIDegwy e Khalil (2018) investigaram o efeito de diferentes ângulos de saída de ar e radiação solar nas características da carga térmica no compartimento de passageiros com base nos resultados da simulação de fluidodinâmica computacional. Os resultados mostraram que a temperatura do ar de entrada possuía mais influência no conforto térmico do que o volume de troca de ar na saída de ar, enquanto a temperatura próxima ao motorista era cerca de 5°C mais alta do que as outras, devido à radiação solar. Yang et al. (2019) estudaram o ambiente térmico do compartimento do ocupante no inverno e compararam a distribuição de temperatura e fluxo de ar sob diferentes modos de fornecimento. Os resultados mostraram uma relação positiva entre o conforto humano e a uniformidade do ambiente térmico: quanto mais uniforme o ambiente térmico, maior o conforto térmico humano. Por meio de simulação computacionais validadas com experimentos, Mao et al. (2018) investigaram as características de escoamento no compartimento de passageiros sob diferentes condições externas, e os resultados mostraram que a taxa de fluxo de ar externo do veículo tem um impacto no escoamento na cabine, e a localização das saídas de ar também tem um impacto significativo no conforto térmico na região. Com relação à incidência solar, Hadi et al. (2022) investigaram através de simulações CFD a influência do ângulo de incidência

solar sobre a distribuição de temperatura interna de um carro, mostrando que o ângulo solar a -8° , em relação a um eixo normal ao veículo, diminui a intensidade solar dentro do carro em comparação com outros ângulos.

Dada a importância das simulações computacionais CFD para investigações e otimizações de sistemas de condicionamento de ar automotivo, este estudo descreve a modelagem numérica do escoamento de ar na cabine de um veículo. Para isso, foram utilizadas ferramentas de código aberto, com o propósito de exemplificar o desenvolvimento de uma simulação de fluidodinâmica computacional no habitáculo de um carro, envolvendo preparação da geometria CAD, uma representação e modelagem geométrica de um objeto usando *software* de design assistido por computador (em inglês, *computer-aided desing*), e análise da malha, o que possibilita futuras simulações de transferência de calor e identificação de áreas para melhoria do sistema de ar-condicionado automotivo.

Para a simulação, inicialmente um modelo CAD da cabine do veículo Renault-Dacia Duster 2011 foi utilizado, representando o domínio computacional para a simulação CFD. Alterações da geometria foram feitas no Blender, um *software* de código aberto de edição de modelos em extensões STL (*stereolithography*), para que simplificações da geometria fossem feitas para remover partes sem relevância à simulação e regiões de aplicação de condições de contorno fossem definidas. Após isso, a malha computacional da cabine foi feita utilizando a ferramenta *snappyHexMesh* do *software* de código aberto de fluidodinâmica computacional OpenFOAM. Posteriormente, campos de velocidade e pressão no interior da cabine foram obtidos ao se realizar uma simulação isotérmica, em regime permanente e turbulenta valendo-se do *solver simpleFoam* do OpenFOAM. Ademais, uma análise de independência de malha foi realizada por meio do método GCI (*Grid Convergence Index*). Por fim, o pós-processamento da simulação foi feito através do ParaView, *software* de código aberto de visualização e análise de dados. Por meio deste trabalho, dentre três malhas computacionais analisadas, a malha da cabine já simplificada contendo 2 693 695 volumes de controle foi escolhida para ser utilizada na simulação. Além disso, foram obtidas distribuições dos campos de velocidade, pressão e energia cinética turbulenta específica do escoamento de ar no interior da cabine.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é fazer uma modelagem numérica do escoamento na cabine de um automóvel utilizando ferramentas de código aberto.

1.1.2 Objetivos específicos

- Simplificar geometria CAD do habitáculo do veículo utilizado;
- Construir uma malha adequada ao problema;
- Obter campos de pressão e de velocidade e efeito da turbulência do escoamento no interior da cabine.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

Segundo Daly (2006), o sistema de condicionamento de ar opera em um ciclo contínuo (Figura 1). Um compressor recebe vapor refrigerante de baixa pressão e baixa temperatura. O refrigerante é bombeado para o condensador, onde flui através de diversos tubos aletados a fim de ser resfriado. No condensador, o vapor de alta pressão condensa em um líquido sub-resfriado de alta pressão. Esse líquido é direcionado a acumulador secador, que armazena, seca e filtra o refrigerante. Em seguida, o líquido sub-resfriado flui para a válvula de expansão, que reduz a pressão e transforma o refrigerante em uma mistura líquido/vapor de baixa pressão e baixa temperatura. Isso é alcançado por meio de uma diminuição da pressão utilizando um orifício variável. O orifício possui alta pressão em um lado (vindo do acumulador/secador) e baixa pressão no outro (evaporador e compressor) e permite que apenas uma pequena quantidade de refrigerante flua através dele. A queda brusca na pressão e temperatura faz com que parte do refrigerante vaporize. A mistura bifásica de baixa pressão e baixa temperatura flui então para o evaporador, onde ocorre a transferência de calor da superfície a ser refrigerada para o refrigerante por meio da vaporização. O calor pode vir tanto de dentro do veículo (ar recirculado) quanto do exterior (entrada de ar fresco) e é transportado para a superfície do evaporador. Uma vez que o refrigerante tenha vaporizado completamente e atingido seu ponto de saturação, ele ainda é capaz de absorver mais calor. O refrigerante continua a fluir pelas serpentinas do evaporador, absorvendo mais calor e ficando ligeiramente superaquecido. O refrigerante vaporizado, com baixa pressão, baixa temperatura e levemente superaquecido, flui de volta para o compressor, reiniciando o ciclo (DALY, 2006).

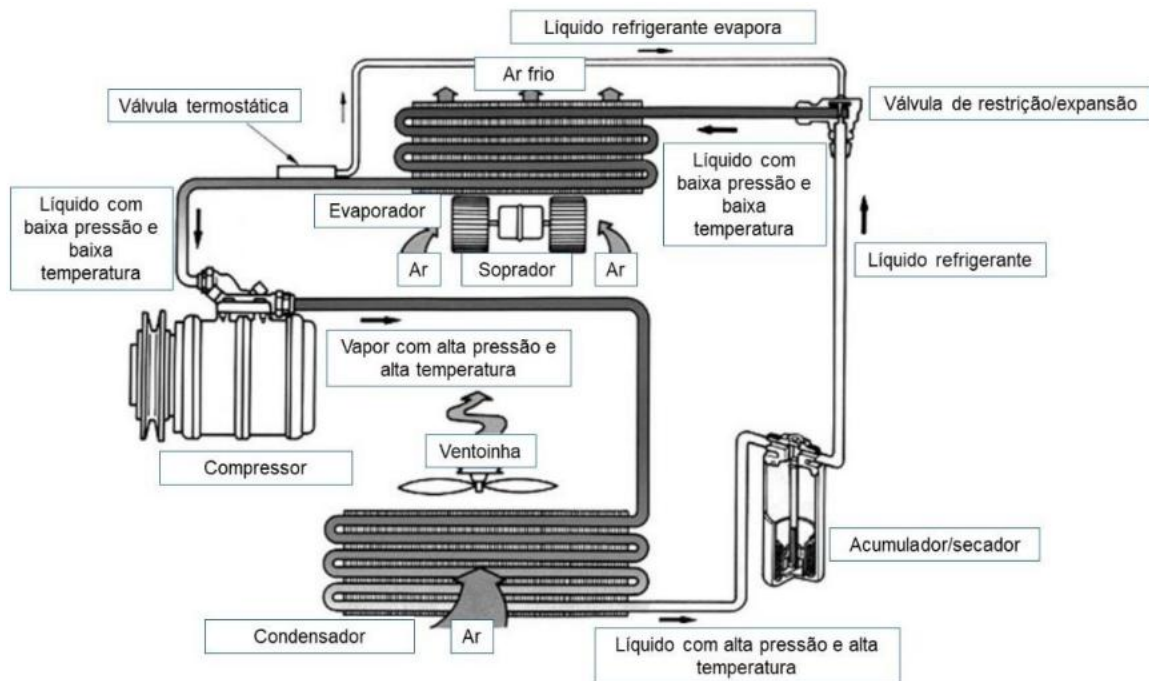
2.1.1 Componentes

De forma genérica, um sistema de condicionamento de ar apresenta quatro componentes básicos: evaporador, compressor, condensador e válvula de expansão.

2.1.1.1 Evaporador

A função do evaporador é proporcionar uma ampla área de superfície para permitir que o ar quente, muitas vezes úmido, passe por ele e libere sua energia térmica para o refrigerante que está presente no trocador de calor. Nesse momento, o refrigerante passou por uma redução significativa de pressão e temperatura ao atravessar a válvula de expansão, resultando na iminência para ser evaporado, necessitando apenas da energia térmica para iniciar esse processo. O evaporador absorve a

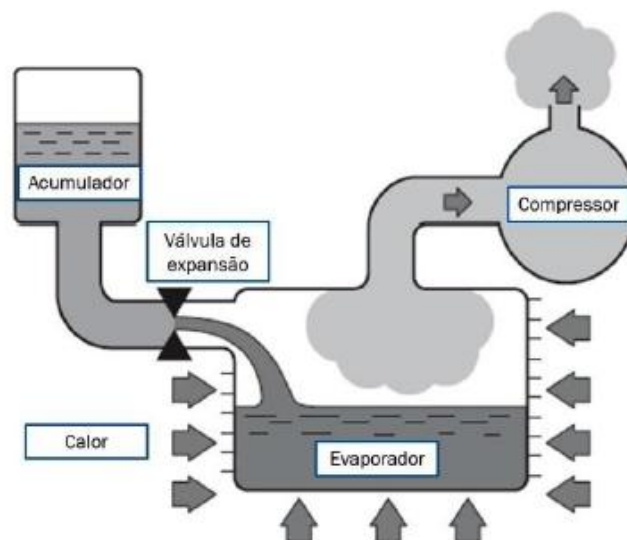
Figura 1 – Ciclo do sistema de ar-condicionado



Fonte: Adaptado de Daly (2006).

energia térmica do ar que passa por sua superfície, transferindo-a para o refrigerante até que este atinja o ponto de saturação. Mesmo após atingir o ponto de saturação, o refrigerante ainda é capaz de absorver uma pequena quantidade adicional de energia térmica, resultando em seu superaquecimento. Em seguida, o vapor superaquecido flui em direção ao compressor (DALY, 2006).

Figura 2 – Operação de um evaporador

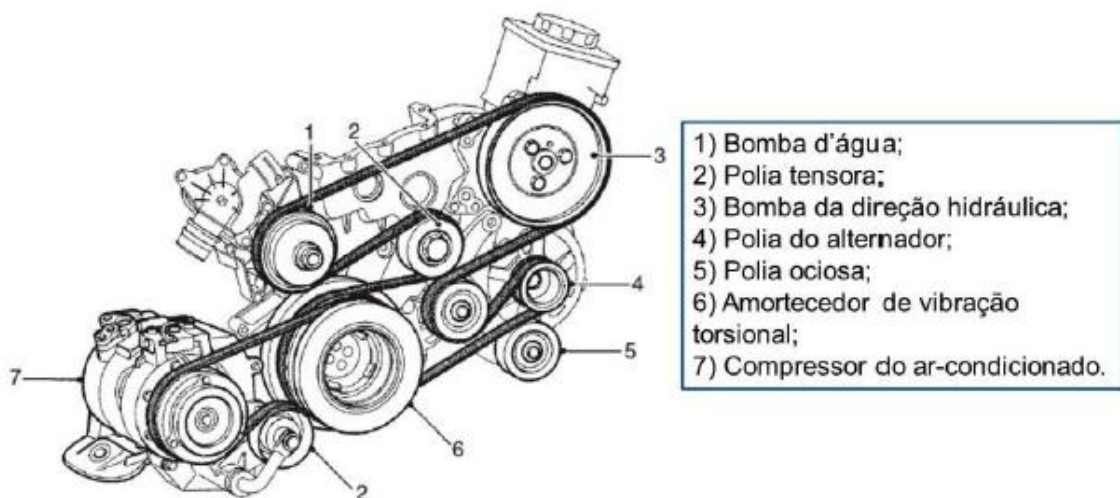


Fonte: Adaptado de Daly (2006).

2.1.1.2 Compressor

A função primária do compressor é comprimir e circular o vapor de refrigerante superaquecido em um sistema fechado (qualquer presença de líquidos ou sujeira pode prejudicar o funcionamento do compressor). Os compressores podem variar em termos de design, tamanho, peso, velocidade e direção de rotação, assim como no seu deslocamento. O compressor consome cerca de 80% da energia necessária para operar um sistema de ar-condicionado. Portanto, o tipo de compressor utilizado no sistema tem um impacto significativo na eficiência geral do sistema. Isso é especialmente relevante em termos de economia de combustível e controle da poluição, que são regulados por normas governamentais (DALY, 2006). O compressor é acionado por um sistema de polias, que é rotacionado devido ao trabalho de eixo fornecido pelo motor à combustão interna ou elétrico (Figura 3). Na frente do compressor, há uma embreagem magnética que, quando energizada, aciona o compressor. O compressor succiona o vapor do refrigerante da saída do evaporador. Uma vez que o refrigerante tenha deixado tal trocador de calor como vapor, ele perde a capacidade de absorver energia térmica e, conseqüentemente, agir como um resfriador (DALY, 2006).

Figura 3 – Sistema de acionamento do compressor



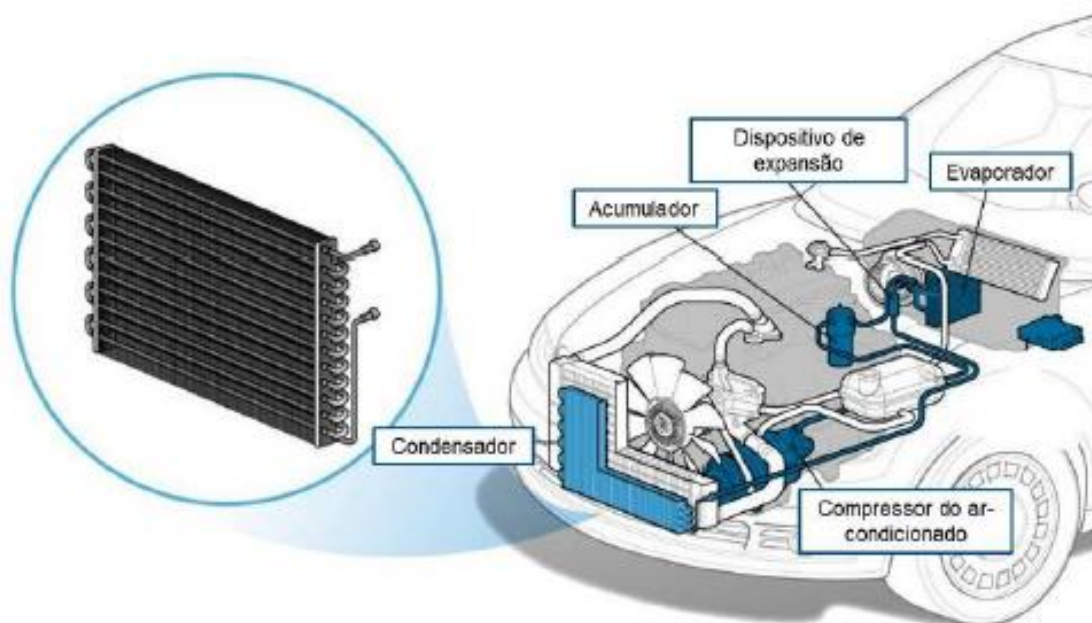
Fonte: Adaptado de Daly (2006).

2.1.1.3 Condensador

Possui funcionamento análogo ao evaporador. A função desse trocador de calor é de dissipar a energia térmica contida no refrigerante. O vapor superaquecido entra no condensador pela parte superior e o líquido sub-resfriado sai pela parte inferior. O compressor eleva a pressão e a temperatura do refrigerante, sendo necessário reduzir a sua temperatura carregado de calor para transformá-lo novamente em líquido, permitindo que atue como um refrigerante novamente mais adiante no

sistema. Para realizar essa tarefa, o refrigerante flui pelo condensador como vapor super-aquecido e libera calor para o ambiente circundante. A maior parte do fluido, dependendo da carga do sistema, condensa novamente em líquido, que então flui para o acumulador/secador. O condensador é posicionado na parte frontal do veículo (Figura 4), onde é possível obter um fluxo de ar intenso quando o veículo está em movimento. Para auxiliar na remoção de calor quando o veículo está parado ou em baixa velocidade, o condensador é equipado com um sistema de ventoinha (DALY, 2006).

Figura 4 – Posicionamento do condensador



Fonte: Adaptado de Cars.com, 2023.

2.1.1.4 Válvula de expansão

O objetivo desse dispositivo é separar as partes de alta pressão e baixa pressão do sistema, controlar o volume de refrigerante e, assim, regular a capacidade de resfriamento do evaporador, além de garantir que o refrigerante saia do evaporador em estado superaquecido (DALY, 2006).

2.2 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

A Fluidodinâmica Computacional ou *Computational Fluid Dynamics* (CFD), em inglês, é uma poderosa ferramenta computacional que se baseia na resolução numérica das equações de Navier-Stokes para estudar o comportamento de fluidos em diversos contextos. Ela desempenha um papel fundamental em uma ampla gama de aplicações, incluindo engenharia aeroespacial, automotiva, petroquímica, e sistemas

de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (*heating, ventilation, and air conditioning* - HVAC). Além do amplo uso da fluidodinâmica computacional pela comunidade acadêmica, que ocorre concomitantemente ao progresso tecnológico, cada vez mais, tal campo da engenharia tem se tornado um elemento essencial no desenvolvimento de produtos e processos industriais (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

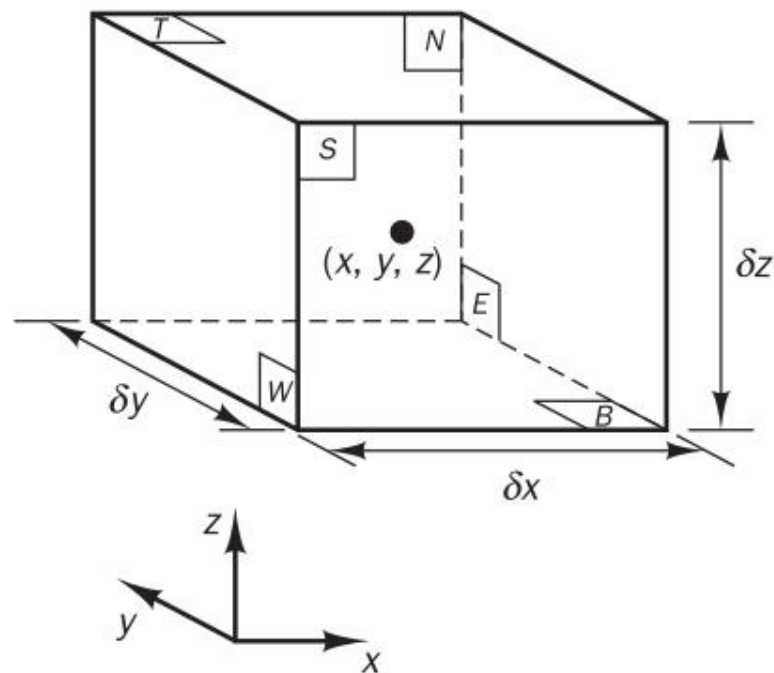
2.2.1 Equações governantes do escoamento de fluidos

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), as equações que governam o escoamento de um fluido são expressões matemáticas que descrevem leis de conservação de propriedades, como massa e momento. As leis de conservação podem ser derivadas ao considerar uma quantidade dada de matéria ou massa de controle (MC, também denominado por sistema) e suas propriedades extensivas. Essa abordagem é usada para estudar a dinâmica de corpos sólidos, nos quais a massa de controle é facilmente identificada. No entanto, ao se trabalhar com fluidos, é difícil acompanhar uma parcela de matéria, sendo mais conveniente lidar com o escoamento dentro de uma determinada região espacial, a qual é usualmente chamada de volume de controle ($\forall C$) (FERZIGER; PERIĆ, 2002). Esse método de análise é chamado de abordagem de volume de controle.

Ao longo do desenvolvimento de tais equações governantes, duas considerações são feitas. A primeira é que o fluido é considerado como um contínuo, isto é, ao observar um fluido em uma escala suficientemente grande (maior que $1 \mu\text{m}$), ele se comporta como uma substância contínua, sem descontinuidades significativas entre suas partículas individuais. Isso implica que as propriedades do fluido, como densidade, pressão e velocidade, são tratadas como funções contínuas do espaço e do tempo, ou seja, $\rho(x, y, z, t)$, $p(x, y, z, t)$ e $\mathbf{U}(x, y, z, t)$ para a densidade, pressão e vetor velocidades, respectivamente. Isso simplifica as análises matemáticas e permite a aplicação de equações diferenciais para descrever o comportamento do fluido. A outra consideração é que o volume de controle de modelo para a dedução das equações possui lados δx , δy e δz , sendo que seu centro é localizado na posição (x, y, z) (Figura 5), cujas seis faces são marcadas como N (*north*, norte em inglês), S (*south*, sul em inglês), E (*east*, leste em inglês), W (*west*, oeste em inglês), T (*top*, topo em inglês), B (*bottom*, fundo em inglês).

Uma análise sistemática das variações na massa e no momento do elemento de fluido, resultantes do fluxo de fluido através de suas fronteiras e, quando pertinente, das influências de fontes internas ao elemento, conduz às equações que governam o escoamento (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A partir das dimensões do elemento, de acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), é possível aplicar uma hipótese em que as propriedades do fluido nas superfícies podem ser expressas com precisão suficiente através dos dois primeiros termos de uma expansão da série de

Figura 5 – Elemento de fluido utilizado no desenvolvimento das equações que governam o escoamento de fluidos



Fonte: (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Taylor (sobre a formulação da série de Taylor, recomenda-se a leitura de Patankar (1980), página 28). Neste estudo, a conservação de duas propriedades extensivas do fluido são examinadas, massa e momento, é examinada.

2.2.1.1 Equação da conservação da massa

Uma das formas de se obter a equação de conservação da massa ou da continuidade é por meio de um balanço diferencial de massa no elemento de fluido: taxa de aumento de massa no elemento de fluido (Equação 1) equivale à taxa líquida de fluxo de massa no elemento de fluido (Equação 2) (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

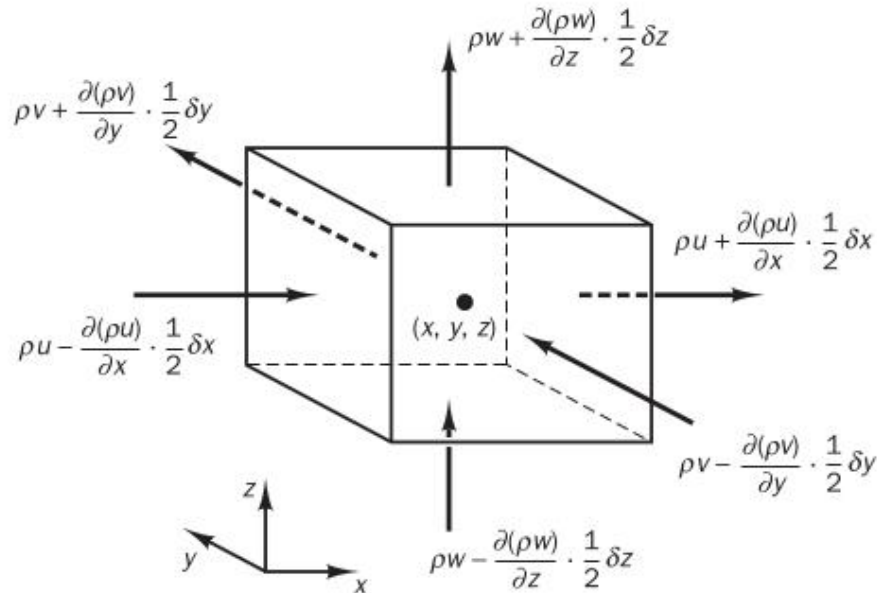
$$\frac{\partial(\rho\delta x\delta y\delta z)}{\partial t} = \frac{\partial\rho}{\partial t}\delta x\delta y\delta z \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2}\delta x\right) \delta y\delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2}\delta x\right) \delta y\delta z \\ & + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2}\delta y\right) \delta x\delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2}\delta y\right) \delta x\delta z \\ & + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2}\delta z\right) \delta x\delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2}\delta z\right) \delta x\delta y \end{aligned} \quad (2)$$

Na Equação 2, foi feito um balanço de massas nas seis faces, sendo que fluxos que entram no elemento produzem um aumento de massa (sinal positivo) e

aqueles que saem do elemento causam uma diminuição de massa (sinal negativo), como demonstrado pela Figura 6.

Figura 6 – Balanço de massa no elemento de fluido



Fonte: (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007)

Igualando a Equação 1 com a Equação 2, tem-se o seguinte resultado:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Notando que o campo de velocidade do escoamento é $\mathbf{U} = (u, v, w)$ e que $div = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$, a Equação 3 pode ser reescrita em forma vetorial:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (4)$$

Considerando um fluido incompressível, o termo $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ da Equação 4 é nulo, como mostra a Equação 5.

$$div(\mathbf{U}) = 0 \quad (5)$$

A Equação 5 é a equação de conservação de massa em regime permanente, tridimensional, em um ponto de um fluido incompressível.

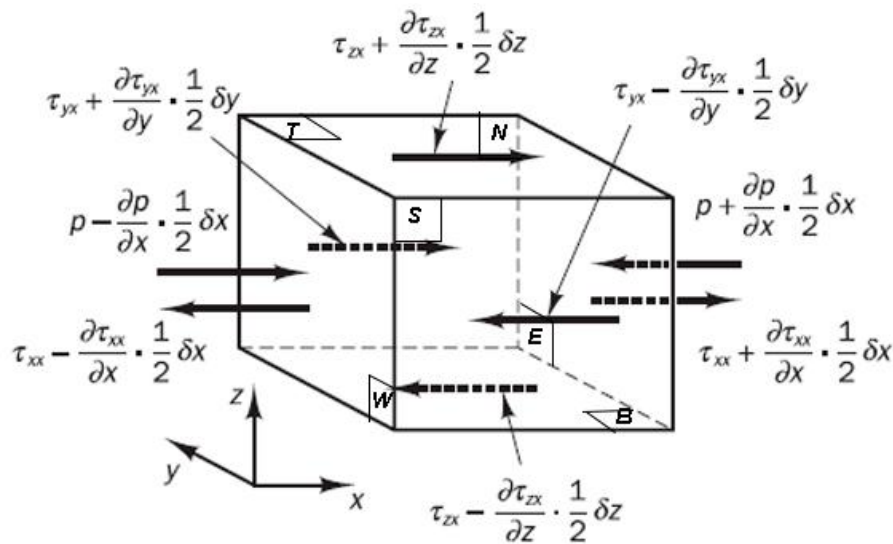
2.2.1.2 Equação da conservação de momento

A segunda lei de Newton para um fluido em movimento afirma que a taxa de variação da quantidade de movimento de uma partícula de fluido é igual à soma das forças sobre a partícula (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Uma abordagem possível para o desenvolvimento dessa equação é por meio da análise de equilíbrio de forças em uma partícula elementar de fluido em movimento (WHITE, 2011).

White (2011) distingue duas classes de forças atuantes sobre uma partícula: **forças de campo**, geradas por campos externos (como gravidade, magnetismo e potencial elétrico) que atuam sobre toda a massa contida no elemento, e **forças de superfície**, causadas pelos esforços nas laterais da superfície de controle. Comumente, as forças de superfície são representadas por termos separados na equação de momento, e as forças de corpo alocadas em um termo fonte da equação (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

As forças de superfície são devido à pressão hidrostática p , que é uma tensão normal, e a tensões viscosas τ_{ij} que surgem devido a gradientes de velocidade no movimento do fluido (WHITE, 2011). A notação de sufixo comum τ_{ij} é utilizada para indicar a direção das tensões viscosas. Os sufixos i e j sinalizam que o componente do tensor de tensões age na direção j em uma superfície perpendicular à direção i (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A magnitude de uma força de superfície de uma tensão superficial é o produto entre a tensão e a área na qual atua. Considerando o mesmo elemento de fluido da Figura 5 e o truncamento da série de Taylor no segundo termo, a Figura 7 mostra tensões viscosas e pressão atuantes nas seis faces do elemento na direção x .

Figura 7 – Tensões atuantes no elemento de fluido na direção x



Fonte: Adaptado de Versteeg e Malalasekera (2007).

Assim, a força resultante na direção x é calculada somando-se os componentes de tensão multiplicados pelas suas respectivas áreas que atuam nessa direção no elemento de fluido. Nas faces E e W, a força total em x é dada pela Equação 6,

$$\begin{aligned}
& \left[\left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z + \\
& + \left[- \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z \\
& = \left(- \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z
\end{aligned} \tag{6}$$

Nas faces N e S, pela Equação 7,

$$- \left(\tau_{yz} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \tag{7}$$

E, nas faces T e B, pela Equação 8,

$$- \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \tag{8}$$

Dessa forma, a força superficial resultante na direção x é obtida ao se somar a Equação 6, a Equação 7 e a Equação 8.

$$\left[\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \tag{9}$$

Pela segunda lei de Newton, o somatório de forças em x é equivalente ao produto da massa do elemento de fluido pelo componente x do campo de aceleração do escoamento:

$$\sum F_x = m_{elemento} a_x \tag{10}$$

Em que, segundo White (2011), a aceleração em x da partícula de fluido é dada pela derivada material da velocidade em x :

$$a_x = \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla)u \tag{11}$$

O termo $\frac{\partial u}{\partial t}$ da Equação 10 é denominado de aceleração local, que representa a parcela da variação da velocidade da partícula fluida devido à variação temporal em uma dada posição, sem considerar que a partícula de fluido se desloca. Já o termo $(\mathbf{U} \cdot \nabla)u$ da Equação 11 é chamado de aceleração convectiva, que surge quando a partícula se move por regiões onde há variação espacial do campo de velocidade (WHITE, 2011).

A componente x da equação de momento é encontrada igualando a Equação 11 à Equação 9 e dividindo ambos os lados pelo volume do elemento de fluido ($\delta x \delta y \delta z$):

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} \quad (12)$$

Caso haja alguma componente de força de corpo em x por unidade de volume, ela pode ser alocada ao termo fonte em x da equação de momento:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (13)$$

De forma análoga às direções y (Equação 14) e z (Equação 15):

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (14)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (15)$$

Ao analisar as Equações 13, 14 e 15, além dos campos de pressão e de velocidade como variáveis desconhecidas, as equações governantes incluem, como incógnitas adicionais, as componentes de tensão viscosa τ_{ij} . Para contornar isso, um modelo adequado para os termos τ_{ij} podem ser introduzidos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). É sabido que, em fluidos newtonianos, as tensões viscosas são linearmente proporcionais a taxas de deformação. A forma tridimensional da lei da viscosidade de Newton para escoamentos incompressíveis inclui uma constante de proporcionalidade: a viscosidade dinâmica, μ , que relaciona tensões com deformações lineares (WHITE, 2011). De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), existem nove componentes de tensão viscosa, dos quais seis são independentes (Equação 16).

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \\ \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \\ \tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

A substituição das tensões viscosas presentes na Equação 16 nas Equações 13, 14 e 15 dão origem às equações de Navier-Stokes (Equações 17 a 19) (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla(\rho u \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla(\mu \nabla u) + S_{Mx} \quad (17)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla(\rho v \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla(\mu \nabla v) + S_{My} \quad (18)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \nabla(\rho w \mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla(\mu \nabla w) + S_{Mz} \quad (19)$$

A partir das Equações 4, 17, 18 e 19, é possível notar que as variáveis dependentes aparentam obedecer a um princípio de geral de conservação (PATANKAR, 1980). Considerando uma variável dependente genérica ϕ , sua equação diferencial é

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla(\rho \phi \mathbf{U}) = \nabla(\Gamma \nabla \phi) + S_{\phi} \quad (20)$$

Em que Γ é o coeficiente de difusão, e S_{ϕ} é o termo fonte. A Equação 20 é conhecida como equação de transporte geral por destacar os diversos processos de transporte de uma propriedade genérica ϕ (Tabela 1). A variável dependente ϕ pode ser trocada por várias outras propriedades, como massa, velocidade, temperatura entre outros.

Quadro 1 – Processos de transporte destacados pela equação geral de transporte (Equação 20)

Termo	Fenômeno de transporte
$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}$	Termo transiente que representa a taxa de aumento de ϕ em uma posição fixa do espaço.
$div(\rho \phi \mathbf{U})$	Termo convectivo que representa a taxa líquida de fluxo de ϕ para fora do elemento de fluido.
$div(\Gamma grad \phi)$	Termo difusivo que representa a taxa de aumento de ϕ devido à difusão.
S_{ϕ}	Termo fonte que representa a taxa de aumento de ϕ devido a fontes.

Fonte: Autor (2023).

2.2.2 Turbulência

Segundo Regev et al. (2016), o fenômeno da turbulência pode ser definido como uma distribuição espacialmente complexa de vorticidade que é caoticamente

transportada pelo escoamento, sendo um regime essencialmente tridimensional. Esses vórtices interagem entre si, eventualmente dando origem ao que é conhecido como turbulência completamente desenvolvida, que abrange uma variedade de escalas de comprimento (tamanhos de vórtices), e, por sua vez, os vórtices são denominados redemoinhos turbulentos (*eddies*, em inglês) e podem ser considerados as unidades fundamentais de um escoamento em regime turbulento (REGEV et al., 2016). Uma característica fundamental dessa classe de escoamento é a variação significativa e aleatória do campo de velocidade do fluido, tanto em termos de posição quanto de tempo (POPE, 2000). Nesse regime, o campo de velocidade torna-se uma variável aleatória, significando apenas que $U(x, y, z, t)$ não mantém o mesmo valor em cada repetição de um experimento nas mesmas condições de execução (POPE, 2000). Em um escoamento turbulento, suas propriedades são decompostas através da decomposição de Reynolds (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Tal decomposição divide as grandezas físicas do escoamento em uma componente de valor médio constante ($\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}, \dots$) e uma componente oscilante $[u'(t), v'(t), w'(t), p'(t), \dots]$ (Figura 8). Conforme Ferziger e Perić (2002), o parâmetro médio ao longo do tempo pode ser uma função de apenas duas coordenadas, mas as flutuações turbulentas sempre exibem uma natureza espacial tridimensional. Por exemplo, o campo de velocidade $U(x, y, z, t)$ e suas componentes $u(x, t)$, $v(y, t)$ e $w(z, t)$ podem ser decompostos da seguinte forma:

$$\begin{aligned} U &= \bar{U} + U' \\ u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \end{aligned} \tag{21}$$

Os valores médios são obtidos por um procedimento de média, e existem três formas distintas de média de Reynolds (BLAZEK, 2005):

1. **Média temporal** - apropriado para a turbulência estacionária (turbulência estatisticamente constante):

$$\bar{u} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u \, dt \tag{22}$$

Como consequência, o valor médio não varia no tempo, apenas no espaço. Na prática, $T \rightarrow \infty$ implica que o intervalo de tempo T deve ser significativamente maior que a escala de tempo típica das flutuações turbulentas (BLAZEK, 2005);

2. **Média espacial** - indicado para situações de turbulência homogênea:

$$\bar{u} = \lim_{V \rightarrow \infty} \frac{1}{V} \int_V u \, dV \tag{23}$$

Em que \forall corresponde ao volume de um volume de controle. Nesse caso, \bar{u} é uniforme no espaço, mas varia no tempo;

3. Média de conjunto - apropriado para turbulência em geral:

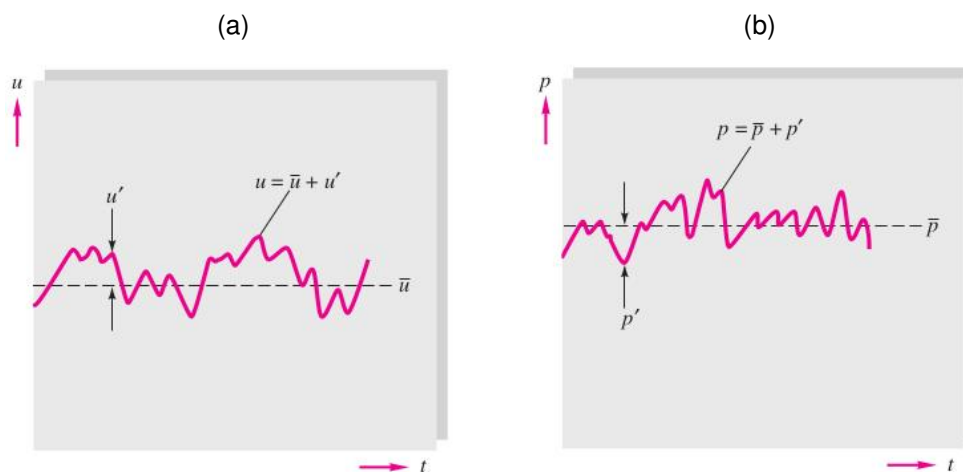
$$\bar{u} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n \quad (24)$$

Em que N corresponde ao número de experimentos idênticos (com condições iniciais e de contorno que diferem por perturbações infinitesimais aleatórias), nos quais $U(x, y, z, t) = U_n(x, y, x, t)$ no n -ésimo termo (WILCOX, 2006). Aqui, o valor médio da componente x do campo de velocidade U , \bar{u} , ainda permanece uma função do tempo e das coordenadas espaciais (BLAZEK, 2005).

Blazek (2005) aponta que, para as três definições, a média da parte flutuante é zero, ou seja, $\overline{v'_i} = 0$. Além disso, $\overline{v'_i v'_i} \neq 0$ e $\overline{v'_i v'_j} \neq 0$ (desde que ambas velocidade v'_i e v'_j sejam correlacionadas) (BLAZEK, 2005). Convém desatacar que os subscritos i e j equivalem às coordenadas x, y ou z , quando forem 1, 2 ou 3, respectivamente.

Em casos em que o escoamento turbulento é simultaneamente estacionário e homogêneo, todas as três formas de média são equivalentes, fenômeno conhecido como a hipótese ergódica (BLAZEK, 2005).

Figura 8 – Decomposição das variáveis turbulentas médias e oscilantes: (a) em relação à velocidade; (b) em relação à pressão



Fonte: (WHITE, 2011).

De acordo com Pope (2000), uma característica crucial da turbulência é sua habilidade de transportar e misturar fluido de maneira significativamente mais eficiente do que um escoamento laminar equivalente. Esse processo de mistura, apesar de ser realizada por meio da difusão, é frequentemente chamado de difusão turbulenta (FERZIGER; PERIĆ, 2002). Além dos atributos mencionados anteriormente, escoamentos

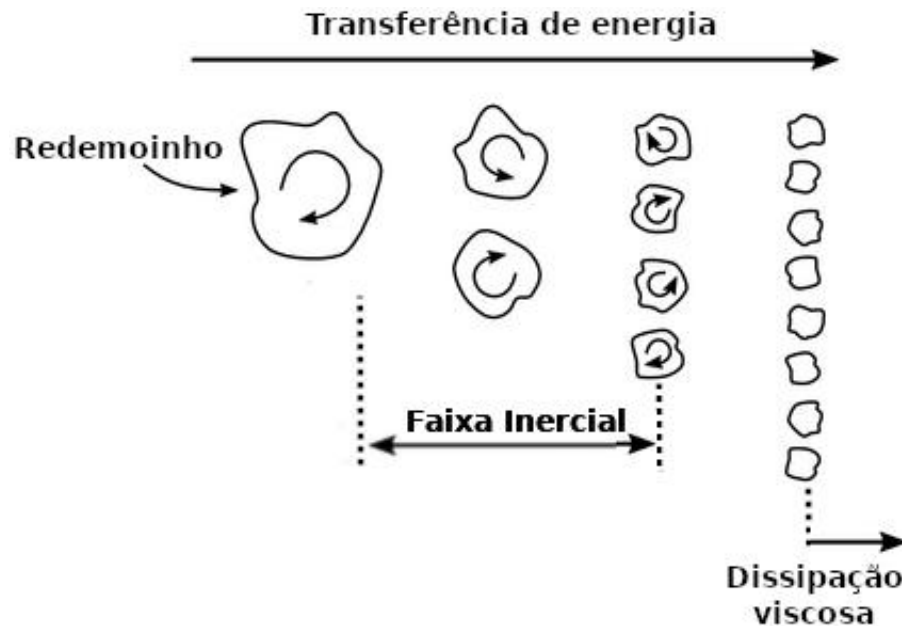
turbulentos também são caracterizados pelas seguintes propriedades (FERZIGER; PERIĆ, 2002):

- Eles contêm uma grande quantidade de vorticidade, sendo o estiramento de vórtices um dos principais mecanismos pelos quais a intensidade da turbulência é aumentada;
- Devido à difusão turbulenta, a turbulência aproxima fluidos com momentos diferentes e, a partir da ação dos efeitos viscosos oriundos do contato, há a redução dos gradientes de velocidade, diminuindo a energia cinética do escoamento; ou seja, a mistura é um processo dissipativo. A energia perdida é convertida de maneira irreversível em energia interna do fluido. No entanto, ao mesmo tempo, a mistura eficiente resulta em coeficientes de difusão elevados para massa, momento e calor (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007);
- Eles flutuam em uma ampla gama de escalas de comprimento e tempo e isso torna a simulação numérica direta de escoamentos turbulentos muito difícil.

Ademais, no regime turbulento, Versteeg e Malalasekera (2007) apontam que vórtices menores são intensamente esticados por vórtices maiores e de forma mais suave pelo escoamento médio, o que faz com que a energia cinética seja transmitida dos grandes vórtices para vórtices progressivamente menores, em um fenômeno conhecido como cascata de energia (Figura 9). Os vórtices grandes, muito provavelmente originados por uma instabilidade do escoamento, são por sua vez suscetíveis a instabilidades e se desintegram em vórtices de escala menor, os quais se fragmentam em vórtices ainda menores e assim sucessivamente (REGEV et al., 2016). A viscosidade microscópica não influencia esse processo, uma vez que o número de Reynolds permanece elevado em escoamentos turbulentos, o que caracteriza também o fato desse processo de cascata ser majoritariamente influenciado por forças inerciais. A cascata de energia é finalizada quando escalas de dissipação microscópica viscosa são atingidas (REGEV et al., 2016).

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), muitos, senão a maioria, dos escoamentos de fluidos de relevância em engenharia são turbulentos. Esse fenômeno está presente em diversos ramos da engenharia como em hidráulica, combustão, aerodinâmica, acústica e em refrigeração e condicionamento de ar. Em sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC) de automóveis, por exemplo, a presença da turbulência é particularmente significativa. A turbulência influencia diretamente a transferência de calor e a distribuição de velocidade do fluxo de ar, como mostrado por Sip et al. (2023), afetando assim o desempenho térmico e a eficiência energética desses sistemas. Assim, há uma necessidade em desenvolver modelos que permitam

Figura 9 – Fluxo de energia dentro as escalas de turbulência



Fonte: Adaptado de Greenshields e Weller (2022).

a compreensão de experimentos e observações acerca do fenômeno da turbulência, ao mesmo tempo em que oferecem ferramentas para a previsão e controle efetivo de escoamentos turbulentos (REGEV et al., 2016).

2.2.2.1 Métodos de turbulência

Como comentado anteriormente, escoamentos turbulentos são caracterizados por sua natureza caótica e não determinística, tornando-os difíceis de estudar e simular. Em uma tentativa de adicionar as características desse regime em uma forma numérica, diferentes formas de modelagem da turbulência têm sido desenvolvidas, as quais fornecem ferramentas matemáticas para descrever o comportamento de escoamentos turbulentos. Os métodos podem ser agrupados em três categorias (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007):

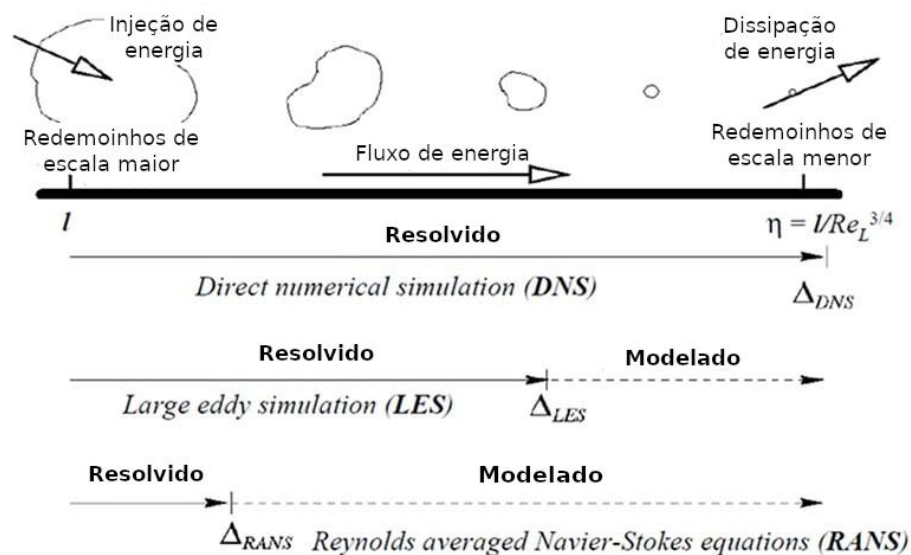
- **Direct numerical simulation (DNS):** o método DNS consiste em resolver as equações de Navier-Stokes em regime transiente, abrangendo todas as escalas de um escoamento turbulento, sem a necessidade de modelagem matemática para os efeitos da turbulência (FARAH, 2021). Por conta disso, para implementar soluções DNS, são necessárias malhas extremamente finas, integralmente tridimensionais, computadores de grande capacidade e uma quantidade substancial de tempo de processamento (ÇENGEL; CIMBALA, 2015);
- **Large eddy simulation (LES):** este método representa uma forma intermediária de cálculos de turbulência que monitora o comportamento dos redemoinhos

maiores, envolvendo a filtragem espacial das equações de Navier-Stokes não estacionárias antes dos cálculos para permitir a passagem dos redemoinhos maiores e rejeitar os menores (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Usando essa abordagem, os recursos de vórtices turbulentos não permanentes em grande escala são tratados, ao passo que os vórtices turbulentos dissipativos em pequena escala são modelados, o que consiste uma simplificação do DNS (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). Apesar de exigir um menor recurso computacional do que o DNS, o LES ainda demanda um elevado poder computacional;

- **Modelos de turbulência para as equações de Navier-Stokes média de Reynolds (RANS, *Reynolds-averaged NavierStokes*):** neste método, a atenção se volta para o escoamento médio e os efeitos da turbulência nas propriedades médias do escoamento (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Antes da aplicação de métodos numéricos, é feita uma média temporal das equações de Navier-Stokes, o que resulta em termos adicionais nessas equações devido às interações entre várias flutuações turbulentas: as tensões de Reynolds (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

A Figura 10 mostra comparativos entre os três métodos apresentados anteriormente.

Figura 10 – Capacidade dos métodos de resolver com base na escala dos redemoinhos



Fonte: Adaptado de Solmaz (2023).

Os recursos computacionais necessários para uma estimativa razoavelmente precisa dos efeitos da turbulência são moderados, tornando a abordagem de modelos de turbulência para as equações RANS a base dos cálculos de escoamentos turbulentos em engenharia ao longo dos últimos anos (VERSTEEG; MALALASEKERA,

2007). Apesar de seu amplo uso, convém enfatizar que modelos de turbulência são aproximações que dependem consideravelmente de constantes empíricas para o fechamento matemático de suas equações (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). Nesse ponto, Çengel e Cimbala (2015) comentam que, apesar de que uma malha refinada resultar em uma melhor precisão numérica, a exatidão física da solução é também limitada pela precisão intrínseca do modelo de turbulência escolhido.

2.2.2.2 Modelos de turbulência

As equações governantes do método RANS a partir da aplicação da média temporal (Equação 22) nas equações da continuidade (Equação 5) e de Navier-Stokes (Equações 17 a 19). Com as devidas manipulações algébricas, as seguintes equações podem ser obtidas:

$$\text{div } \bar{\mathbf{U}} = 0 \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \nabla(\bar{u}\bar{\mathbf{U}}) = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \nabla(\nabla \bar{u}) + \\ & + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(-\rho \overline{u'^2})}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho \overline{u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \nabla(\bar{v}\bar{\mathbf{U}}) = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \nabla(\nabla \bar{v}) + \\ & + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(-\rho \overline{u'v'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho \overline{v'^2})}{\partial y} + \frac{\partial(-\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \nabla(\bar{w}\bar{\mathbf{U}}) = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \nabla(\nabla \bar{w}) + \\ & + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(-\rho \overline{u'w'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho \overline{v'w'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\rho \overline{w'^2})}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (28)$$

Em que ν é a viscosidade cinemática do fluido e \bar{p} é a componente média da pressão a partir da decomposição de Reynolds.

A Equação 25 é a equação da continuidade para o escoamento médio e as Equações 26, 27 e 28 são as equações de Navier-Stokes médias de Reynolds (RANS). À parte da substituição dos valores médios, a única discrepância entre as equações de momento em regime laminar (Equações 17 a 19) e tempo médio (Equações 26 a 28) é a inclusão da correlação de velocidades do tipo $\overline{u'_i u'_j}$. Conforme aponta Wilcox (2006), é nesse ponto onde reside o problema fundamental da turbulência.

Os termos de tensão adicionais resultam de seis estresses adicionais: três tensões normais (τ_{ii}) e três tensões de cisalhamento (τ_{ij}) (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007):

$$\begin{aligned}
\tau_{xx} &= -\rho \overline{u'^2} \\
\tau_{yy} &= -\rho \overline{v'^2} \\
\tau_{zz} &= -\rho \overline{w'^2} \\
\tau_{xy} = \tau_{yx} &= -\rho \overline{u'v'} \\
\tau_{xz} = \tau_{zx} &= -\rho \overline{u'w'} \\
\tau_{yz} = \tau_{zy} &= -\rho \overline{v'w'}
\end{aligned}
\tag{29}$$

As tensões presentes na Equação 29 são chamadas de tensões de Reynolds (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Essas tensões, as quais surgem como incógnitas nas equações de Reynolds, são calculadas por meio de um modelo de turbulência, seja pela aplicação da hipótese de viscosidade turbulenta ou de maneira mais direta através das equações modeladas de transporte de tensão de Reynolds (POPE, 2000). Esses modelos são classificados de acordo com o número de equações de transporte adicionais que são incorporadas ao modelo numérico, o qual, em um caso laminar e isotérmico, possuiria apenas quatro equações de transporte (uma de continuidade e três de Navier-Stokes) (Quadro 2).

Quadro 2 – Classificação dos modelos de turbulência

Número de equações de transporte extras	Modelo
0	<i>Mixing length</i>
1	<i>SpalartAllmaras</i>
2	<i>k – ε</i>
	<i>k – ω</i>
	<i>SST k – ω</i>
	Tensão algébrica
7	Tensão de Reynolds

Fonte: Adaptado de Versteeg e Malalasekera (2007).

É importante reconhecer que não há um único modelo de turbulência capaz de prever de maneira confiável todos os tipos de escoamentos turbulentos, cada um possui suas vantagens e limitações (BLAZEK, 2005).

Os modelos de turbulência de duas equações são provavelmente os mais populares, pois oferecem um compromisso aceitável entre o modelo de tensão de Reynolds, mais precisos mas computacionalmente caros, e os modelos de uma equação ou modelos algébricos, menos rigorosos (THANGAM, 1991). Esses modelos, além de calcular a energia cinética específica turbulenta (k), também consideram a escala de comprimento da turbulência ou equivalente, tornando-os completos e capazes de

prever propriedades de um escoamento turbulento sem necessidade prévia de conhecimento da estrutura da turbulência (WILCOX, 2006).

O modelo $k-\epsilon$ é o modelo de turbulência completo mais amplamente utilizado, nos quais duas equações de transporte do modelo são resolvidas para duas quantidades de turbulência, a saber, a energia cinética específica turbulenta (k) e a dissipação turbulenta por unidade de massa (ϵ) (POPE, 2000). Pope (2000) afirma que, embora tal modelo seja geralmente aceitavelmente preciso para escoamentos simples, ele pode ser consideravelmente impreciso para escoamentos complexos, a ponto de os padrões médios do escoamento calculados serem qualitativamente incorretos.

O segundo modelo de duas equações mais amplamente utilizado é o modelo $k-\omega$. Nesse modelo, as duas equações de transporte extras são em relação à energia cinética específica turbulenta (k) e à taxa de dissipação específica (ω) (POPE, 2000). Para escoamentos em camadas limite, segundo Pope (2000), o modelo $k-\omega$ é superior tanto no tratamento da região viscosa próxima à parede quanto na consideração dos efeitos de gradientes de pressão na direção do escoamento em relação ao modelo $k-\epsilon$. No entanto, o tratamento de limites de corrente não turbulentos é problemático (POPE, 2000).

Em um meio termo entre esses modelos de duas equações anteriores, há o modelo *SST* $k-\omega$. Tal modelo foi desenvolvido de tal forma que haja uma transformação do modelo $k-\epsilon$ em um modelo $k-\omega$ na região próxima à parede e seja o modelo $k-\epsilon$ padrão na região totalmente turbulenta, distante da parede (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). O cálculo da tensão de Reynolds e a equação k são os mesmos do modelo $k-\omega$, mas a equação da dissipação é transformada em uma equação de taxa de dissipação através da substituição de $\epsilon = k\omega$ (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

2.2.3 Preâmbulo

De acordo com Fox et al. (2014), as equações que descrevem o escoamento de fluidos não são triviais de serem resolvidas de forma analítica. Em alguns casos nas quais geometrias físicas e condições de contorno ou iniciais são simples e o termo não linear (advectivo) é negligenciável, as equações governantes podem ser reduzidas a um formato solucionável analiticamente. No entanto, em muitos casos práticos, essa simplificação não representa de forma fiel a realidade física do problema, visto que a maioria dos escoamentos incompressíveis são víscidos e escoam através de geometrias complexas, sendo, conseqüentemente, o CFD a única opção (FOX et al., 2014).

As simulações de CFD possuem uma vantagem considerável em relação às experimentações empíricas. Experimentos convencionais têm limitações, permitindo a análise de dados somente em locais específicos do sistema, onde sensores e medi-

dores estão instalados (SZPICER et al., 2023). Por outro lado, as simulações de CFD possibilitam aos pesquisadores explorar qualquer local em uma região de interesse e avaliar seu desempenho considerando diversos parâmetros de fluxo e térmicos. Além disso, a obtenção de dados de engenharia necessários para o design por meio de experimentos tradicionais é significativamente mais dispendiosa (FERZIGER; PERIĆ, 2002). As simulações permitem que os engenheiros modelem diferentes condições de processo, e, adicionalmente, muitos processos de transferência de calor e de fluxo que não podem ser facilmente replicados em um ambiente de laboratório (SZPICER et al., 2023). Uma vantagem adicional, segundo Szpicer et al. (2023), reside no fato de que é normalmente possível conduzir muitas simulações em um período consideravelmente mais curto em comparação com a realização de testes laboratoriais. Com base nesses fatores, a fluidodinâmica computacional tem sido amplamente utilizada na indústria atualmente, especialmente em estudos de viabilidade e dimensionamento de equipamentos. Isso ocorre porque a abordagem CFD complementa a abordagem experimental, reduzindo assim a complexidade envolvida na criação de protótipos e na realização de testes-piloto. De acordo com Maliska (2004), a combinação eficaz de simulações numéricas e experimentos de laboratório resulta em projetos de maior qualidade e menor custo.

Os códigos de CFD têm sua estrutura definida pelos algoritmos numéricos capazes de abordar modelos matemáticos, vistos anteriormente, relacionados ao escoamento de fluidos e aproximá-los por um conjunto de equações algébricas, cuja análise é possível de ser realizada em um computador. Essa aproximação é chamada de discretização, sendo feita em todo domínio espacial e temporal de um problema. Diversas abordagens são utilizadas, porém as mais significativas incluem os métodos de diferenças finitas (MDF), volumes finitos (MVF) e elementos finitos (MEF) (FERZIGER; PERIĆ, 2002). O MEF e o MDF são derivados por meio de uma dedução matemática puramente discretizada das equações diferenciais. Enquanto isso, o MVF baseia-se na realização de um balanço das propriedades dentro de cada subdomínio do domínio discretizado, resultando na obtenção de uma equação algébrica aproximada correspondente (BATISTA, 2017 apud BAUDEL, 2021).

2.2.4 Método dos volumes finitos (MVF)

Como discutido na última seção, existem uma grande variedade de métodos para a solução numérica das equações governantes de escoamento de fluidos. A maioria deles é caracterizada pelo processo composto pelos três passos a seguir, incluindo o método dos volumes finitos (HADŽIĆ, 2005):

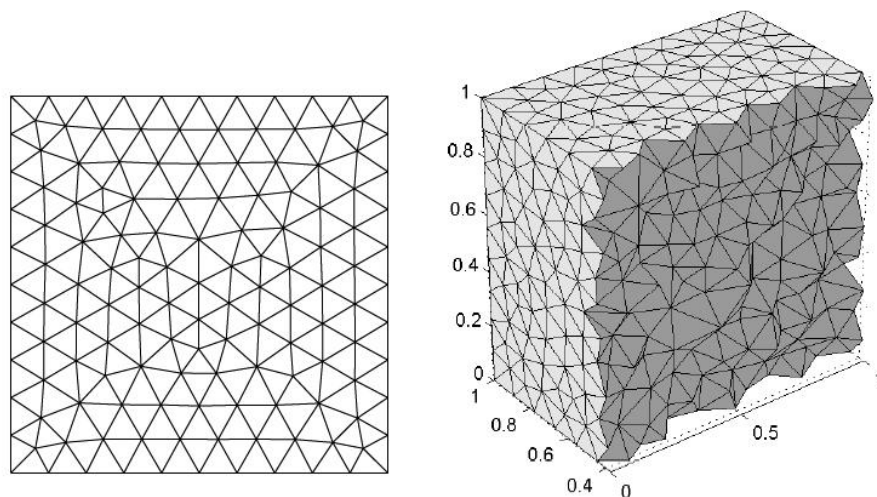
- **Discretização espacial** envolve a criação de uma grade numérica que divide o espaço contínuo em elementos discretos com pontos de cálculo em seus cen-

tros. Esses pontos são usados para calcular as soluções das variáveis dependentes, e esse processo é chamado de geração de malha;

- **Discretização do tempo** envolve dividir o intervalo de tempo total em um número finito de pequenos subintervalos chamados de passos de tempo;
- **Discretização da equação** envolve substituir os termos individuais nas equações governantes por expressões algébricas que conectam os valores das variáveis nos pontos de cálculo da malha numérica.

O método dos volumes finitos se baseia na discretização do problema contínuo original. As posições discretas onde variáveis de interesse (por exemplo, velocidade, temperatura, entre outros) devem ser calculadas são determinadas por uma malha ou grade numérica, que é, fundamentalmente, uma representação discreta do domínio geométrico no qual o problema deve ser resolvido (FERZIGER; PERIĆ, 2002). Essa malha divide o domínio da solução em um número finito de subdomínios, os quais são usualmente denominados por elementos, volumes de controle ou células. Tipos de elementos comumente utilizados incluem triângulos e quadriláteros em duas dimensões e tetraedros e hexaedros em três dimensões (Figura 11).

Figura 11 – Exemplo de malhas com elementos triangulares (imagem à esquerda) e com elementos tetraédricos (imagem à direita)



Fonte: (MORONEY, 2006).

As duas malhas presentes na Figura 11 são exemplos de malhas não estruturadas, cujos elementos não estão alinhados de maneira regular, mas, em vez disso, estão distribuídos de forma irregular em toda a região (MORONEY, 2006). De acordo com Moroney (2006), malhas não estruturadas são importantes, pois podem representar domínios complexos e irregulares.

A acurácia de uma solução de CFD é diretamente influenciada pelo número de células na malha. Em geral, de acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), quanto

maior o número de células, melhor é a acurácia da solução numérica. Tanto a acurácia da solução quanto seus custos em termos computacionais e tempo de cálculo dependem do nível de refinamento da malha (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Malhas otimizadas frequentemente são não uniformes, sendo mais refinadas em áreas onde ocorrem maiores gradientes de propriedades de ponto a ponto e menos refinadas em regiões com mudanças relativamente pequenas.

Considerando que uma malha de N nós e que, em torno de cada nó, existe um volume de controle \mathcal{V}_i de volume $\Delta\mathcal{V}_i$, de tal forma que não haja sobreposição entre os volumes de controle, o volume total da malha, \mathcal{V}_{malha} , é definido por (MORONEY, 2006):

$$\mathcal{V}_{malha} = \sum_{i=1}^N \Delta\mathcal{V}_i \quad (30)$$

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), o passo-chave do método dos volumes finitos é a integração da Equação 20 sobre um volume de controle \mathcal{V}_i :

$$\int_{\mathcal{V}_i} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} d\mathcal{V} + \int_{\mathcal{V}_i} \text{div}(\rho \phi \mathbf{U}) d\mathcal{V} = \int_{\mathcal{V}_i} \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + \int_{\mathcal{V}_i} S_\phi d\mathcal{V} \quad (31)$$

Com base na Equação 31, é possível integrá-la em todos os volumes elementares, visando à formação de um sistema de N equações algébricas, no qual cada uma das equações constituintes está para um volume de controle \mathcal{V}_i (MALISKA, 2004). Para que isso seja possível, algumas considerações são feitas, como o emprego de uma distribuição aproximada das propriedades entre os pontos nodais para determinar os gradientes nas fronteiras dos volumes de controle e a linearização do termo fonte (para um maior aprofundamento sobre as aproximações necessárias, recomenda-se a leitura do capítulo 3 de Patankar (1980) e do capítulo 4 de Versteeg e Malalasekera (2007)). Com modificações, o seguinte sistema linear é alcançado (MANICA, 2023):

$$[\mathbf{A}][\phi] = [\mathbf{b}] \quad (32)$$

Em que $[\mathbf{A}]$ é matriz que contém termos advectivos e difusivos, e a matriz $[\mathbf{b}]$, termos fontes. A solução numérica da Equação 32 traz a obtenção do campo da propriedade ϕ no domínio computacional considerado.

Em conformidade com Farah (2021), as Equações 4, 17, 18 e 19 exibem três características que tornam a solução direta dos campos de velocidade e pressão desafiadora para a obtenção dos termos de $[\phi]$ da Equação 32, necessitando assim uma abordagem numérica iterativa para a resolução:

1. As componentes de velocidade estão interligadas de forma intrínseca, já que desempenham um papel nas equações de conservação do momento e da massa. Dessa forma, as variáveis precisam satisfazer simultaneamente todas as equações;
2. A pressão representa o parâmetro mais desafiador de calcular, uma vez que aparece somente nas equações de momento. Por conseguinte, é necessário introduzir uma equação adicional para completar o sistema de equações;
3. Há também a não-linearidade nos termos associados à divergência.

Há uma ampla gama de métodos disponíveis para lidar com a questão do acoplamento pressão-velocidade mostrado anteriormente, como SIMPLE, SIMPLER, SIMPLEC e PISO (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Esses algoritmos são implementados e executados por *softwares* de CFD, os quais podem ser comerciais, como Ansys Fluent/CFX, Simcenter STAR-CCM+ e Autodesk CFD, ou *open-source*, sendo o OpenFOAM o mais conhecido entre eles.

2.2.5 OpenFOAM

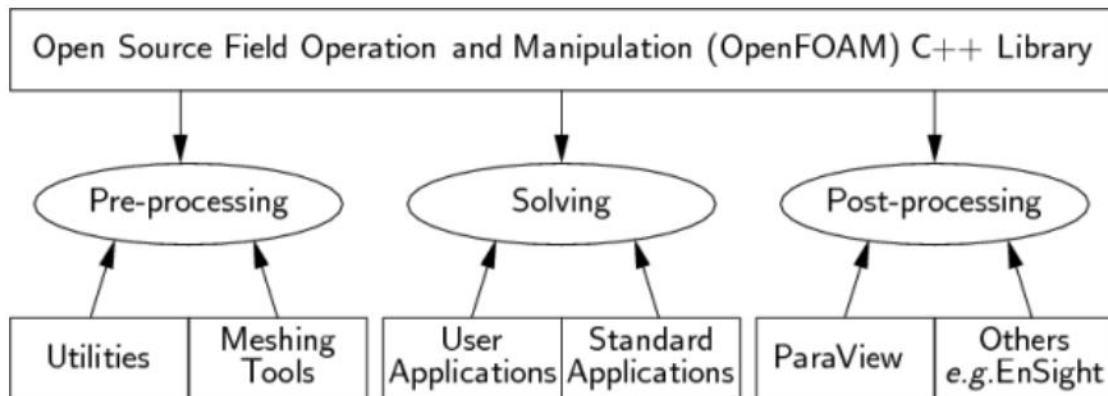
Desde que a Internet existe, há *softwares* livres e de código aberto disponíveis para download e compartilhamento. No entanto, ao longo da última década, o nível de sofisticação e qualidade de *softwares* de código aberto cresceu significativamente, em grande parte devido à adoção da programação orientada a objetos e aos repositórios de controle de versão online, tais como SourceForge e GitHub (CHEN et al., 2014). A presença de aplicativos de código aberto também permeia o ramo da fluidodinâmica computacional, como o OpenFOAM.

O OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*) é um *software* desenvolvido inicialmente por Henry Weller e Chris Greenshields em meados da década de 1990 no Imperial College, em Londres, para atender às necessidades acadêmicas e de pesquisa em CFD (CHEN et al., 2014). Ele pode ser definido como um conjunto de ferramentas para CFD escrito em C++ que contém geradores de malhas, *solvers* e utilitários de pós-processamento (Figura 12)(GREENSHIELDS, 2023a).

O OpenFOAM é executado diretamente por meio do terminal do sistema operacional e compreende uma série de algoritmos numéricos que se fundamentam nos princípios da dinâmica dos fluidos computacional. Além disso, ele incorpora uma ferramenta de pós-processamento denominada ParaView, um *software* de código aberto para manipulação e exibição de dados científicos, oferecendo ferramentas avançadas de renderização 3D, recursos de interação em 3D e ampla capacidade de criação de gráficos em 2D.

Com relação à geração de malha, o OpenFOAM possui uma gama de opções de geradores nativos. Dentre às possibilidades, convém apontar dois dos mais

Figura 12 – Estrutura do OpenFOAM



Fonte: (GREENSHIELDS, 2023a)

comumente utilizados: *blockMesh* e *snappyHexMesh*. *BlockMesh* é a ferramenta de geração de malha mais básica no OpenFOAM e pode ser usada para criar malhas hexaédricas em geometrias que podem ser descritas por meio de blocos hexaédricos sendo, portanto, aplicável a geometrias simples (MEDINA et al., 2016). Os dados de entrada incluem as coordenadas dos oito vértices de um paralelepípedo e os números de células em cada direção (n_x, n_y, n_z) , gerando uma malha retangular com um total de $n_x \times n_y \times n_z$ células (CHEN et al., 2014). No caso de problemas que envolvem geometrias mais complexas, a utilidade do OpenFOAM *snappyHexMesh*, uma ferramenta de geração automática de malha que ajusta elementos hexaédricos a uma superfície, pode ser utilizada (CHEN et al., 2014).

2.2.6 *snappyHexMesh*

O *snappyHexMesh* é uma das ferramentas do OpenFOAM mais importantes para a geração de malhas tridimensionais contendo células hexaédricas (*hex*) e células hexaédricas divididas (*split-hex*) a partir de uma geometria de superfície triangulada no formato *Stereolithography* (STL), sendo adequada para trabalhos com geometrias complexas. O gerador *snappyHexMesh* utiliza uma abordagem na qual a malha se ajusta à superfície de forma aproximada por meio de um processo iterativo que refina uma malha inicial e molda a malha hexaédrica dividida resultante para se adequar à superfície da geometria (CFD DIRECT LTD, 2023). A geração de malha com esse utilitário é constituída por quatro principais etapas (SIMSCALE, 2023a):

- Na etapa inicial, denominada *Castellated Mesh Step* (em uma tradução literal em português, Etapa de Malha Acastelada), é gerada a malha de base de referência em torno do objeto STL, podendo ou não incluir refinamentos;
- Posteriormente, a malha resultante é ajustada à superfície do objeto no passo de *Snapping Step* (em uma tradução literal em português, Etapa de Ajuste) na

superfície da geometria;

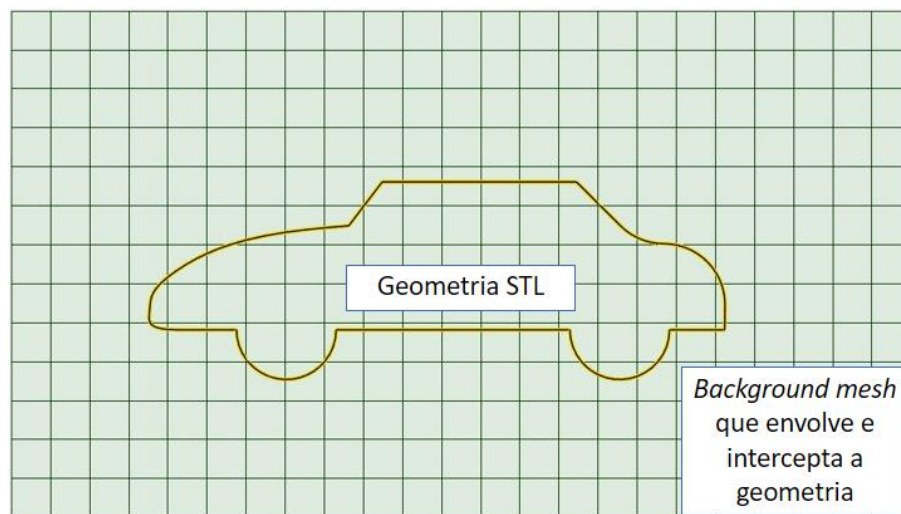
- Caso seja indicado, camadas de malha são criadas em superfícies selecionadas e alinhadas com a malha principal durante o passo de *Layer Addition Step* (em uma tradução literal em português, Etapa de Adição de Camadas);
- Por último, na etapa *Mesh Quality Assessment Step* (em uma tradução literal em português, Etapa de Avaliação da Qualidade da Malha), a malha final é examinada em busca de células irregulares ou de baixa qualidade, e são realizadas iterações adicionais até que os padrões de qualidade sejam alcançados.

Esses quatro passos são brevemente explicados a seguir.

2.2.6.1 *Castellated Mesh Step*

Nesta etapa, uma malha inicial que envolve toda a geometria STL deve ser gerada. Essa pode ser gerada por meio do *blockMesh*, uma outra utilidade de geração de malha do *software*, como mostra o exemplo contido na Figura 13.

Figura 13 – Malha inicial ao redor e dentro da geometria STL



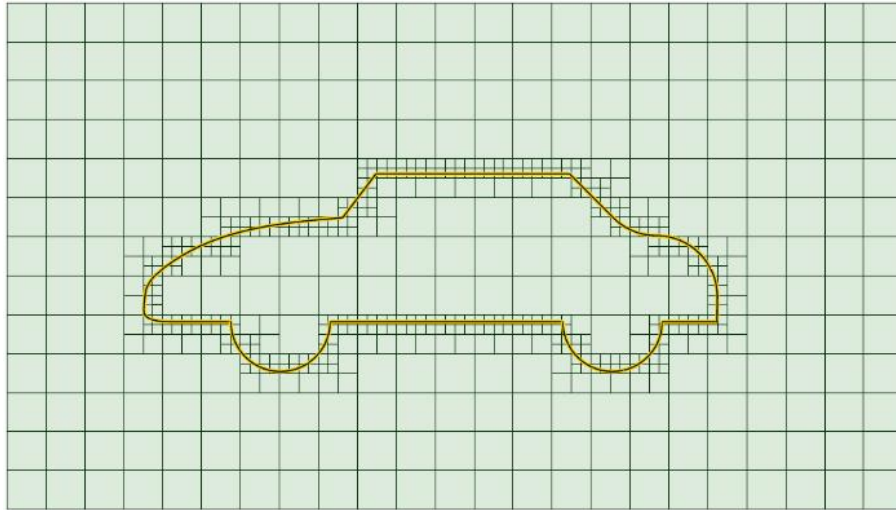
Fonte: Adaptado de SimScale (2023a).

De acordo com CFD DIRECT LTD (2023), a malha de fundo deve se atentar a três critérios:

- Deve ser constituída por somente células hexaédricas;
- A relação de aspecto da célula deve ser próxima de 1, especialmente nas proximidades das superfícies onde a etapa de *snapping* é realizada. Caso contrário, a convergência desse procedimento pode ser lenta, podendo até mesmo falhar;
- É necessário que pelo menos uma aresta de célula interaja com a tri-superfície; em outras palavras, uma malha de apenas uma célula não é adequada.

Após sua criação ao redor e dentro do objeto, a malha de fundo é refinada de acordo com as especificações de refinamento de aresta e superfície e, em seguida, é dividida nas regiões próximas às superfícies da geometria STL (Figura 14), antes de eliminar as células da malha que se encontram no interior da geometria.

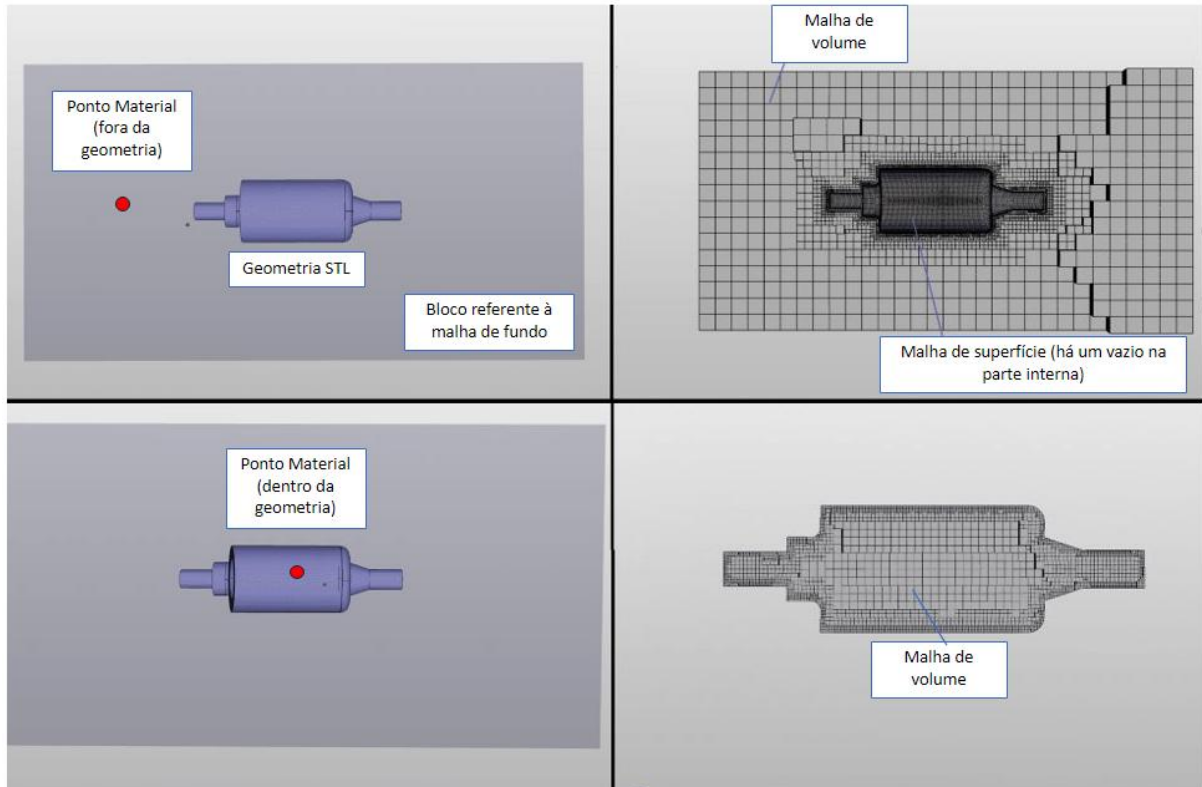
Figura 14 – Divisão de células refinadas que intersectam a superfície do objeto.



Fonte: (SIMSCALE, 2023a).

Após a conclusão da divisão, inicia-se o processo de remoção de células, que é baseado na especificação do ponto material. Segundo SimScale (2023b), o ponto de material é empregado para definir o espaço contido dentro da malha de fundo que é preservado como a malha resultante da etapa de remoção de células. A definição dessa localização é importante, pois é determinante em definir se a simulação é interna ou externa à geometria STL (Figura 15). No *snappyHexMesh*, isso é feito por meio da definição do parâmetro *locationInMesh*, que se localiza no dicionário *snappyHexMeshDict*, comumente encontrado dentro do diretório *system*.

Figura 15 – Uma ilustração de um ponto material localizado fora do objeto e a malha correspondente (imagens superiores) e outro exemplo em que o ponto de material é posicionado dentro do objeto, juntamente com a malha correspondente (imagens inferiores)

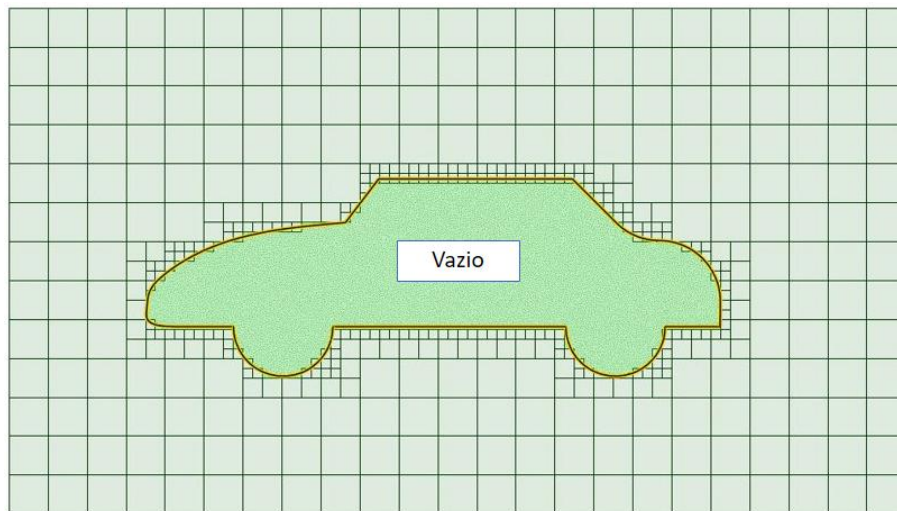


Fonte: Adaptado de SimScale (2023b).

No caso de se definir um ponto material fora da geometria do exemplo mostrado pela Figura 14, todas os volumes de controle do interior são removidos, restando apenas os de fora (Figura 16), caracterizando uma simulação externa.

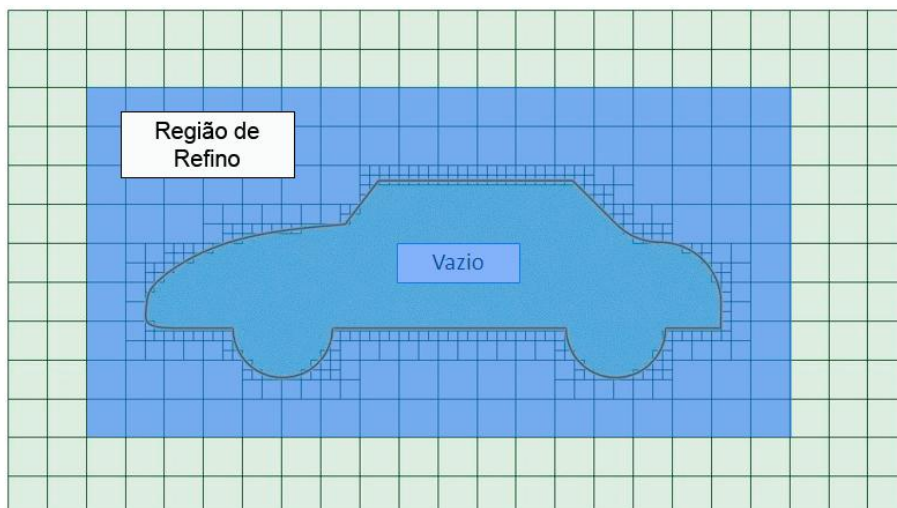
Uma vez feita a remoção, a malha final pode passar por refinamentos adicionais de acordo com regiões especificadas, como mostra a Figura e o nível de refinamento em cada uma. Isso é feito no sub-dicionário *refinementRegions* no dicionário *castellatedMeshControls* encontrado no diretório *system* (CFD DIRECT LTD, 2023). O resultado do refino sobre o exemplo da Figura 17 é mostrado pela Figura 18.

Figura 16 – Malha final após o processo de remoção de células



Fonte: Adaptado de SimScale (2023a).

Figura 17 – Região selecionada para o refino de malha

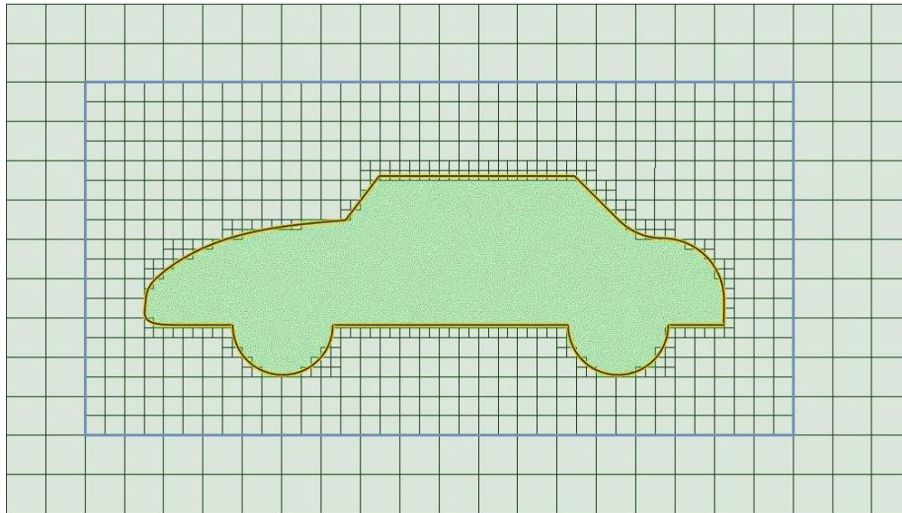


Fonte: Adaptado de SimScale (2023a).

Com base nessa região definida, há três modos de refino que podem ser aplicados ((CFD DIRECT LTD, 2023)):

- **inside** - refino dentro da região;
- **outside** - refino fora da região;
- **distance** - refino com base na proximidade da superfície e tem a capacidade de ajustar níveis diferentes de refino em várias distâncias utilizando o parâmetro *levels*.

Figura 18 – Malha final após o processo de refino de região



Fonte: (SIMSCALE, 2023a).

Apesar de o refino ter sido feito, ao analisar a Figura 18, pode-se perceber que há regiões onde há irregularidades na malha. No caso citado, existem elementos de malha sobre a fronteira do objeto STL que invadem o seu interior. Para resolver esse problema, existe a etapa de *snapping*.

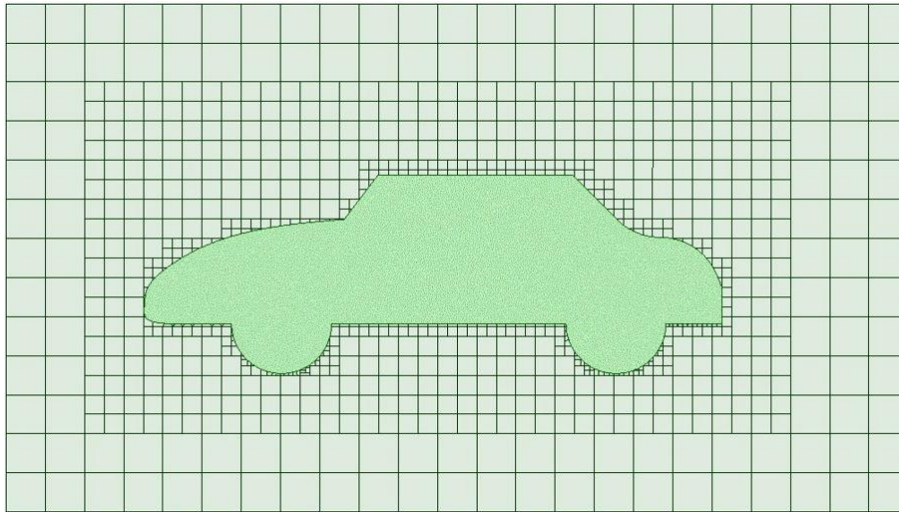
2.2.6.2 *Snapping Step*

A etapa seguinte no algoritmo *snappyHexMesh* envolve o ajuste ou projeção da malha resultante da etapa de *castelling* na superfície da geometria STL, seguindo o seguinte algoritmo (SIMSCALE, 2023a):

- Deslocar os vértices das células da malha castelada para a superfície do objeto;
- Em seguida, realizar um relaxamento na malha interna devido ao deslocamento dos vértices;
- Verificar se existem células problemáticas que não atendem aos parâmetros de qualidade da malha;
- Repetir o processo até que os padrões de qualidade sejam alcançados.

Após feito o processo de *snapping*, a malha resultante do exemplo da Figura 18 é mostrado pela Figura 19.

Figura 19 – Malha ajustada sobre a superfície da geometria após o processo de *snapping*

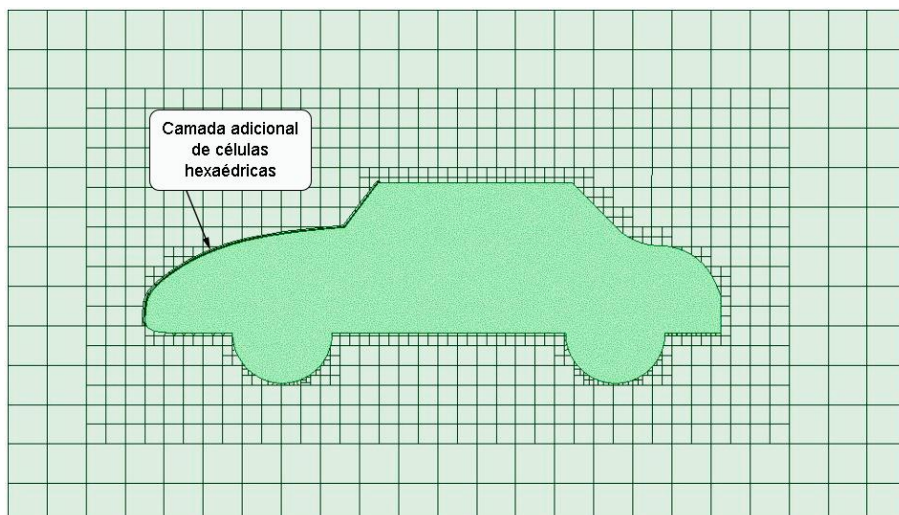


Fonte: (SIMSCALE, 2023a).

2.2.6.3 Layer Addition

A malha obtida na etapa de ajuste pode ser adequada para o propósito, embora possa criar algumas células irregulares ao longo das superfícies de fronteira (CFD DIRECT LTD, 2023). Dessa forma, existe uma etapa opcional no processo de geração de malha que adiciona camadas de células hexaédricas alinhadas à superfície de fronteira da geometria, conforme mostra a Figura 20 (CFD DIRECT LTD, 2023).

Figura 20 – Adição de camadas alinhadas à superfície selecionada do objeto



Fonte: Adaptado de SimScale (2023a).

Essa operação também é realizada de maneira iterativa e compreende algumas etapas para criar a malha necessária (SIMSCALE, 2023a). Os principais passos seriam:

- Afastamento da malha ajustada da superfície do objeto na direção normal por uma distância específica, conforme determinada pelo valor de espessura (*thickness value*);
- Relaxamento e verificação da malha interna para garantir a conformidade com os parâmetros de qualidade de malha desejados. Caso contrário, o valor de espessura é diminuído;
- Se os critérios de qualidade forem cumpridos, as camadas de células hexaédricas são adicionadas. Caso contrário, as etapas anteriores são reexecutadas. Caso não seja viável atender aos padrões de qualidade necessários, as camadas não são incluídas.

2.2.6.4 *Mesh Quality Assessment*

Na etapa final, a malha é avaliada em termos de critérios de qualidade, e o processo de geração de malha é repetido até que todas as verificações sejam aprovadas ou até que o limite global de iterações seja atingido. Se o limite de iterações for alcançado com verificações malsucedidas, a malha resultante pode conter elementos ou células de qualidade inferior (SIMSCALE, 2023a).

2.2.7 **Blender**

O Blender é um *software* de criação tridimensional gratuita e de código aberto que abrange todo o processo de produção 3D, incluindo modelagem, animação, simulação, renderização, composição, rastreamento de movimento, edição de vídeo e criação de jogos (BLENDER, 2023a). A aplicação foi inicialmente desenvolvida como um aplicativo interno pelo estúdio de animação holandês NeoGeo, sendo oficialmente lançado em 2 de janeiro de 1994 (BLENDER, 2023b). O principal autor do Blender foi Ton Roosendaal, co-proprietário da empresa e desenvolvedor de software, que escreveu os primeiros arquivos de código-fonte com o título "Blender" (BLENDER, 2023b).

A maioria das funcionalidades do Blender é direcionada a artistas de artes digitais tridimensionais. Porém, o fato de conseguir fazer edições em arquivos STL, torna-o útil para aplicações no OpenFOAM no que diz respeito à preparação de geometrias para a etapa de geração de malha, sendo esta uma parte da etapa de pré-processamento. O Blender permite a importação de arquivos STL, os quais podem ser editados utilizando ferramentas de edição do *software*. Isso faz com que seja possível realizar modificações em arquivos STL de várias formas, incluindo a adição ou remoção de elementos, a alteração do tamanho ou forma do modelo, a divisão de arquivos STL em segmentos menores e a remoção de partes indesejadas do modelo, seja por meio do modificador *Boolean* do Blender ou por meio de edições manuais na malha.

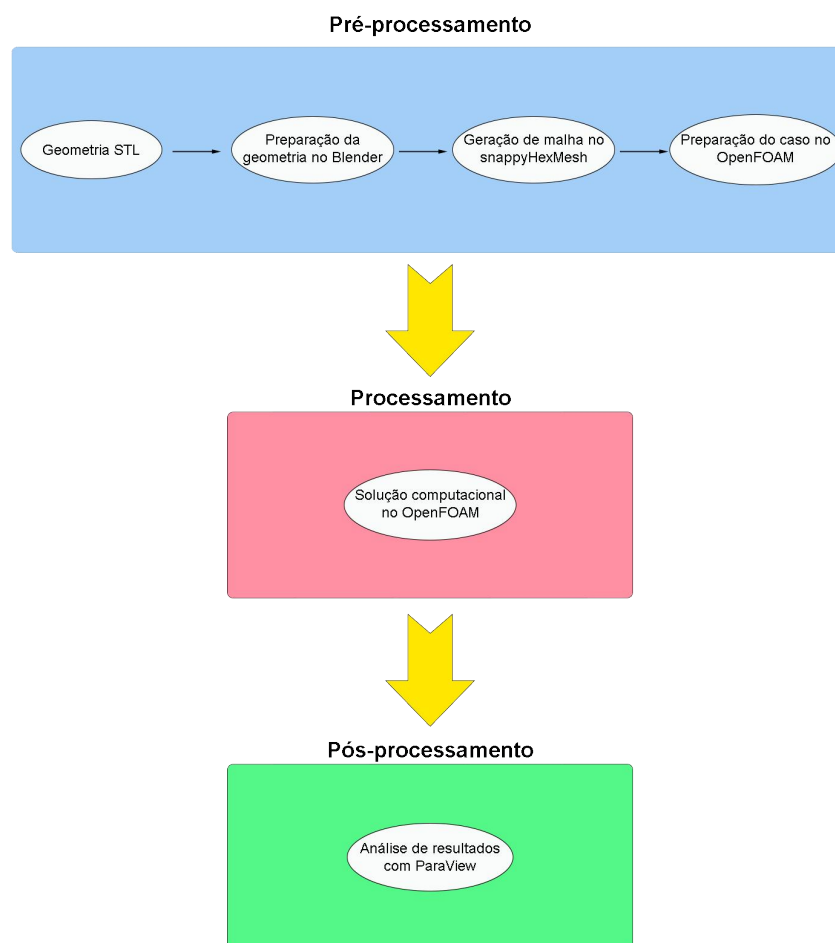
Para o OpenFOAM, aquelas ferramentas de edição presentes no editor de código-aberto permitem que um objeto STL a ser simulado sofra simplificações. Em

uma simulação CFD, antes de gerar a malha computacional, muitas vezes é necessário simplificar as geometrias. Em conformidade com Park et al. (2020), uma geometria demasiadamente complexa pode resultar em uma malha de baixa qualidade, o que pode levar a erros numéricos e à perda de acurácia nos resultados da simulação. Simplificar uma geometria envolve a redução da complexidade do modelo, eliminando detalhes desnecessários, como pequenas características ou áreas que não afetam significativamente o escoamento. Por consequência, além de se obter um processo de geração de malha mais eficiente, tempo e recursos computacionais são economizados. No entanto, é importante equilibrar a simplificação com a acurácia necessária para as necessidades específicas da simulação, garantindo que as simplificações não comprometam a representação fiel do problema físico envolvido. Além da simplificação da geometria, no Blender também é possível atribuir *boundary conditions* selecionados a conjunto de faces agrupadas e nomeadas (*patches*).

3 METODOLOGIA

Nesta seção será apresentado o fluxo de trabalho da simulação CFD feita na cabine do veículo da Renault-Dacia Duster 2011, desde a preparação da geometria até análises dos resultados obtidos. O *workflow* utilizado é representado pela Figura 21.

Figura 21 – Fluxo de trabalho da simulação CFD realizada neste estudo



Fonte: Autor (2023).

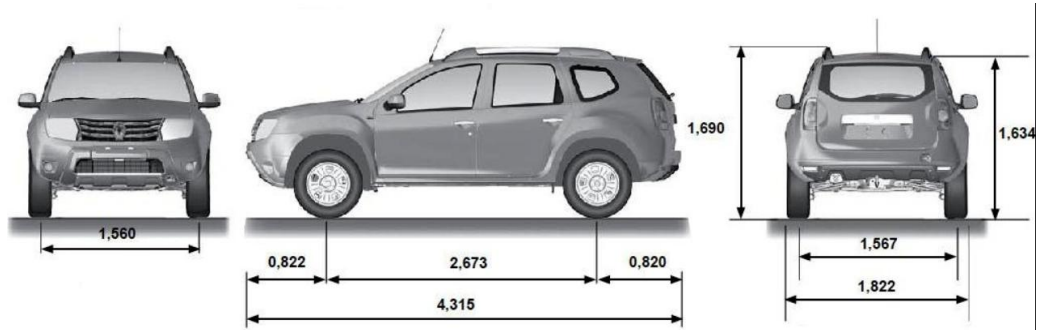
3.1 PRÉ-PROCESSAMENTO

3.1.1 Geometria e sua preparação

A geometria usada como referência neste estudo foi a cabine do Renault-Dacia Duster 2011, cujas dimensões do veículo são mostradas pela Figura 22. No entanto, não foi possível encontrar um modelo CAD do habitáculo isolado, mas sim a geometria de todo o veículo em formato STL disponibilizado em GrabCAD (2020)

(Figura 23), um ambiente virtual de colaboração gratuito baseado em nuvem em que usuários podem gerenciar, visualizar e compartilhar arquivos CAD.

Figura 22 – Dimensões, em m , reais do veículo



Fonte: (BARCIA, 2011).

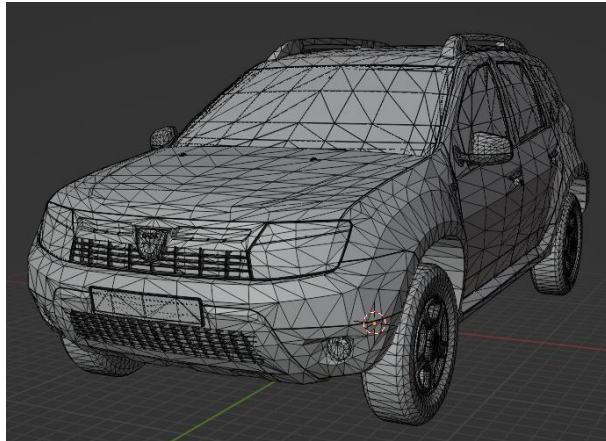
Figura 23 – Imagem renderizada da geometria STL do veículo



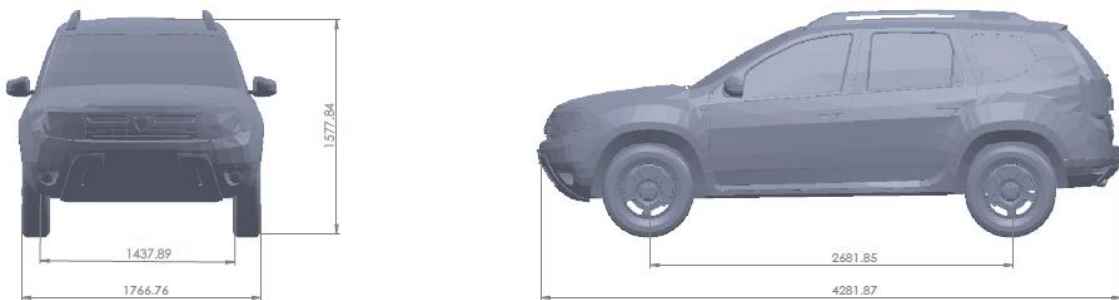
Fonte: (GRABCAD, 2020).

Ao importar a geometria do carro no Blender, nota-se que que todo veículo é constituído por faces triangulares (Figura 24), devido ao seu formato STL, e que suas dimensões são próximas às do veículo em escala real, como indicado pela Figura 25.

Figura 24 – Geometria do veículo no ambiente do Blender



Fonte: Autor (2023).

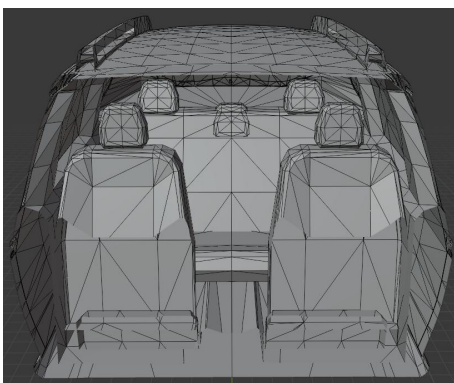
Figura 25 – Dimensões em, *mm*, da geometria STL do automóvel

Fonte: Autor (2023).

Apesar de haver simplificações, é possível notar que a cabine é verossímil à realidade, visto que preserva características geométricas equivalentes ao habitáculo do veículo em escala real, como mostram as Figuras 26 e 27.

Figura 27 – Parte traseira da cabine

(a) Modelo CAD

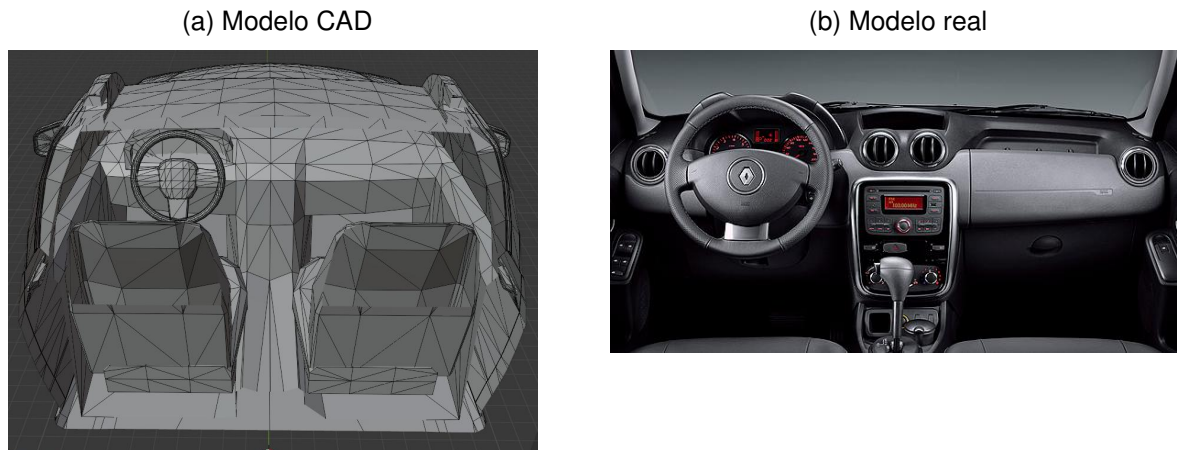


(b) Modelo real



Fonte: Autor (2023).

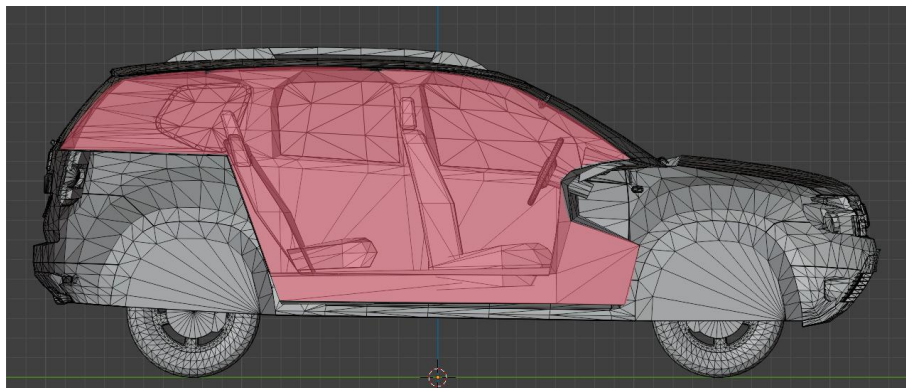
Figura 26 – Parte frontal da cabine



Fonte: Autor (2023).

Para a simulação em si, no entanto, componentes externos à cabine, tais como rodas, para-choques dianteiro e traseiro entre outros, são indiferentes aos resultados da solução numérica, sendo, conseqüentemente, apenas um gasto computacional a mais devido à presença de um maior domínio computacional. Como mostra a Figura 28, apenas a região que está destacada é o que de fato interessa à simulação.

Figura 28 – A região destacada em vermelho corresponde ao habitáculo do veículo

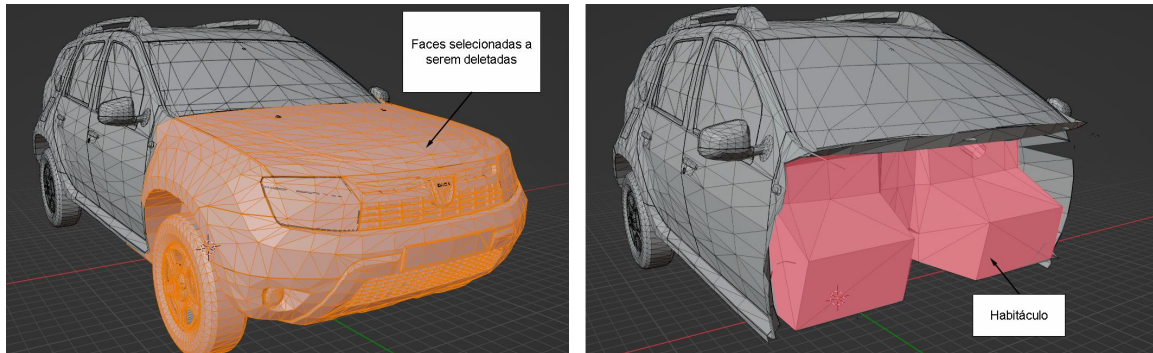


Fonte: Autor (2023).

A remoção das partes desnecessárias é feita no Blender. As faces triangulares correspondentes são selecionadas e, em seguida, deletadas (Figura 29). Esse processo é feito até que apenas as faces da cabine sobrem (Figura 30).

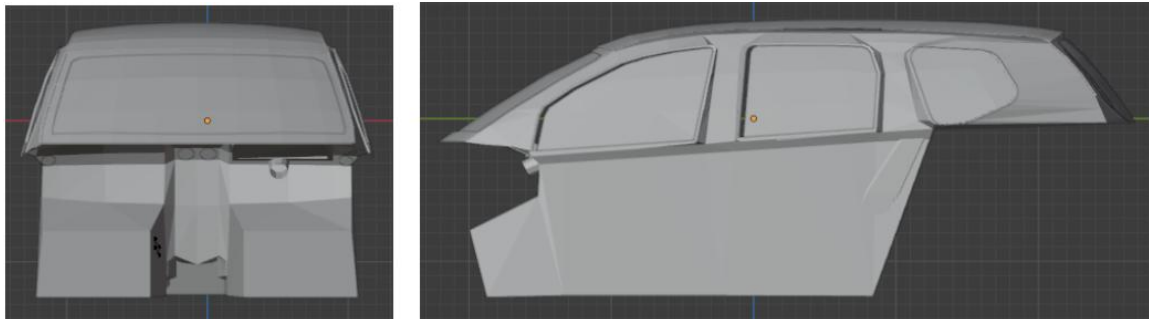
Uma outra ferramenta útil presente no Blender é a capacidade de agrupar determinadas faces da geometria STL, possibilitando separar determinadas regiões da malha para a aplicação posterior de condições de contorno. No caso da simulação deste estudo, duas regiões são separadas, *inlet* (Figura 31) e *outlet* (Figura 32), cujas condições são explicadas posteriormente. Após isso, a cabine está preparada para ser discretizada.

Figura 29 – Processo de remoção de faces da geometria STL no Blender



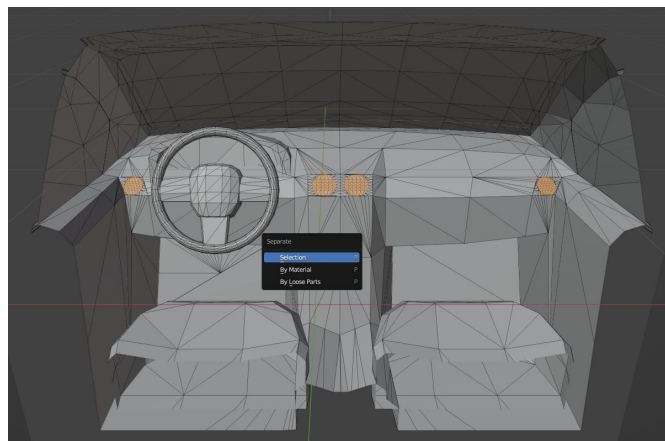
Fonte: Autor (2023).

Figura 30 – Vistas da cabine isolada



Fonte: Autor (2023).

Figura 31 – Grupo de faces correspondentes aos bocais de entrada do ar do sistema de condicionamento de ar no habitáculo

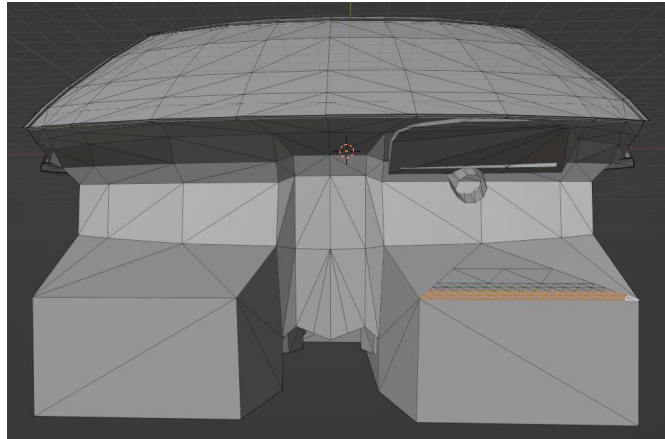


Fonte: Autor (2023).

3.1.2 Malha computacional

Devido ao grau de complexidade da geometria da cabine, para a geração de malha deste estudo, foi escolhido o gerador integrado ao OpenFOAM *snappyHexMesh* (sHM). Como explicado anteriormente na Seção 2.2.6, para iniciar a geração de malha com o gerador sHM, é necessário ter uma malha de fundo que envolva toda a geome-

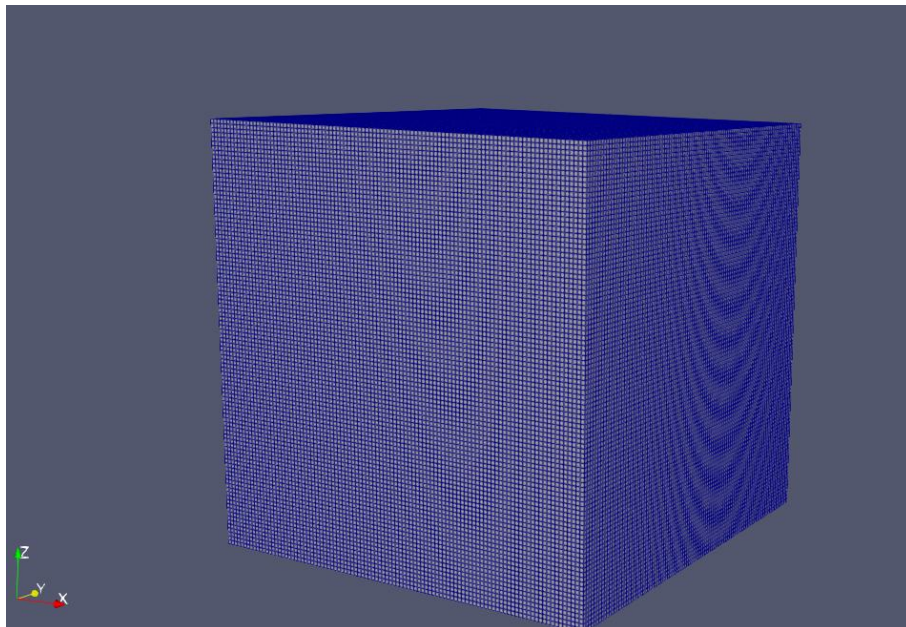
Figura 32 – Grupo de faces correspondentes à região de exaustão do ar da cabine



Fonte: Autor (2023).

tria STL e que contenha apenas elementos hexaédricos com uma razão de aspecto próxima da unidade. Para isso, é possível utilizar a utilidade *blockMesh* (bM). A malha base feita no bM constitui um cubo de arestas de 6 m com 1000000 de células (Figura 33). Dessa forma, as dimensões da geometria gerada pelo bM foram ponderadas ao visar um menor custo computacional devido a tamanho de malha.

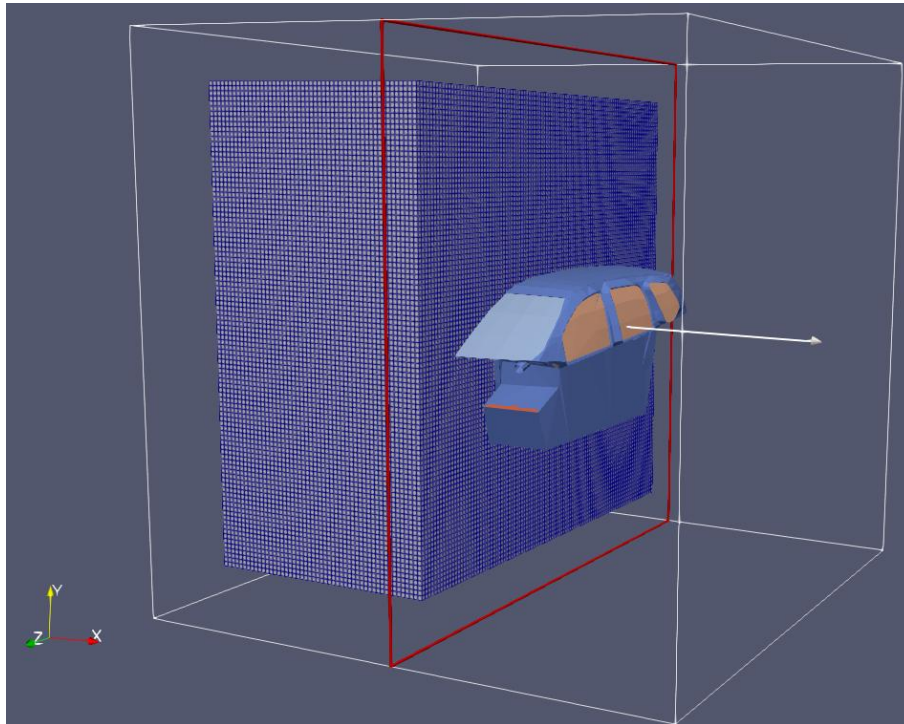
Figura 33 – Malha de base gerada no *blockMesh*



Fonte: Autor (2023).

Ou seja, com 100 divisões nas direções x , y e z . Além disso, a malha inicial envolve toda a geometria STL, como mostra a Figura 34. Uma vez que a malha de fundo está definida, a próxima etapa consiste na geração da malha no interior da cabine com o uso do sHM.

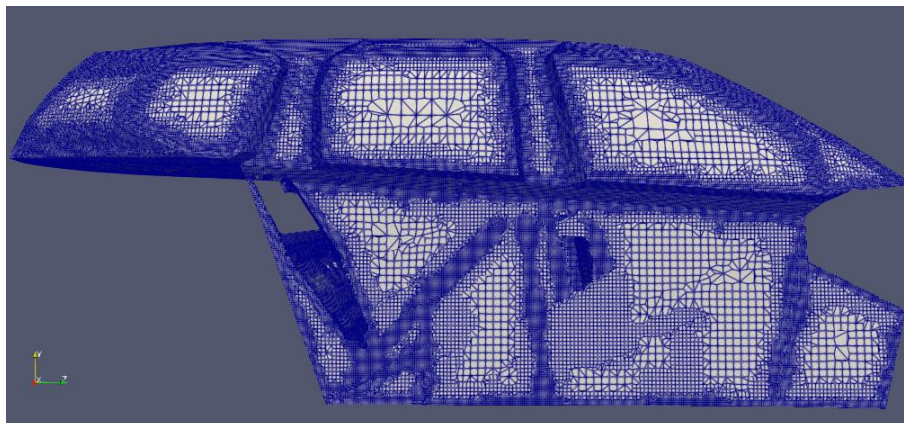
Figura 34 – Imagem seccionada da malha base mostrando que a geometria da cabine é totalmente envolvida



Fonte: Autor (2023).

A Figura 35 mostra a malha computacional gerada pelo *snappyHexMesh* no interior da cabine. Para que apenas o volume interno à geometria STL, correspondente ao volume de ar, da cabine seja discretizado, é necessário obter um ponto que seja localizado dentro do habitáculo, mas que não esteja sobre alguma face.

Figura 35 – Malha gerada no interior da cabine pelo *snappyHexMesh*

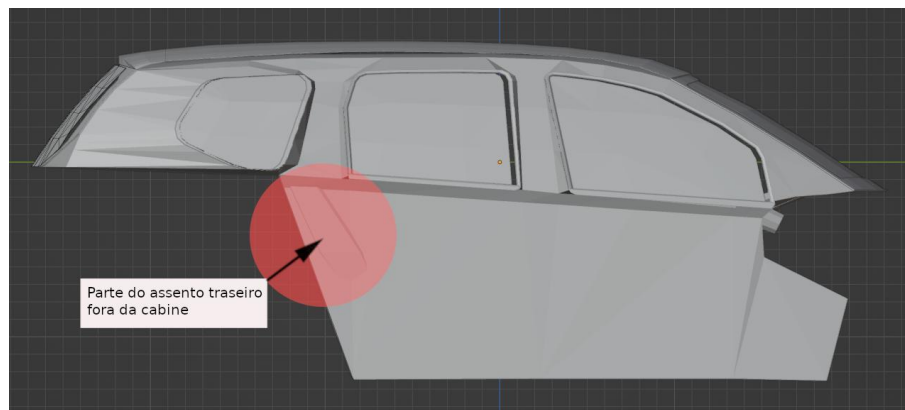


Fonte: Autor (2023).

Ao analisar a Figura 35, nota-se que há alguns furos na malha. Isso ocorreu, pois parte dos assentos modelados por GrabCAD (2020) ultrapassam a geometria da cabine (Figura 36). Uma vez que a malha foi gerada apenas no interior da cabine, o

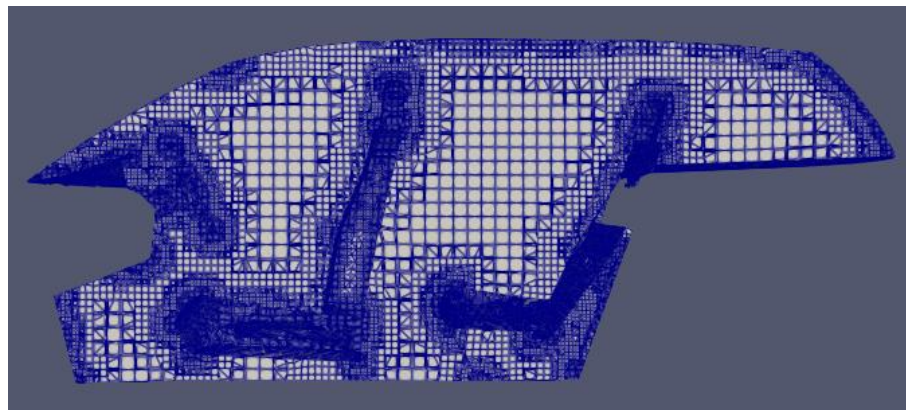
que restou após o processo de remoção de células do sHM foram apenas os volumes de controle correspondentes ao volume de ar no interior da cabine, resultando nos vazios. Porém, apesar disso, a região correspondente ao ar é uma região fechada. Caso contrário, a malha base não teria sido removida na geração de malha. A Figura 37 mostra a malha na seção entre os assentos do motorista e do passageiro traseiro, sendo possível de observar que, nas regiões mais próximas a superfícies, houve um maior refino.

Figura 36 – Parte da geometria do assento traseiro ultrapassa a geometria da cabine



Fonte: Autor (2023).

Figura 37 – Vista da malha da cabine seccionada



Fonte: Autor (2023).

A malha final escolhida e suas características serão discutidos posteriormente. A escolha da malha resultante será feita com base no procedimento GCI, abordado adiante na Seção 3.4, uma vez com a simulação feita.

3.2 ESQUEMAS NUMÉRICOS

Nesta seção, são abordados os principais parâmetros ligados à solução do sistema linear de equações (Equação 32). Pontos sobre o *solver* utilizado e os méto-

dos numéricos utilizados na discretização dos termos referentes às equações diferenciais são explorados.

3.2.1 Solver

Além de ter sido usada uma utilidade do OpenFOAM para a geração de malha, tal *software* também foi escolhido para realização da simulação numérica do escoamento. Em consonância com Greenshields (2023a), as ferramentas numéricas providas pelo OpenFOAM incluem aplicativos que são programas executáveis escritos em C++, sua linguagem base de programação. Uma das duas categorias de aplicativos presentes nesse programa de código aberto são os *solvers*, que efetivamente usam a técnica de volumes finitos para solucionar numericamente um sistema de equações diferenciais parciais, em especial aquelas da mecânica dos fluidos (GREENSHIELDS, 2023a).

Na versão OpenFOAM v10 lançado em 2022, o número de *solvers* existentes são de 48 (GREENSHIELDS, 2023b). Para escolher um, é necessário considerar o problema específico a ser modelado e resolvido. O OpenFOAM não possui um *solver* genérico que possa ser usado em todas as situações. Em vez disso, a partir da física presente e dos métodos numéricos de interesse, os usuários devem escolher um específico. Os *solvers* fornecidos na distribuição do *software* estão localizados no diretório \$FOAM_SOLVERS, o qual é subdividido em vários diretórios de acordo com a categoria de mecânica dos fluidos, tais como escoamento incompressível, transferência de calor, fluido com mudança de fase, lagrangiano entre outros. No caso deste estudo, foram consideradas as seguintes características físicas para a simulação CFD dentro da cabine:

- Regime permanente;
- Regime turbulento;
- Domínio isotérmico;
- Fluido incompressível e monofásico.

Um possível *solver* cujas capacidades atendam àqueles critérios é o simpleFoam. O solucionador utiliza o algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) para resolver a equação de continuidade (Equação 5) e as equações de momento (Equações 17, 18 e 19). Como visto anteriormente, é necessário ter o campo de velocidades U e o campo de pressão p para resolver tais equações. Segundo Patankar (1980), as equações de momento podem somente ser resolvidas quando o campo de pressão é dado ou estimado. A não ser que o correto campo de pressão seja aplicado, o campo de velocidade resultante não satisfaz a equação de continuidade (PATANKAR, 1980). Dessa forma, esses dois campos se encontram

acoplados e uma forma de trabalhar com essa característica é por meio do algoritmo SIMPLE.

SIMPLE é um método iterativo que começa com uma estimativa inicial do campo de velocidades e pressão fornecida pelo usuário. Definindo a correção p' como a discrepância entre o campo de pressão correto p e o campo de pressão estimado p^* de tal forma que (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007)

$$p = p^* + p' \quad (33)$$

De forma similar ao campo de velocidade, as correções de velocidade u' , v' e w' são definidas para relacionar as velocidades corretas u , v e w com as velocidades estimadas u^* , v^* e w^* (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007):

$$\begin{aligned} u &= u^* + u' \\ v &= v^* + v' \\ w &= w^* + w' \end{aligned} \quad (34)$$

No entanto, segundo Patankar (1980), a equação de correção de pressão também é propensa à divergência, a menos que seja aplicada alguma técnica de sub-relaxação. Patankar (1980) introduz a fator de relaxação α na Equação 33:

$$p^{novo} = p^* + \alpha_p p' \quad (35)$$

Em que, para uma condição de sub-relaxamento, o fator α está no intervalo entre 0 e 1 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Da mesma forma, as velocidades também são sub-relaxadas, e as componentes de velocidade iterativamente aprimoradas u^{novo} , v^{novo} e w^{novo} são obtidas a partir de (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007):

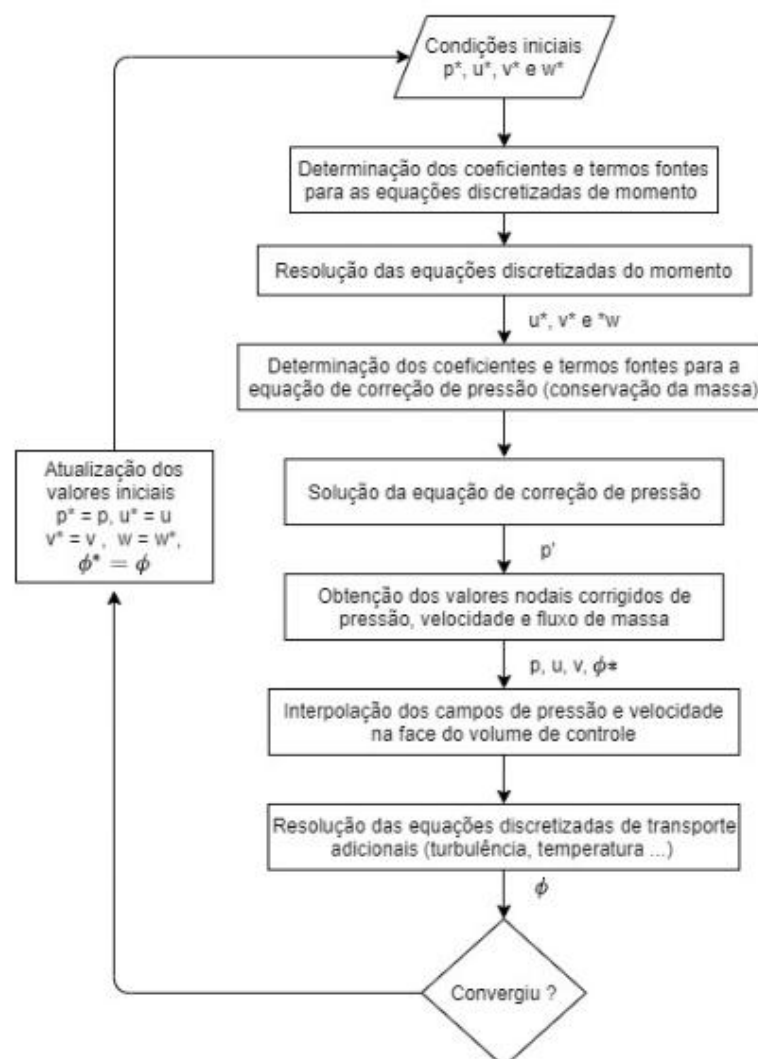
$$\begin{aligned} u^{novo} &= \alpha_u u + (1 - \alpha_u) u^{n-1} \\ v^{novo} &= \alpha_v v + (1 - \alpha_v) v^{n-1} \\ w^{novo} &= \alpha_w w + (1 - \alpha_w) w^{n-1} \end{aligned} \quad (36)$$

Em que os termos das componentes de velocidade com super-índice a $(n - 1)$ correspondem aos valores da iteração anterior, com n representando o número da iteração atual. É essencial fazer uma escolha adequada dos fatores de sub-relaxação α para obter simulações computacionalmente econômicas. Valores muito altos de α podem resultar em soluções iterativas oscilatórias ou até mesmo divergentes, enquanto

valores muito baixos causarão uma convergência extremamente lenta (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Os valores ótimos dos fatores de sub-relaxação dependem das características do escoamento e devem ser determinados individualmente para cada caso (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

O diagrama na Figura 38 ilustra a seqüência de operações em um procedimento de CFD que faz uso do algoritmo SIMPLE. A simulação numérica atinge a convergência quando a soma dos resíduos fica abaixo de um limite predefinido pelo usuário. Essa tolerância deve levar em consideração a precisão desejada dos resultados.

Figura 38 – Algoritmo SIMPLE



Fonte: (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007 apud FARAH, 2021).

3.2.2 Esquemas de discretização das equações diferenciais

Como abordado na Seção 2.2.4, uma das principais características do método dos volumes finitos é a discretização das equações governantes de escoamento de

fluidos, representadas de maneira genérica pela Equação 32. Para resolver essa integral de forma numérica, esquemas de discretização devem ser usados para obter uma solução numérica aproximada. Dentro do ambiente do OpenFOAM, os esquemas utilizados podem ser escolhidos no dicionário *fvSchemes* localizado no diretório *system*. Os métodos de discretização escolhidos foram baseados nas leituras de Arpino et al. (2021) e Farah (2021).

A Tabela 3 mostra os modos de discretização usados dentro do *software* para discretizar os termos das equações de continuidade, de momento e de aquelas associadas à turbulência.

Quadro 3 – Esquemas de discretização utilizados

Termo - OpenFOAM	Declaração do esquema
ddtSchemes	steadyState
grad(U)	cellLimited Gauss linear 1
div(phi,U)	bounded Gauss linearUpwindV grad(U)
div(phi,k)	bounded Gauss upwind
div(phi,omega)	bounded Gauss upwind
div((nuEff*dev2(T(grad(U)))))	Gauss linear limited 0.5

Fonte: Autor (2023).

Visto que o escoamento de ar considerado neste trabalho está em regime permanente, não há especificação do termo transiente $\frac{\partial}{\partial t}$, pois é nulo ao longos dos cálculos.

Na discretização do gradiente (∇), foi utilizado o esquema de discretização Gauss linear. A opção Gauss especifica a discretização padrão de volume finito com integração gaussiana, e a opção linear, que envolve a interpolação de valores dos centros das células para os centros das faces (GUERRERO, 2020). Além dessa segunda opção na declaração da discretização desse esquema, há também possibilidade de adicionar um esquemas de limitação de gradiente. Segundo Guerrero (2020), limitadores de gradiente evitam superdimensionamentos e subdimensionamentos nos cálculos de gradientes, o que aumenta a estabilidade do método, mas também adiciona difusão numérica. O esquema cellLimited restringe o gradiente de modo que, ao extrapolar os valores das células para as faces usando o gradiente calculado, os valores das faces permaneçam dentro dos limites dos valores nas células adjacentes (GREENSHIELDS, 2023a). Um coeficiente de limitação é especificado após o esquema subjacente, em que o valor 1 garante a limitação, enquanto o valor 0 não aplica nenhuma restrição.

Para a discretização do termo divergente ($\nabla \cdot$), foi usado o esquema bounded

`GaussLinearUpwindVgrad(U)`. Como para o termo gradiente, os esquemas de discretização para o termo divergente são todos também baseados na integração Gauss, usando o fluxo ϕ , uma propriedade genérica do escoamento, e o campo advectivo sendo interpolado para as faces das células por meio de uma seleção de esquemas, o que inclui o `linearUpwind` (GREENSHIELDS, 2023a). A necessidade da especificação do gradiente de velocidade $\text{grad}(U)$ é devido ao próprio uso desse esquema. A opção `v` especifica um esquema projetado para campos vetoriais. Ele difere dos esquemas convencionais ao calcular um único limitador que é aplicado a todas as componentes dos vetores, em vez de calcular limitadores separados para cada componente do vetor (GREENSHIELDS, 2023a). Por fim, a opção `bounded` está relacionada ao tratamento da derivada material temporal, que pode ser expressa em termos de uma derivada temporal espacial e um termo de convecção, como também visto na Equação 10 (GREENSHIELDS, 2023a).

Em relação à turbulência, foi escolhido o modelo $SST\ k - \omega$ para os cálculos do escoamento médio. A escolha foi feita com base no trabalho feito por Arpino et al. (2021), no qual o modelo $SST\ k - \omega$ mostrou-se o mais adequado para prever os padrões de escoamento de ar dentro da cabine do carro abordado pelos autores. Na discretização dos termos divergentes associados às equações de turbulência do modelo $SST\ k - \omega$, foi utilizado o esquema `bounded Gauss upwind`. Esse esquema é baseado na integração gaussiana, especificado pelo termo `Gauss`, e realiza uma interpolação *upwind* na difusividade, indicado pela opção `upwind`.

Na discretização do termo laplaciano ($\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)$), foi utilizado o esquema de discretização `bounded Gauss linear limited 0.5`. Esse esquema é baseado na integração gaussiana, especificado pelo termo `Gauss`, e realiza uma interpolação linear na difusividade, indicado pela opção `linear`. A opção `limited` é utilizado para malhas com variação e não ortogonalidade, o que geralmente ocorre em geometrias de engenharia do mundo real (GUERRERO, 2020). Esse esquema possui uma segunda ordem de precisão, restrito à qualidade da malha e com correções não ortogonais (GUERRERO, 2020). O valor `0.5` corresponde ao *blending factor* ψ (fator de mistura, em uma tradução literal). Para uma análise mais detalhada sobre os valores de ψ , recomenda-se a leitura de Greenshields (2023a).

Para obter uma compreensão mais aprofundada sobre as características intrínsecas relacionadas aos métodos numéricos de discretização, sugere-se a consulta dos trabalhos de Jasak (1996) e Ferziger e Perić (2002).

3.2.3 Condições de contorno

Como mostrado na Seção 2.2.4, cada volume de controle ($\forall C$) fornece uma única equação algébrica. A integração de volumes é calculada da mesma maneira para todos os elementos, mas os fluxos através das faces do $\forall C$ que se encontram

na fronteira do domínio computacional exigem um tratamento especial (FERZIGER; PERIĆ, 2002). Segundo Ferziger e Perić (2002), esses escoamentos de fronteira devem ser conhecidos ou expressos como uma combinação de valores internos e dados de fronteira, dando origem às condições de contorno. De forma geral, a geometria da cabine possui apenas três grupos de faces (*patches*): *inlet*, que corresponde aos quatro bocais de ventilação de ar vistos na Figura 31, *outlet*, que corresponde à saída de ar vista na Figura 32, e *body*, que corresponde ao restante da cabine. As variáveis de interesse da simulação CFD do escoamento presente neste estudo são mostradas no Quadro 4.

Quadro 4 – Variáveis de interesse do escoamento

Variável	Símbolo	Tipo
Velocidade (x,y,z)	$\mathbf{U} = (U_x, U_y, U_z)$	Vetorial
Pressão	p	Escalar
Energia cinética turbulenta específica	k	Escalar
Taxa de dissipação turbulenta	ω	Escalar
Viscosidade cinemática turbulenta	ν_t	Escalar

Fonte: Autor (2023).

No OpenFOAM, uma ampla variedade de condições de contorno está disponível, cada uma atendendo a propósitos específicos na definição do comportamento do escoamento nas fronteiras do domínio computacional. A escolha da condição de contorno depende do comportamento físico que precisa ser representado na fronteira, como a especificação de um valor fixo para uma propriedade, a definição de um gradiente zero ou a imposição de uma condição de escoamento livre.

De forma resumida, tendo como uma referência de escolha com base no trabalho de Arpino et al. (2021), as condições de contorno utilizadas nas simulações deste trabalho são apresentadas no Quadro 5. Como condição inicial para o algoritmo SIMPLE, foram estipulados campos de velocidade e de pressão nulos.

3.2.3.1 *inlet*

Para esse *patch* correspondente às entradas de ar do sistema de condicionamento de ar para o habitáculo do veículo, foi especificado um valor fixo de $0,6 \text{ m/s}$ para a magnitude da velocidade do ar dos bocais. É considerado que os bocais são posicionados de tal forma que o vetor velocidade \mathbf{U} tenha uma inclinação de 45° em

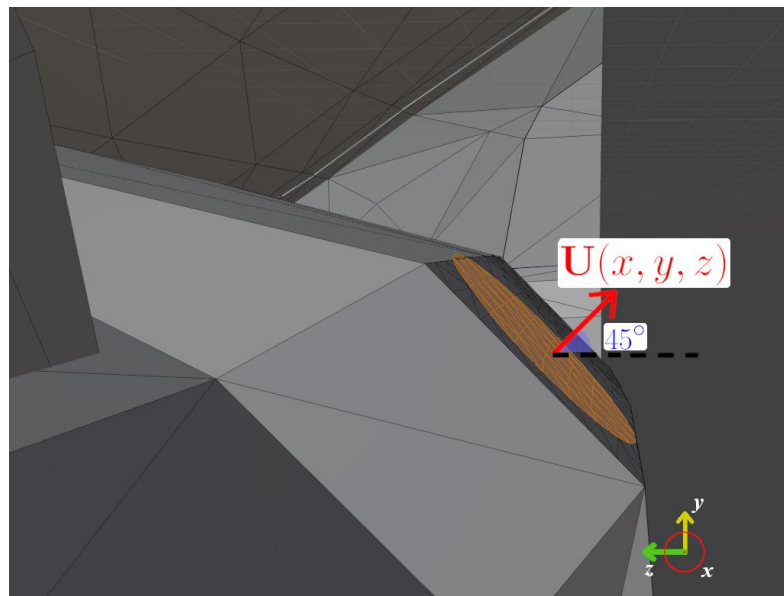
Quadro 5 – Condições de contorno utilizadas no OpenFOAM

	U [m/s]	p [Pa]	k [m ² /s ²]	ω [s ⁻¹]	ν_t [m ² /s]
<i>inlet</i>	fixedValue (0; 0,38; -0,34)	zeroGradient	fixedValue 0,00135	fixedValue 10,743	calculated
<i>outlet</i>	zeroGradient	fixedValue(0)	inletOutlet	inletOutlet	calculated
<i>body</i>	noSlip	zeroGradient	kqRWF	omegaWF	nutKWF

Fonte: Autor (2023).

relação aos eixos y e z e uma inclinação de 90° em relação ao eixo x , conforme mostra a Figura 39.

Figura 39 – Inclinação do vetor velocidade nos locais de entrada do ar na cabine



Fonte: Autor (2023).

Nos bocais, ainda, foi definida uma condição de gradiente zero (`zeroGradient`) para a pressão. Isso implica que a derivada normal do campo de pressão, nesse caso, em relação à direção da fronteira é zero. Em termos práticos, isso significa que a variação da pressão é nula na direção normal à fronteira, não havendo transferência de propriedades através da fronteira.

Com relação à turbulência, as propriedades k e ω podem ser obtidas a partir do campo de velocidade e da intensidade turbulenta I . Segundo CFD Online (2023a), ao definir condições de contorno para uma simulação CFD, muitas vezes é necessário estimar a intensidade da turbulência nas entradas. Isso é feito a partir do cálculo do número de Reynolds do escoamento na entrada. Considerando que o escoamento nas entradas possui uma magnitude de $0,6\text{ m/s}$, que os bocais de refrigeração possuam um diâmetro de 90 mm e que a viscosidade cinemática do ar é de $1,5 \cdot 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$, tal

número adimensional é obtido a partir da Equação 37.

$$Re = \frac{D|U|}{\nu} \quad (37)$$

Em que D é um comprimento característico (diâmetro do bocal, no caso), U é a magnitude da velocidade do escoamento e ν é a viscosidade cinemática do ar. Ao fazer esse cálculo, obtém-se um valor de Reynolds de, aproximadamente, 4555,56. Esse valor sugere que o escoamento pode estar na transição entre o regime laminar e turbulento. Dessa forma, com base em CFD Online (2023a), a intensidade turbulenta pode ser estimada com um valor de 5%.

Com I estimado e U definido, as propriedades k e ω podem ser calculadas. Para tanto, a plataforma CFD Online (2023b) oferece uma ferramenta de cálculo de propriedades turbulentas, a partir da implementação numéricas de suas equações e aproximações (Figura 40).

Figura 40 – Interface da ferramenta de cálculo de propriedades turbulentas desenvolvida por CFD Online (2023b)

Fonte: Autor (2023).

A condição de contorno do OpenFOAM utilizada nessas duas propriedades é o `fixedValue`.

Com k e ω definidos, é possível se obter a viscosidade cinemática turbulenta (ν_t) a partir da Equação 38:

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \quad (38)$$

No OpenFOAM, a condição correspondente ao cálculo de ν_t é através da condição de contorno `calculated`.

3.2.3.2 *outlet*

A zona de saída no domínio computacional é caracterizada pela exaustão do escoamento e, conseqüentemente, é necessário definir uma pressão equivalente a $0 Pa$.

Para a velocidade, energia cinética turbulenta específica e sua taxa de dissipação, a condição de contorno `inletOutlet` é aplicada. Essa condição no OpenFOAM é usada para representar uma abertura bidirecional em que o fluido pode entrar ou sair do domínio de simulação, dependendo das condições de pressão, permite que o fluido entre quando a pressão externa é maior que a pressão interna e que o fluido saia quando a pressão interna é maior que a pressão externa, que é o que ocorre ao se aplicar $0 Pa$ na saída.

Como na entrada, a viscosidade turbulenta também é do tipo `calculated` na saída.

3.2.3.3 *body*

O conjunto `body` é caracterizado como parede, isto é, uma superfície sólida que interage com um fluido em movimento. Por isso, em relação à velocidade, é aplicada a condição de contorno `noSlip`, isto é, condição de não deslizamento, a qual assume que a velocidade do fluido na parede é zero, significando que o fluido se adere à parede e não desliza sobre ela. Com relação à pressão, é aplicada a condição `zeroGradient`.

Em respeito às propriedades turbulentas k , ω e ν_t , as condições `kqRWallFunction`, `omegaWallFunction` e `nutKWallFunction` foram usadas, respectivamente. Para maiores detalhes sobre cada uma, recomenda-se a leitura de Liu et al. (2017).

3.3 CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA UTILIZADA

A máquina utilizada neste trabalho para o processamento das simulações é um computador de mesa Acer VX5-591G-54PG, cujas especificações são as seguintes:

- **Processador:** Intel Core i7-7700HQ CPU 2,80 GHz;
- **Memória RAM:** 16 GB;
- **Armazenamento:** SSD SATA KINGSTON 960GB;
- **Placa de Vídeo:** GeForce GTX 1050 Ti.

3.4 ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA - PROCEDIMENTO GCI

Com base na relevância da geração da malha computacional, Versteeg e Malalasekera (2007) apontam que mais da metade do tempo gasto em projetos de CFD

na indústria é alocado para a definição da geometria do domínio e a criação da malha. Uma malha que é refinada em excesso, com células muito pequenas, pode aumentar a precisão dos resultados, porém, isso ocorre à custa de um tempo de processamento consideravelmente longo. Da mesma forma, uma malha que é excessivamente grosseira pode resultar em divergências na simulação ou em resultados significativamente afastados da realidade. Sendo assim, é de suma importância encontrar um nível de refinamento de malha que harmonize eficazmente a representação precisa dos fenômenos físicos na malha computacional com um custo computacional razoável. É nesse contexto que atua o Teste de Convergência de Malha (*Grid Convergence Index*, ou GCI) proposto por Roache (1994).

O GCI se baseia na teoria de extrapolação de Richardson (1910) para calcular a ordem de convergência e avaliar a proximidade da solução obtida através de uma malha específica em comparação com a solução teórica assintótica, isto é, estima o quão próxima a solução obtida está da solução teórica extrapolada para um cenário em que o número de células da malha se aproxima do infinito. É possível determinar o GCI ao comparar três malhas com níveis crescentes de refinamento, com o objetivo de obter uma estimativa mais precisa da ordem de convergência (SLATER, 2021).

Considerando que N_1 , N_2 e N_3 são o número de elementos de uma malha tridimensional refinada, intermediária e grosseira, respectivamente, as razões de refinamento r_{12} e r_{23} entre as malhas são definidas como

$$r_{12} \equiv \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (39)$$

$$r_{23} \equiv \left(\frac{N_2}{N_3} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (40)$$

Sendo f_1 , f_2 e f_3 valores de uma variável de referência para a análise do método das malhas refinada, intermediária e grosseira, respectivamente, é possível definir as diferenças de resposta de cada malha à variável de interesse ϵ_{12} e ϵ_{23} :

$$\epsilon_{12} \equiv f_2 - f_1 \quad (41)$$

$$\epsilon_{23} \equiv f_3 - f_2 \quad (42)$$

Considerando que haja uma mesma proporção de refino da malha grosseira para a intermediária e da malha intermediária para a grosseira (*i.e.*, $r_{23} = r_{12} = r$), a ordem aparente p do método pode ser definido como (ELSAIED; LACOR, 2011):

$$p = \frac{\ln \left(\frac{\epsilon_{23}}{\epsilon_{12}} \right)}{\ln r} \quad (43)$$

Sobre isso, Roache (1994) comenta que, se o refino de malha é executado com uma taxa de refino constante, p pode ser calculado de forma direta a partir de três níveis de malha, conforme mostra a Equação 43.

Posteriormente, valores extrapolados (no limite assintótico) da variável de interesse devem ser calculados por meio das Equações 44 e 45 (CELIK et al., 2008).

$$f_{12}^{ext} = \frac{r^p f_1 - f_2}{r^p - 1} \quad (44)$$

$$f_{23}^{ext} = \frac{r^p f_2 - f_3}{r^p - 1} \quad (45)$$

De acordo com Richardson (1910), o próximo passo consiste no cálculo da estimativas do erro relativo aproximado (Equações 46) e do erro extrapolado aproximado (Equações 47).

$$e_a^{12} = \left| \frac{f_1 - f_2}{f_1} \right| \quad (46)$$

$$e_a^{23} = \left| \frac{f_2 - f_3}{f_2} \right|$$

$$e_{ext}^{12} = \left| \frac{f_{21}^{ext} - f_1}{f_{21}^{ext}} \right| \quad (47)$$

$$e_{ext}^{23} = \left| \frac{f_{32}^{ext} - f_2}{f_{32}^{ext}} \right|$$

Por fim, o índice de convergência da malha fina pode ser obtido (CELIK et al., 2008):

$$GCI_{fina}^{12} = \frac{1,25e_a^{12}}{r^p - 1} \quad (48)$$

Conforme explicam Elsayed e Lacor (2011), há uma redução no valor GCI quando GCI_{fina}^{12} for menor que GCI_{fina}^{23} , indicando que a dependência dos resultados numéricos em relação ao tamanho das células foi reduzida. Além disso, uma solução independente da malha foi alcançada e um refinamento adicional da malha não resultará em grandes alterações nos resultados da simulação (ELSAYED; LACOR, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DE MALHA

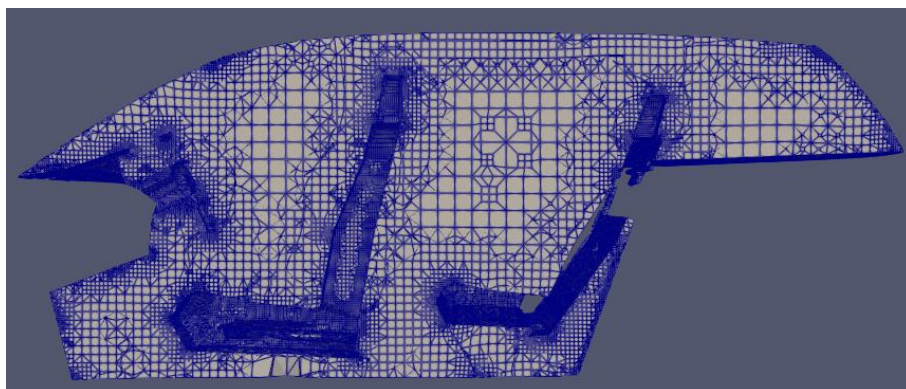
A análise de independência de malha deste trabalho é conduzida com base no método GCI, mostrado anteriormente na Seção 3.4. Para tanto, propondo níveis diferentes de refino, três malhas são geradas: uma malha grosseira, uma malha intermediária e uma malha fina. Apesar de serem não estruturadas devido à complexidade da geometria, as malhas passam por um refinamento uniforme, de forma a diminuir igualmente o tamanho das células em toda a extensão do domínio a uma taxa de refino r de 1,37, aproximadamente. Esse valor r é superior ao de 1,3, como proposto por Celik et al. (2008). A Tabela 1 mostra alguns detalhes das malhas computacionais desenvolvidas. As Figuras 41, 42 e 43 mostram as três malhas geradas seccionadas pela utilidade *Clip* do ParaView na mesma seção de origem (0, 5; 0, 25; 0, 3).

Tabela 1 – Detalhes das malhas computacionais geradas

Malha #	Número de ΨC	Máxima não-ortogonalidade	Skewness máximo
1	3 645 496	65	5,22
2	2 693 695	65	4,56
3	1 940 904	65	11,47

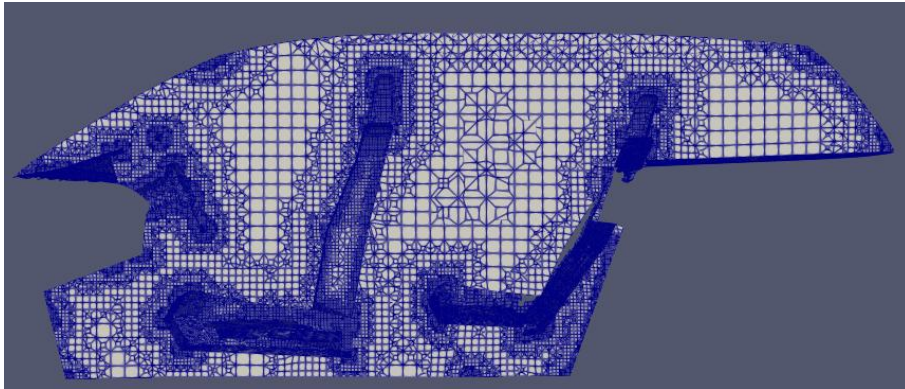
Fonte: Autor (2023).

Figura 41 – Vista de seção da malha #3 (grosseira)



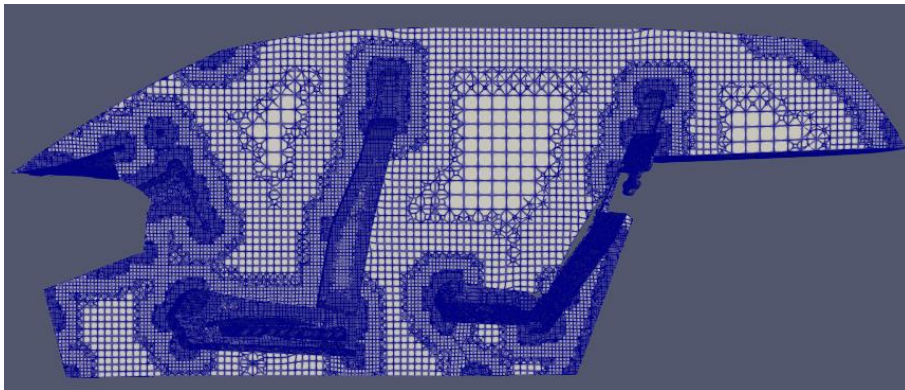
Fonte: Autor (2023).

Figura 42 – Vista de seção da malha #2 (intermediária)



Fonte: Autor (2023).

Figura 43 – Vista de seção da malha #1 (fina)



Fonte: Autor (2023).

Ao analisar as Figuras 41, 42 e 43, é possível perceber na região correspondente ao banco traseiro o furo gerado pelo processo de geração de malha. Conforme mencionado anteriormente na Seção 3.1.1, houve partes da geometria dos assentos que ultrapassaram a fronteira da cabine. Uma vez que o ponto material foi localizado em um ponto flutuante no interior da cabine, as fronteiras dos assentos são removidas, o que resulta na presença dessa característica.

Como citado anteriormente, a utilidade *snappyHexMesh* foi utilizada para o processo de geração de malha. Devido à complexidade da geometria, a etapa de *addLayers* foi desativada, não sendo geradas camadas prismáticas. Apesar disso, em uma alternativa para se ter uma malha mais refinada nas superfícies da cabine por conta dos efeitos de parede, as faces pertencentes ao *patch* *body* foram declaradas no sub-dicionário *refinementSurfaces*. A diferença de refino de cada uma das três malhas se encontra nesse ponto. A malha grosseira possui um nível 0 de refino de superfícies, enquanto a intermediária possui 1 e a fina, 3.

Para o método GCI, é necessário selecionar uma variável de referência para a análise. Comparações foram feitas em termos da magnitude do campo de velocidade

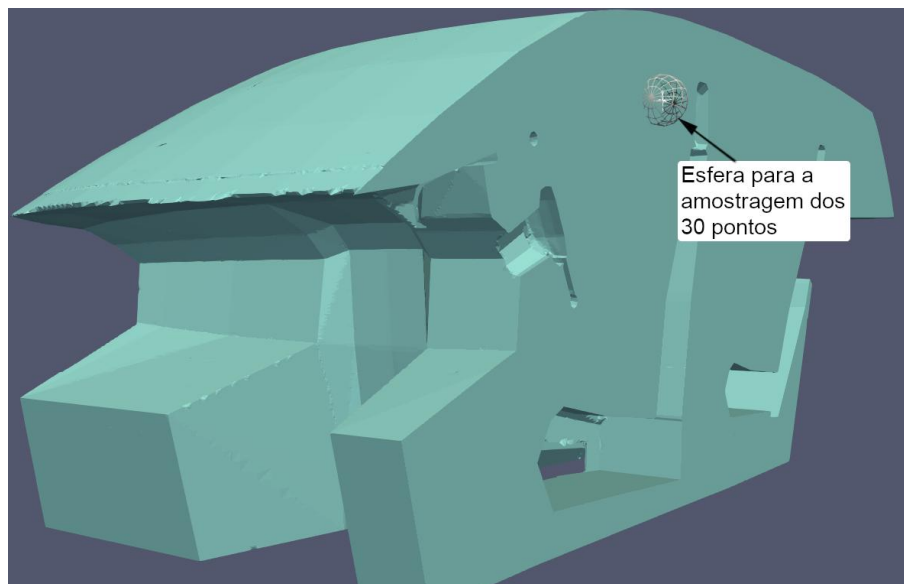
($|U|$). Para as três malhas, foi definida uma mesma região de amostragem a qual corresponde a uma esfera virtual que engloba 30 pontos (nós). Tal geometria possui uma circunferência de, aproximadamente, 57 cm, correspondendo ao valor proposto por Alves (2012) de uma circunferência da cabeça de uma pessoa adulta do sexo masculino. O posicionamento dessa geometria de amostragem foi feita de tal modo que fosse posicionada próximo ao encosto de cabeça do banco do motorista, como mostra a Figura 44. Essa esfera foi feita a partir da utilidade *Probe Location* do ParaView. A Tabela 2 mostra o valor da média aritmética da magnitude da velocidade entre os 30 pontos de cada malha.

Tabela 2 – Valores da média da magnitude do campo de velocidade para cada malha

Malha #	Média da magnitude da velocidade [m/s]
f_1	0,079
f_2	0,066
f_3	0,015

Fonte: Autor (2023).

Figura 44 – Esfera de amostragem dos pontos cujas propriedades são comparadas



Fonte: Autor (2023).

Com a razão de refino r e as variáveis f_1 , f_2 e f_3 obtidas, é possível obter os parâmetros relativos ao método GCI descritos pelas Equações 43 a 48 cujos valores estão sintetizados na Tabela 3.

Como GCI_{fina}^{12} é menor que $GCI_{inter.}^{23}$, como mostra a Tabela 3, de acordo com Elsayed e Lacor (2011), a dependência da malha dos valores das propriedades cal-

Tabela 3 – Valores dos parâmetros atrelados ao método GCI

Parâmetro	Valor [unidade]
r	1,37 [–]
ϵ_{12}	–0,013 m/s
ϵ_{23}	–0,051 m/s
p	4,336 [–]
f_{12}^{ext}	0,083 m/s
f_{23}^{ext}	0,105 m/s
e_a^{12}	0,757 [–]
e_a^{23}	0,768 [–]
GCI_{fina}^{12}	0,324 [–]
$GCI_{inter.}^{23}$	0,329 [–]
$\frac{GCI_{fina}^{12}}{GCI_{inter.}^{23}}$	0,986 [–]

Fonte: Autor (2023).

culadas na simulação é diminuída. O valor f_{12}^{ext} representa uma estimativa do valor da variável em um valor contínuo, considerando o referencial da malha fina, no caso. Pela Figura 4, nota-se que, ao aumentar o número de células da malha, isto é, deixando-a mais refinada, o valor da propriedade tende ao valor extrapolado no infinito. Em outras palavras, o domínio discreto computacional tenderia a ser um domínio contínuo quando o número de elemento da malha tendesse ao infinito.

Tabela 4 – Valores dos parâmetros atrelados ao método GCI

Malha #	Valor variável de referência [m/s]	Erro relativo em relação a f_{12}^{ext}
1	0,079	4,82%
2	0,066	20,41%
3	0,015	81,93%

Fonte: Autor (2023).

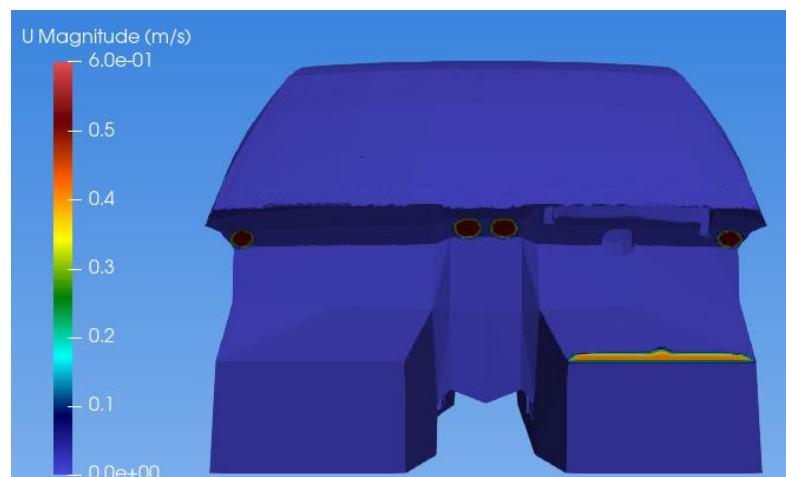
Ademais, analisando ainda a Tabela 4, nota-se que o erro relativo entre o valor da variável de referência da malha fina em relação ao valor assintótico é de, aproximadamente, 4,81%. Dessa forma, ao considerar que tal erro é aceitável, a malha fina (Figura 43) é a malha escolhida para o processamento da simulação.

4.2 CAMPOS DE PROPRIEDADES

4.2.1 Campo de velocidade

Uma boa prática para averiguar a qualidade dos resultados gerados pela simulação inclui a verificação efetiva do cumprimento das condições de contorno impostas. Para alcançar isso, é necessário realizar diversas representações gráficas do escoamento, a fim de observar o desempenho de cada variável de interesse. No caso da velocidade, pode-se perceber pela Figura 45 que o escoamento que sai dos bocais de refrigeração e incide na cabine está com uma magnitude de velocidade de $0,6 \text{ m/s}$, o que está de acordo com o imposto como condição de contorno. Também, nota-se que há um escoamento cuja magnitude da velocidade é alta na região de exaustão do ar da cabine, indicando que a condição de contorno desse *patch* foi respeitado, visto que, devido ao gradiente de pressão gerado pela presença de pressão nula, o escoamento é acelerado para fora do habitáculo. Além disso, observa-se que, nas regiões de parede, o escoamento possui velocidade nula, evidenciando a condição de não deslizamento.

Figura 45 – Distribuição da magnitude do campo de velocidade do escoamento de ar nas regiões de condições de contorno

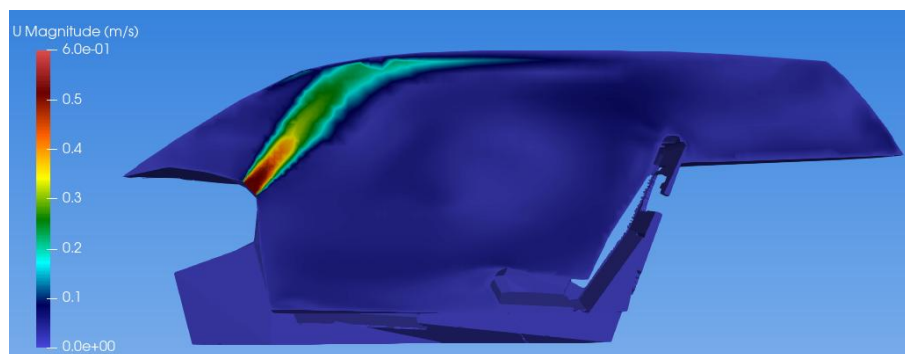


Fonte: Autor (2023).

A Figura 46 mostra a distribuição de velocidades na região de uma das saídas de ar da parte central. Ao analisá-la, é evidenciado que o desenvolvimento do escoamento à medida que incide na cabine condiz com a realidade física do problema, apontando também o efeito do modelo de turbulência utilizado. Nas Figuras 47 e 48,

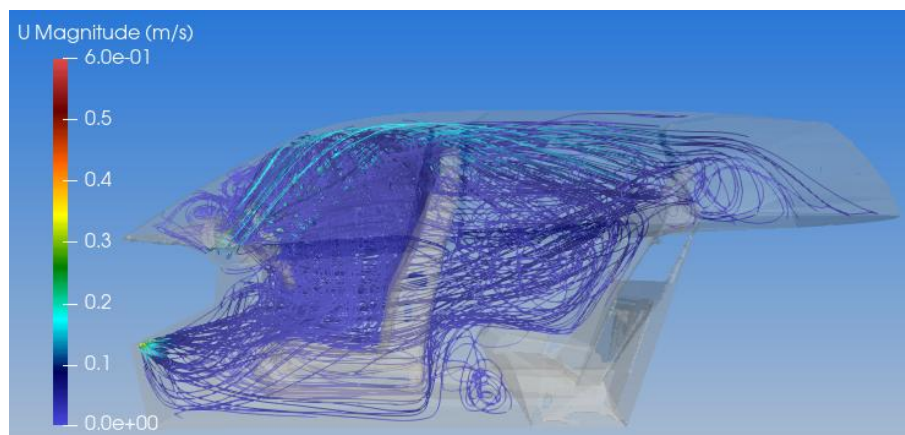
é mostrada a distribuição de linhas de corrente do escoamento ao longo da cabine. A partir de suas análises, pode-se apontar que há uma irregularidade na distribuição do ar refrigerado entre as regiões frontal e traseira do habitáculo, visto que há uma maior concentração de linhas de corrente na região onde se localiza o motorista. Caso fosse considerada uma abordagem térmica, notar-se-ia uma distribuição heterogênea na cabine também, o que, entre outros fatores, pode gerar desconforto térmico entre os passageiros dos assentos de trás.

Figura 46 – Distribuição da magnitude do campo de velocidade do escoamento de ar ao longo da saída de um bocal de refrigeração



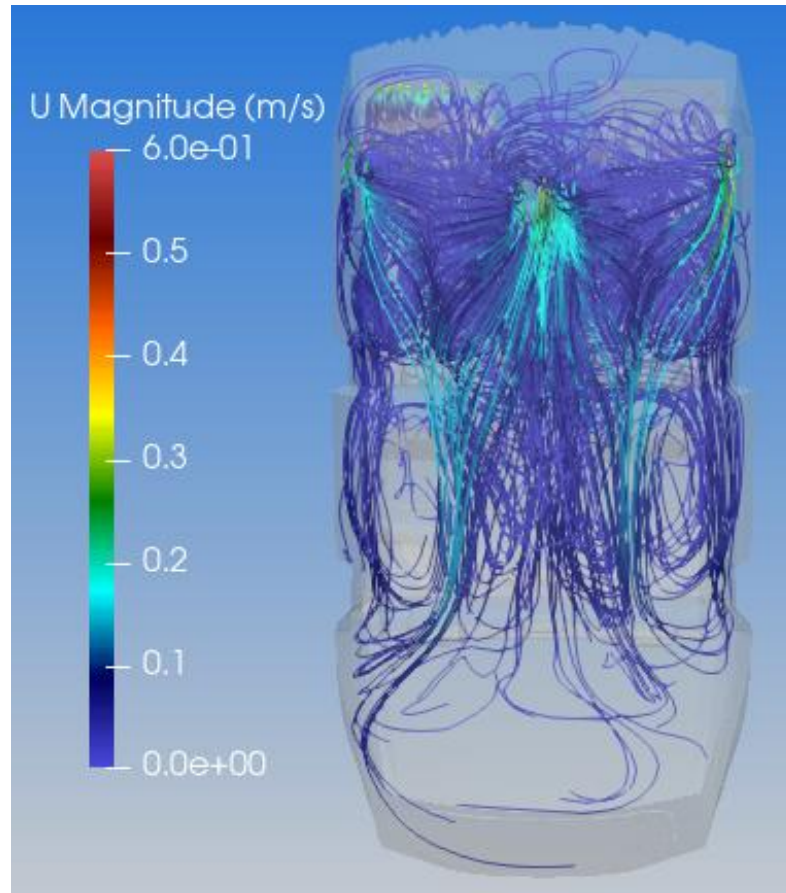
Fonte: Autor (2023).

Figura 47 – Distribuição de linhas de corrente do escoamento de ar ao longo da cabine (vista lateral)



Fonte: Autor (2023).

Figura 48 – Distribuição de linhas de corrente do escoamento de ar ao longo da cabine (vista superior)



Fonte: Autor (2023).

4.2.2 Campo de pressão

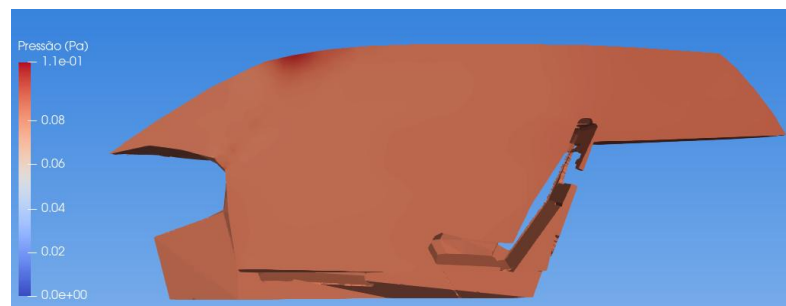
As Figuras 49 e 50 mostram a distribuição de pressão ao longo da cabine. Pela Figura 49, é possível ver a condição de contorno de pressão nula na região `outlet`. Além disso, por conta do posicionamento dos bocais centrais em um ângulo de 45° (Figura 39), o parte do escoamento colide com uma parte do teto da cabine, o que resulta uma estagnação de parte do escoamento, resultando em um aumento da pressão absoluta. Esse feito também pode ser visto na Figura 50. Isso também ocorre com os bocais das laterais, os quais se encontram próximos às janelas das portas da frente. Devido à inclinação da parte frontal da cabine, o escoamento atinge parte da região do vidro da porta, causando um aumento de pressão também, conforme mostra a Figura 51.

Figura 49 – Distribuição de pressão ao longo da cabine (vista superior)



Fonte: Autor (2023).

Figura 50 – Distribuição de pressão ao longo da cabine (vista lateral)



Fonte: Autor (2023).

Figura 51 – Aumento de pressão em parte do vidro da porta dianteira

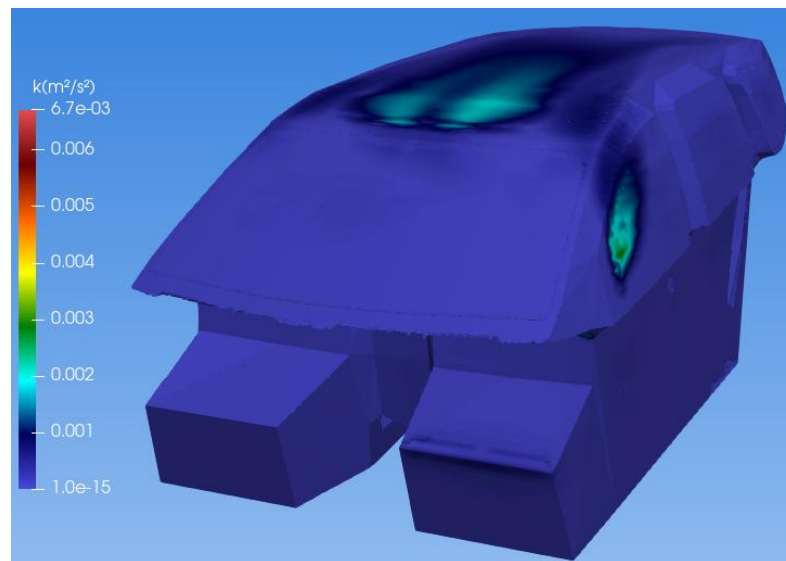


Fonte: Autor (2023).

4.2.3 Campo de energia cinética turbulenta específica

A Figura 52 mostra a distribuição da energia cinética turbulenta específica (k) na parte externa da cabine. É possível notar que, nas mesmas regiões onde as colisões do escoamento com a geometria da cabine, a energia turbulenta k é maior, o que faz sentido, uma vez que esses impactos causam mais perturbações ao escoamento, implicando no aumento da parcela flutuante do campo de velocidade.

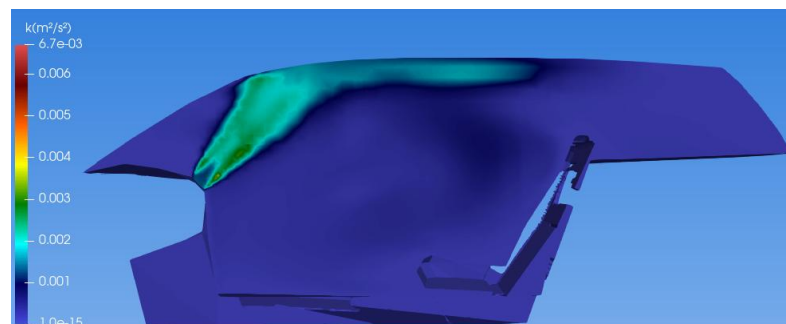
Figura 52 – Aumento de k em parte da cabine devido às colisões do escoamento com a geometria



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 53, é mostrado um valor elevado de da energia cinética turbulenta nas saídas do ar dos bocais, evidenciando o fenômeno da turbulência no escoamento. Como comentado na Seção 2.2.2, um dos efeitos da turbulência é a sua capacidade de mistura de propriedades. Caso fosse feita uma abordagem de transferência de calor no interior da cabine, as regiões onde há altos valores de k são regiões onde há uma maior de transferência de calor do habitáculo para o ar refrigerado.

Figura 53 – Distribuição de k no interior da cabine



Fonte: Autor (2023).

5 CONCLUSÃO

A tecnologia de condicionamento de ar automotivo, agora uma presença comum nos veículos contemporâneos, desempenha um papel crucial em garantir o conforto térmico dos ocupantes durante a condução. Considerando que os habitantes de áreas urbanas passam longos períodos de tempo dentro de veículos, a qualidade do conforto térmico diário para muitas pessoas está diretamente vinculada à eficácia dos sistemas de refrigeração e condicionamento de ar, incluindo carros. Nesse contexto, a pesquisa sobre o conforto térmico dos usuários de automóveis emerge como um tema de relevância global, atraindo a atenção de estudiosos em diversas partes do mundo. Com base nisso, o presente estudo realizou uma modelagem numérica de um escoamento de ar dentro da cabine de um veículo.

No que se refere aos procedimentos da análise, a elaboração inicial envolveu a utilização de um modelo CAD da cabine do veículo Renault-Dacia Duster 2011 como representação do domínio computacional para a simulação CFD. Modificações na geometria foram implementadas no Blender, para simplificar a geometria, removendo partes não relevantes à simulação e definindo regiões de aplicação de condições de contorno. Em seguida, a malha computacional da cabine foi gerada usando o gerador snappyHexMesh do *software* de fluidodinâmica computacional OpenFOAM. Subsequentemente, foram obtidos campos de velocidade e pressão no interior da cabine por meio de uma simulação isotérmica, em regime permanente e turbulenta, utilizando o *solver* simpleFoam deste programa de código aberto. Além disso, uma análise de independência de malha foi conduzida por meio do método GCI (Grid Convergence Index). Por fim, o pós-processamento da simulação foi realizado utilizando o ParaView, sendo possível apontar alguns pontos de análise em relação ao desenvolvimento da velocidade, pressão e turbulência do escoamento ao longo da cabine.

Em síntese, a decisão de empregar ferramentas de código aberto para a modelagem numérica do escoamento de ar na cabine demonstrou ser não apenas viável, mas também estrategicamente vantajosa. A flexibilidade e robustez dessas ferramentas possibilitaram uma representação eficiente do comportamento do ar dentro da cabine, atendendo aos requisitos específicos deste estudo. Apesar dos benefícios destacados anteriormente, é crucial reconhecer as dificuldades enfrentadas. A implementação de ferramentas de código aberto para a modelagem numérica do escoamento de ar na cabine não esteve isenta de desafios, os quais desempenharam um papel significativo no desenvolvimento e na conclusão deste trabalho.

Uma das principais dificuldades encontradas foi a curva de aprendizado associada à familiarização com as ferramentas específicas escolhidas. A complexidade de algumas dessas plataformas demandou tempo e esforço adicionais na compreensão

de suas funcionalidades e na aplicação correta dos métodos numéricos desejados. No entanto, é importante ressaltar que essa curva de aprendizado também proporcionou uma oportunidade valiosa de aprimorar as habilidades técnicas e de problematização, contribuindo para o enriquecimento da experiência acadêmica. Outro ponto a destacar é a dependência da comunidade de desenvolvedores e usuários dos *softwares*. Embora a comunidade de código aberto seja uma fonte valiosa de suporte, atualizações e correções, a disponibilidade de soluções para desafios específicos pode variar.

Essas dificuldades, embora representem desafios tangíveis, não diminuem a validade e a eficácia da abordagem de código aberto adotada neste estudo. Pelo contrário, forneceram *insights* valiosos sobre as nuances e complexidades inerentes ao uso dessas ferramentas, contribuindo para uma compreensão mais profunda de suas potencialidades e limitações.

Investigar a complexidade do condicionamento de ar automotivo e seu efeito no conforto térmico dos ocupantes abre um horizonte amplo e promissor para investigações posteriores. Como estudos futuros no que diz respeito à modelagem numérica do escoamento de ar no interior de uma cabine veicular, pode-se apontar

- Incluir cálculo de temperatura no interior da cabine;
- Diminuir números de não-ortogonalidade máxima e *skewness* da malha numérica da cabine;
- Adicionar camadas prismáticas nas superfícies da cabine.

REFERÊNCIAS

- ALVES, H. A. **ANÁLISE DOS PARÂMETROS ANTROPOMÉTRICOS NO PROJETO DE CAPACETES BALÍSTICOS**. 2012. Tese (Doutorado) — Programa de PósGraduação em Engenharia Biomédica da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2012.
- ARPINO, F.; CORTELLESA, G.; GROSSI, G.; NAGANO, H. Eulerian-lagrangian approach for the non-isothermal and transient cfd analysis of the aerosol airborne dispersion in a car cabin. **Building and Environment**, v. 209, p. 1–12, 2021.
- BARCIA, R. **Primera impresión: Renault Duster 1.6 16v Dynami-que 2WD**. 2011. Disponível em: <https://www.autoblog.com.uy/2011/10/primera-impresion-renault-duster-16-16v.html>.
- BATISTA, J. N. M. **Análise da fluidodinâmica e da transferência de calor em leito de jorro operando com sementes de sorgo utilizando CFD**. 2017. 153 p. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Química) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.
- BAUDEL, P. H. d. S. **Simulação CFD de um leito de jorro cônico utilizando OpenFOAM**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) — Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.
- BLAZEK, J. Chapter 7 - turbulence modelling. *In*: BLAZEK, J. (Ed.). **Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications (Second Edition)**. Second edition. Oxford: Elsevier Science, 2005. p. 227–270. ISBN 978-0-08-044506-9. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080445069500096>.
- BLENDER. **About - The Organization**. 2023a. Disponível em: <https://www.blender.org/about/>.
- BLENDER. **Blenders History**. 2023b. Disponível em: <https://www.blender.org/about/history/>.
- CELIK, C. K. et al. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, p. 1–15, 2008.
- ÇENGEL, Y.; CIMBALA, J. **Mecânica dos fluidos - 3.ed.** AMGH Editora, 2015. ISBN 9788580554915. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=aP3OBBgAAQBAJ>.
- CFD DIRECT LTD. **OpenFOAM v11 User Guide - 5.5 Mesh generation with the snappyHexMesh utility**. 2023. Disponível em: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v11/snappyhexmesh>.
- CFD Online. **Turbulence intensity**. 2023a. Disponível em: https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity.

CFD Online. **Turbulence Properties, Conversions & Boundary Estimations**. 2023b. Disponível em: <https://www.cfd-online.com/Tools/turbulence.php>.

CHEN, G. et al. OpenFOAM for computational fluid dynamics. **Notices of the American Mathematical Society**, v. 61, n. 4, p. 354–363, 2014. ISSN 0002-9920.

COSTA, K. **Brasileiro perde o equivalente a 21 dias no trânsito, diz pesquisa**. 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/geral/audio/2022-06/brasileiro-perde-o-equivalente-21-dias-no-transito-diz-pesquisa#:~:text=Moradores%20dos%20grandes%20centros%20no,em%20parceria.>

DALY, S. **Automotive Air Conditioning and Climate Control Systems**. Elsevier Science, 2006. ISBN 9780750669559. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=rJC1xQEACAAJ>.

ELDEGWY, A.; KHALIL, E. E. Passengers thermal comfort in private car cabin in hot climate. *In: Proceedings of the 2018 JOINT PROPULSION CONFERENCE*, jul. 2018, Cincinnati, USA. [S.l.], 2018. p. 1–11.

ELSAYED, K.; LACOR, C. Numerical modeling of the flow field and performance in cyclones of different cone-tip diameters. **Computers & Fluids**, v. 51, p. 48–59, 2011.

FARAH, M. A. **Metodologia para obtenção da resistência ao avanço viscosa de uma embarcação da série 60 utilizando CFD (OpenFOAM)**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

FENG, C.; MA, F.; RUI WANG, R.; LI, W.; GAO, J. A thermal comfort evaluation on vehicular environments based on local human body thermal sensations. **Results in Engineering**, v. 17, p. 109–119, 2023.

FERZIGER, J.; PERIĆ, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. [S.l.]: Springer-Verlag, 2002. ISBN 3540420746.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 2014. ISBN 9788521623021.

GRABCAD. **Dacia Duster 2011**. 2020. Disponível em: <https://grabcad.com/library/dacia-duster-2011-1>.

GREENSHIELDS, C. **OpenFOAM v11 User Guide**. London, UK: The OpenFOAM Foundation, 2023a. Disponível em: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v11>.

GREENSHIELDS, C. **Modular Solvers in OpenFOAM**. 2023b. Disponível em: <https://cfd.direct/openfoam/free-software/modular-solvers/>.

GREENSHIELDS, C.; WELLER, H. **Notes on Computational Fluid Dynamics: General Principles**. CFD Direct Limited, 2022. ISBN 9781399920780. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=Ox0uzwEACAAJ>.

GUERRERO, J. **A Crash Introduction to the Finite Volume Method and Discretization Schemes in OpenFOAM**. 2020. Disponível em: http://www.wolfdynamics.com/training/OF_WS2020/traning_session2020.pdf.

HADI, J. M.; ALTURAIHI, M. H.; JASIM, N. Y.; HABEEB, L. J. Numerical study of airflow and temperature variations inside car at different solar intensity angles. **Materials Today: Proceedings**, v. 13, p. 1689–1695, 2022.

HADŽIĆ, H. **Development and Application of a Finite Volume Method for the Computation of Flows Around Moving Bodies on Unstructured, Overlapping Grids**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) — Technischen Universität Hamburg-Harburg, Bósnia e Herzegovina, 2005.

JASAK, H. Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows. **Department of Mechanical Engineering: Imperial College of Science, Technology and Medicine, 1996**, 1996.

LIU, F.; NILSSON, H.; IRANNEZHAD, M. A Thorough Description Of How Wall Functions Are Implemented In OpenFOAM. *In: Proceedings of the CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY CONFERENCE*, jan-2017. 2017. p. 1–34. Disponível em: http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2016.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2004. 453 p. ISBN 8521613962, 9788521613961.

MANICA, L. A. **Análise numérica de sistemas de gerenciamento térmico de baterias para veículos elétricos**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Automotiva) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2023.

MAO, Y.; WANG, J.; LI, J. Experimental and numerical study of air flow and temperature variations in an electric vehicle cabin during cooling and heating. **Applied Thermal Engineering**, v. 137, p. 356–367, 2018.

MEDINA, H. J. et al. Open source Computational Fluid Dynamics using OpenFOAM. *In: Proceedings of the ROYAL AERONAUTICAL SOCIETY, GENERAL AVIATION CONFERENCE*, nov. 2015, London, UK. 2016. p. 1–10. Disponível em: <https://www.aerosociety.com/Events/Event-List/1955/Light-Aircraft-Design>.

MORONEY, T. J. **An Investigation of a Finite Volume Method Incorporating Radial Basis Functions for Simulating Nonlinear Transport**. 2006. Tese (Doctor of Philosophy) — Applicable Mathematics and Advanced Computation Program School of Mathematical Sciences, Queensland University of Technology, Austrália, 2006.

MUSAT, R.; HELEREA, E. Parameters and Models of the Vehicle Thermal Comfort. **Acta Universitatis Sapientiae: Electrical and Mechanical Engineering**, v. 1, p. 215–226, 2009.

PARK, G.; KIM, C.; LEE, M.; CHOI, C. Building Geometry Simplification for Improving Mesh Quality of Numerical Analysis Model. **Applied Sciences**, v. 10, p. 1–18, 2020.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. [S.l.]: Hemisphere Publishing Corporation (CRC Press, Taylor & Francis Group), 1980. (Series on Computational Methods in Mechanics and Thermal Science). ISBN 9780891165224.

POPE, S. **Turbulent Flows**. Cambridge University Press, 2000. ISBN 9780521598866. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=HZsTw9SMx-0C>.

PRANDTL, L. Mein weg zu hydrodynamischen theorien. **Physikalische Blätter**, p. 89–92, 1948.

REGEV, O.; UMURHAN, O. M.; YECKO, P. A. Turbulence. *In*: _____. **Modern Fluid Dynamics for Physics and Astrophysics**. Estados Unidos da América: Springer New York, 2016. p. 507–593.

RICHARDSON, L. **The Approximate Arithmetical Solution of Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations, with an Application to the Stresses in a Masonry Dam**. Royal Society, 1910. (Philosophical transactions of the Royal Society of London / A). Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=-cazzQEACAAJ>.

ROACHE, P. J. Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies. **Journal of Fluids Engineering**, v. 116, p. 405–413, 1994. ISSN 0098-2202. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/6817347>.

SIMSCALE. **Background of Hex-dominant Meshing: Overview of snappyHex-Mesh**. 2023a. Disponível em: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/preprocessing/what-is-a-mesh/snappyhexmesh/>.

SIMSCALE. **Main Settings for Hex-dominant Parametric**. 2023b. Disponível em: <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/meshing/hex-dominant/main-settings-for-hex-dominant-parametric/>.

SIP, J. et al. Automotive cabin vent: Comparison of rans and les approaches with analytical-empirical equations and their validation with experiments using hot-wire anemometry. **Building and Environment**, v. 233, p. 1–18, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132323000999>.

SLATER, J. W. **Examining Spatial (Grid) Convergence**. 2021. Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/www/wind/valid/tutorial/spatconv.html>.

SOLMAZ, S. **Turbulence: Which Model Should I Select for My CFD Analysis?** 2023. Disponível em: <https://www.simscale.com/blog/turbulence-cfd-analysis/>.

SZPICER, A.; BIŃKOWSKA, W.; WOJTASIKKALINOWSKA, I.; SALIH, S. M.; PÓŁTORAK, A. Application of computational fluid dynamics simulations in food industry. **European Food Research and Technology**, v. 249, p. 1411–1430, 2023.

THANGAM, S. **Analysis of Two-equation Turbulence Models for Recirculating Flows**. NASA Langley Research Center. Institute for Computer Applications in Science and Engineering [ICASE], 1991. (ICASE report: Institute for Computer Applications in Science and Engineering). Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=ezVDAQAAMAAJ>.

VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Volume Finite Method**. 2. ed. [S.l.]: Pearson Education Limited, 2007. ISBN 97801312749836.

WHITE, F. **Fluid Mechanics**. 7. ed. McGraw Hill, 2011. (McGraw-Hill series in mechanical engineering). ISBN 9780073529349. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=egk8SQAACAAJ>.

WILCOX, D. **Turbulence Modeling for CFD**. DCW Industries, 2006. (Turbulence Modeling for CFD, v. 1). ISBN 9781928729082. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=tFNNPgAACAAJ>.

ZHOU, X.; LAI, D.; CHEN, Q. Experimental investigation of thermal comfort in a passenger car under driving conditions. **Building and Environment**, v. 149, p. 109–119, 2019.