

Análise do Escoamento de ar Em Um Duto de ar Condicionado Automotivo Através da Dinâmica dos Fluidos Computacional

Samuel Reis Souza¹

 orcid.org/0009-0005-2376-3857

Francisco Jarmeson Silva
Bandeira¹

 orcid.org/0000-0001-7392-7403

¹Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil. E-mail: francisco.bandeira@ufba.br

²Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

DOI: 10.25286/rep.v10i1.2820

Esta obra apresenta Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

Como citar este artigo pela NBR 6023/2018: Souza S. R.; Costa D. A.; Tarsila Tenório Luna da Silva; Bandeira F. J. S. Análise do Escoamento de Ar em um Duto de Ar Condicionado Automotivo Através da Dinâmica dos Fluidos Computacional CFD. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v.10, n. 1, p. 53-70, 2025.

Daniela Araújo Costa²

 orcid.org/0000-0002-4241-4477

Tarsila Tenório Luna da
Silva¹

 orcid.org/0000-0001-6865-2185

RESUMO

A Dinâmica dos Fluidos Computacional, comumente conhecida pela sigla CFD, é o campo de estudo que se dedica à simulação numérica do escoamento de fluidos, troca de calor e dos fenômenos correlatos. As simulações numéricas, em sua essência, representam um conjunto de diversos esquemas numéricos meticulosamente projetados com o objetivo de resolver as equações que regem tais problemas. Neste contexto, o presente trabalho realizou uma simulação em CFD de um duto de distribuição de ar condicionado automotivo, afim de avaliar os efeitos dos parâmetros geométricos da tubulação na perda de carga. Para isso, foram avaliadas seis diferentes geometrias, cada uma delas com três seções transversais distintas, totalizando dezoito modelos. Os principais aspectos observados foram a perda de carga ao longo de cada um dos dutos, a energia cinética turbulenta, e a velocidade do fluido. As simulações foram realizadas utilizando a versão acadêmica do software Ansys Fluent 2021R2. Os resultados observados indicam que diferentes parâmetros geométricos exercem uma influência significativa na eficiência do sistema. A presença de raios em regiões de curvatura contribuiu para uma melhoria significativa na eficiência do sistema e colaborou para uma maior organização do escoamento do fluido. Foi observado que a efetividade de raios internos foi consideravelmente maior do que a de raios externos. A menor variação de pressão foi observada no duto de ar condicionado com raios externos de 100 mm e internos de 30 mm. Para os dutos analisados, quanto menor energia cinética da turbulência, menor era a pressão na face de entrada.

PALAVRAS-CHAVE: Dinâmica dos Fluidos Computacional; Duto de ar condicionado automotivo; Perda de carga; Energia Cinética de Turbulência.

ABSTRACT

Computational Fluid Dynamics, commonly known by the acronym CFD, is the field of study dedicated to the numerical simulation of fluid flow, heat exchange, and related phenomena. Numerical simulations, at their core, represent a set of diverse numerical schemes meticulously designed to solve the equations that govern such problems. In this context, the present work performed a CFD simulation of an automotive air conditioning distribution duct, to evaluate the effects of the geometric parameters of the piping on the pressure drop. For this, six different geometries were assessed, each with three distinct cross-sections, totaling eighteen models. The main aspects observed were the pressure loss along each of the ducts, the turbulent kinetic energy, and the velocity of the fluid. The simulations were performed using the academic version of the Ansys Fluent 2021R2 software. The observed results indicate that different geometric parameters exert a significant influence on the efficiency of the system. The presence of radius in regions of curvature contributed to a substantial improvement in the efficiency of the system and contributed to a greater organization of the fluid flow. It was observed that the effectiveness of internal rays was considerably higher than external rays. The lowest pressure variation was observed in the air conditioning duct with an external radius of 100 mm and an internal radius of 30 mm. For the ducts analyzed, the lower the kinetic energy of the turbulence, the lower the pressure at the inlet face.

KEY-WORDS: Computational Fluid Dynamics; Automotive Air Conditioning Duct; Pressure Drop; Turbulent Kinetic Energy.

1 INTRODUÇÃO

A busca por eficiência energética e conforto nos veículos automotivos têm se tornado uma prioridade no setor automobilístico, impulsionada por preocupações ambientais e pela necessidade de redução das emissões de gases poluentes. Nesse contexto, o sistema de ar condicionado desempenha um papel significativo, sendo responsável por uma parcela considerável do consumo de energia de um veículo. Diante desse cenário, é crucial avaliar numericamente a perda de carga e a intensidade turbulenta causadas pelo escoamento de fluido em sistemas de dutos de ar condicionado automotivo, assim como analisar a influência da geometria desses dutos nos resultados obtidos. Tais resultados servirão de parâmetros fundamentais para desenvolver ou aprimorar projeto de dutos de ar condicionado automotivo. [1]

Numerosos pesquisadores, como referenciado em [2],[3],[4],[5],[6],[7], e [8], conduziram estudos abrangentes sobre a perda de carga em uma variedade de superfícies de dutos. Uma observação recorrente em todas essas pesquisas é a influência significativa das paredes do duto e dos obstáculos em seu interior na dissipação de energia do fluido em escoamento. Esta dissipação de energia no fluido, conseqüentemente, resulta na perda de carga, um fenômeno que é comumente observado em todos os estudos mencionados.

O duto de distribuição de ar é uma parte indispensável do sistema de ar condicionado automotivo, e quando bem projetado pode reduzir substancialmente a queda de pressão e melhorar a distribuição do ar condicionado no interior do veículo. Bicalho [9] abordou a influência da queda de pressão no duto central de um ar condicionado veicular e identificou que quanto menor for a perda de carga, menor será o consumo de energia do sistema de ventilação.

Nesse cenário, as análises de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) destaca-se como uma poderosa ferramenta para o estudo e análise do escoamento de ar nos sistemas de dutos. Por meio da aplicação de modelos matemáticos e algoritmos computacionais, a CFD permite simular e prever o comportamento do escoamento de ar em diferentes geometrias, proporcionando uma avaliação detalhada do desempenho do sistema. Essas análises são essenciais para identificar áreas de melhoria e otimização na geometria dos dutos de ar condicionado automotivo. [10]

O objetivo desse trabalho é avaliar numericamente, utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), a perda de carga e a intensidade turbulenta causada pelo escoamento de fluido passando por um sistema de dutos de ar condicionado automotivo e identificar a influência dos parâmetros geométricos do duto nesses resultados. Além disso, com esse tipo de estudo é possível projetar dutos mais eficientes, que proporcionem uma distribuição uniforme do ar. Isso resulta em um ambiente interno mais confortável para os passageiros, aumentando a qualidade e a experiência de uso dos sistemas de ar condicionado automotivo com menor gasto energético.

Em síntese, a avaliação numérica da perda de carga e da intensidade turbulenta nos dutos de ar condicionado automotivo, bem como a análise da influência da geometria do duto, é de suma importância para o aprimoramento dos sistemas de ar condicionado em veículos automotivos. [1].

Este estudo apresenta descobertas que enfatizam a importância dos parâmetros geométricos dos dutos de distribuição de ar. Tais parâmetros têm o potencial de influenciar significativamente a elaboração de projetos eficientes voltados para a minimização do consumo energético dos sistemas de climatização veicular. Esta pesquisa abre caminho para a concepção de veículos com maior eficiência energética e para a criação de ambientes internos que proporcionem conforto aos passageiros. Isso é alcançado através do desenvolvimento de geometrias otimizadas que contribuem para a redução da perda de energia nos dutos dos sistemas de ar condicionado veicular.

2 ESTUDO DA ARTE

Devido à importância do sistema de climatização automotivo, muitos testes e diferentes tipos de validação já foram feitos a fim de se obter o sistema mais eficiente possível que atenda às necessidades dos ocupantes dos veículos.

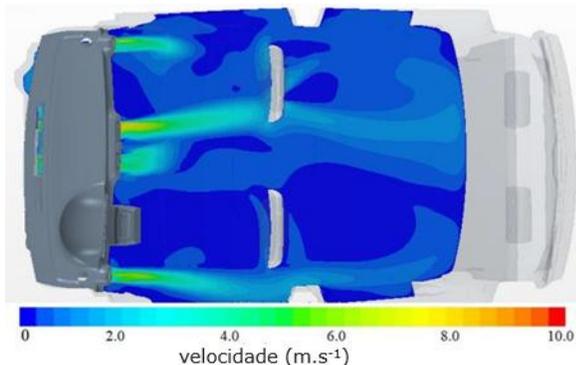
Gaziola e Gomes [11] realizaram um estudo destacando a importância do desenvolvimento dos veículos que tem como um dos focos os sistemas de ar condicionado. Permitindo mais conforto para os passageiros. Os autores destacam a importância da análise da distribuição de temperatura e do escoamento de ar em função do número de ocupantes na cabine do veículo.

Kitada et al. [12] realizaram estudos para avaliar o desempenho de sistema de ar condicionado automotivo visando o desenvolvimento de técnica

para controle de alta precisão da temperatura, e destacam a importância da análise da perda de carga no duto e da precisão do modelo de fluxo turbulento.

Libin e Yuejin [13] fizeram uma avaliação e otimização minuciosa e detalhada do escoamento de ar interno em diferentes regiões do veículo. Nesta pesquisa, o sistema de ar-condicionado de um veículo elétrico foi utilizado como objeto de estudo. As características do campo de escoamento interno do sistema de ar-condicionado foram investigadas por meio do CFD. Os resultados mostraram que o escoamento de ar no sistema de ar-condicionado é relativamente suave, porém, a distribuição de velocidade na área do para-brisa dianteiro e no campo de visão do motorista das janelas esquerda e direita não é ideal quando o modo de desembaçar está ativado. Além disso, a distribuição de velocidade e quantidade de ar nas duas saídas do duto de ar central não é uniforme no modo de ventilação. Diante da distribuição desigual de velocidade e quantidade de ar, é proposto um esquema de otimização correspondente. A fig.1 ilustra o resultado da simulação em CFD realizado por Libin e Yuejin [13] possibilitando observar a distribuição do ar condicionado no interior do veículo.

Figura 1 – Modelagem da distribuição de velocidade do ar condicionado no interior de um veículo.

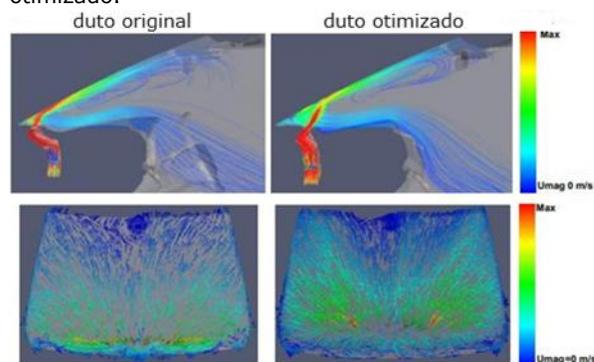


Fonte: Adaptado de [13].

Panagiotidou [14] também fez uma avaliação criteriosa da influência de diferentes parâmetros geométricos de um duto de para-brisa através da simulação computacional. De forma que alterações em dimensões, formato e ângulo de saída do duto fizeram com que os resultados finais observados na simulação CFD fossem melhores do que a geometria inicial de acordo com os critérios especificados. Para atingir seu objetivo, a autora incorpora técnicas de design de experimentos, modelagem de malha, modelos de regressão e algoritmos evolucionários.

Essas abordagens foram escolhidas para eliminar a dependência da inicialização de métodos de otimização baseados em gradientes, bem como a capacidade limitada de deformação de geometria característica da deformação livre de forma, devido à topologia fixa. Na fig. 2 é possível observar a diferença do modelo original e otimizado estudado por Panagiotidou [14].

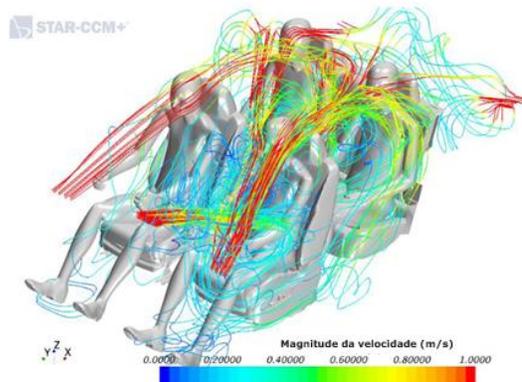
Figura 2 – Linhas de escoamento e velocidade do duto otimizado.



Fonte: Adaptado de [14].

Waley [15] realizou um estudo que aborda a distribuição de velocidade no interior do veículo, sendo possível observar que a velocidade de saída nos dutos é importante na distribuição de ar no automóvel. A fig.3 ilustra a distribuição de velocidade após a saída do duto do ar condicionado.

Figura 3 – Distribuição de velocidade em um veículo

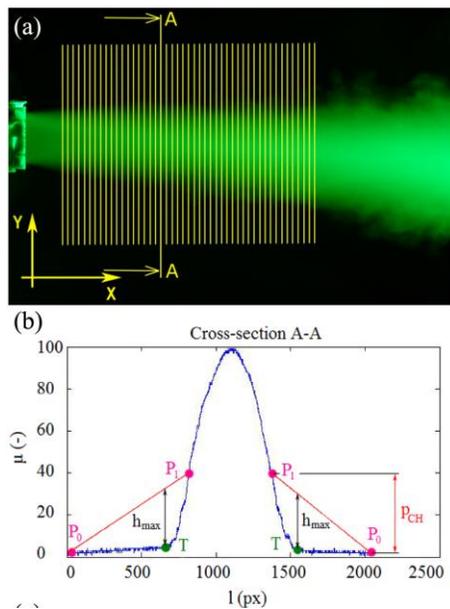


Fonte: Adaptado de [15].

Lizal et al. [16] realizaram um estudo experimental investigando a influência de parâmetros geométricos no escoamento de ar de um duto de ar-condicionado e concluíram que a performance da ventilação depende diretamente da geometria do canal. A fig.4 ilustra um dos resultados obtidos no estudo, apresentando resultados experimentais da distribuição do ar e da

perda de carga após a saída do duto do ar condicionado.

Figura 4 – Distribuição do ar e da perda de carga após a saída do duto do ar condicionado.



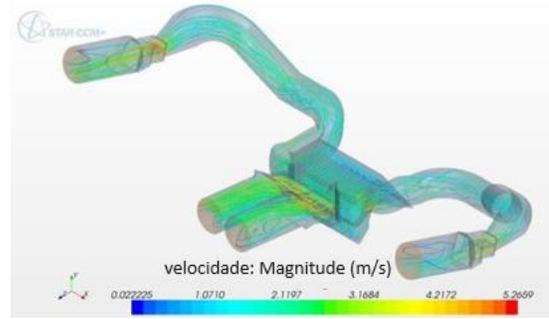
Fonte: [16].

Alsalem [17] conduziu uma pesquisa utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para analisar o escoamento turbulento de ar em dutos retos. Uma velocidade de entrada uniforme foi assumida para dois cenários distintos: na entrada reta do duto e na entrada de um cotovelo de ângulo reto situado imediatamente a montante do duto reto. Alsalem [17] conseguiu obter perfis de gradiente de velocidade e pressão para diferentes taxas de escoamento e dimensões de dutos, representando uma gama utilizada na prática de engenharia, que inclui geometrias de dutos redondos e retangulares. Os resultados obtidos por Alsalem [17] demonstraram que os comprimentos de desenvolvimento de velocidade e pressão nos dutos redondos são inferiores aos dos dutos quadrados e retangulares correspondentes. Isso indicou que o comprimento de desenvolvimento do escoamento é dependente da geometria, além de ser influenciado pelo número de Reynolds. Ao comparar o comprimento de entrada de um duto redondo obtido pela CFD com uma correlação de comprimento de entrada experimental amplamente reconhecida, verificou-se que os resultados da abordagem de CFD utilizada neste estudo estavam dentro de uma margem de 10% em relação aos resultados experimentais.

Carmignan [18] realizou um estudo do escoamento de ar em um duto de ar condicionado

utilizando CFD para determinar a queda de pressão. Os resultados obtidos na simulação foram comparados com resultados experimentais. A fig. 5 ilustra o comportamento das linhas de corrente e velocidade do escoamento no duto analisado pelo autor.

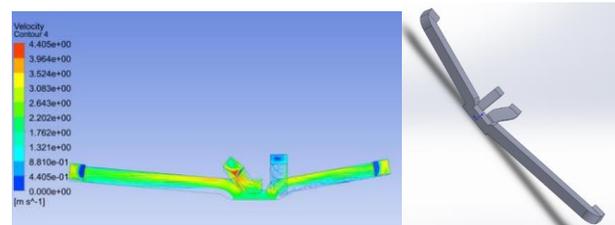
Figura 5 – Linhas de corrente e velocidade do fluido em um duto de ar condicionado veicular



Fonte: Adaptado de [18].

He [19] conduziu uma pesquisa focada na otimização do sistema de ar condicionado, utilizando um algoritmo em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). O desempenho do fornecimento de ar do duto de distribuição tem um impacto direto na uniformidade do campo de temperatura e do campo de velocidade no interior do veículo, influenciando, assim, o desempenho do conforto térmico. Com base no modelo inicial do duto de ar condicionado de um modelo de veículo, o problema da turbulência da tubulação e a distribuição desigual do volume de ar em cada saída no processo de simulação são aprimorados, garantindo o tamanho existente. Finalmente, a racionalidade da melhoria é verificada. A Fig.6 aborda a distribuição de velocidade ao longo do duto de distribuição do ar condicionado veicular utilizado por He [19].

Figura 6 – Velocidade do fluido no interior do duto de ar condicionado veicular.



Fonte: [19].

Ollen [20] realizou um estudo relacionado o sistema de dutos de aquecimento e ventilação do sistema de ar condicionado veicular e menciona que esse tipo de duto tem uma geometria complexa

devido a restrições de espaço no compartimento do motor. Isto poderia influenciar na redução da pressão dentro do duto, diminuindo a velocidade do fluxo de ar nas saídas. O objetivo principal do estudo de Ollen [20] era aumentar a uniformidade e a velocidade do escoamento de ar em cada saída do duto. Para isso, ele variou a geometria da saída e os ângulos do cotovelo do duto utilizando o método de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Ollen [20] descobriu que a otimização de parâmetros geométricos poderia proporcionar ajustes no escoamento de ar e na velocidade nas saídas, resultando em um aumento entre 4% a 9% em comparação com o projeto de linha de base.

Daly [21] desenvolveu um estudo importante dos sistemas de ar condicionado automotivo, com foco tecnológico, nos quais, são abordados sistemas de climatização automotiva, legislação e meio ambiente. Além disso, o estudo traz uma quantidade sem precedentes de cobertura eletrônica, com informações sobre os sensores e atuadores mais recentes, diagnóstico a bordo (OBD e EOBD), procedimentos de teste usando medidores, scanners e osciloscópios, além de informações adicionais sobre como ler diagramas elétricos europeus. Essas informações são então aplicadas a três estudos de caso práticos baseados em fabricantes europeus. O autor ainda enfatiza que é fundamental que os engenheiros de ar condicionado tenham um entendimento fundamental do controle eletrônico automotivo para que possam trabalhar com sucesso no campo de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado Automotivo (HVAC). Ou seja, permite uma compreensão abrangente do sistema de controle climático.

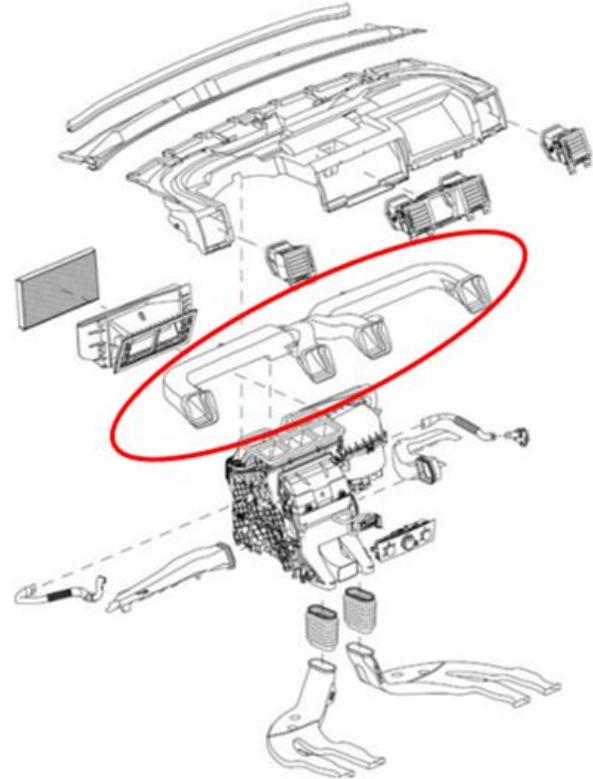
3 ESTUDO DE CASO

A geometria analisada no presente estudo, consiste de um modelo genérico de duto de ar condicionado de painel de instrumentos automotivo, que foi baseado em referências geométricas de dutos comerciais e de estudos disponíveis na literatura.

Daly [21] descreve de forma detalhada o funcionamento e a características dos componentes que compõem um sistema de ar condicionado automotivo. A fig. 7 ilustra tais componentes em uma vista explodida, sendo destacado o duto do painel, que será o objeto deste trabalho. É interessante observar que a geometria desse duto é constituída por uma região de entrada e quatro saídas, sendo duas dessas saídas centrais e outras

duas laterais próximas à porta do veículo (uma à esquerda e outra à direita). Também é relevante notar que a seção transversal do duto é basicamente retangular.

Figura 7 – Vista explodida de um sistema de ar condicionado automotivo.

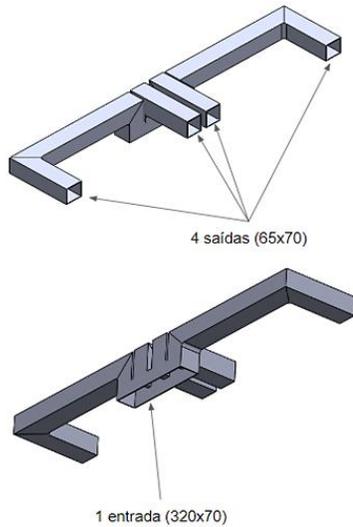


Fonte: [21].

Este padrão de dutos, com seção transversal retangular e quatro saídas, é igualmente observado em modelos comerciais. Tal configuração é convencional na distribuição de saídas de ar condicionado em veículos, com uma saída posicionada em cada lateral próximo às portas (do motorista e do passageiro) e duas localizadas no centro do veículo.

O modelo avaliado no presente trabalho, consiste de um duto com uma entrada 320 x 70 mm e com quatro saídas de seção transversal retangular 65 x 70 mm. A disposição das saídas é a mesma utilizada por Daly [21], sendo duas laterais (esquerda e direita) e duas centrais, como mostra a fig. 8.

Figura 8 – Modelo Inicial Proposto



Fonte: Os autores.

3.1 OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

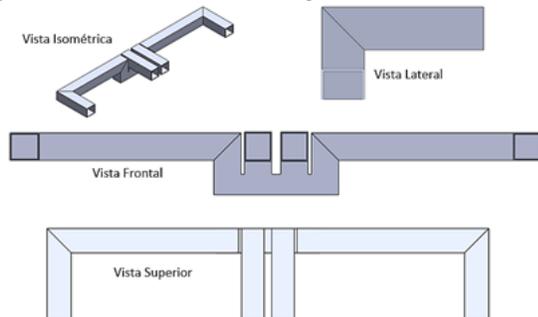
A partir da geometria do modelo inicial proposto, ilustrado na fig.8 foram criados modelos alternativos inserindo raios e chanfros para tentar melhorar o escoamento de ar. E outra avaliação feita foi a variação da geometria da seção transversal do duto.

No total foram avaliados seis diferentes geometrias e três tipos de seção transversal. Ou seja, no total foram simulados dezoito diferentes modelos e os resultados e conclusões das análises serão abordadas posteriormente.

3.1.1 Duto retangular

A geometria inicial apresenta todas as regiões de curvatura com ângulos de 90° (cotovelos), nenhum raio ou chanfro foi inserido, conforme ilustra a fig 9.

Figura 9 – Duto veicular retangular



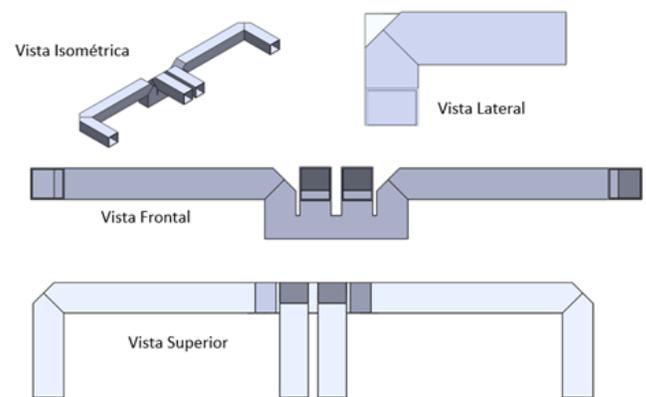
Fonte: Os autores.

Na Figura 9, pode-se observar o duto de distribuição de ar, que apresenta uma seção transversal retangular, a partir de perspectivas isométricas, lateral, frontal e superior. Os demais dutos, que serão apresentados nas seções subsequentes, ilustrarão as mesmas perspectivas apresentadas na fig.9.

3.1.2 Duto com chanfros

A geometria avaliada tem chanfros de 45° nas regiões externas dos cotovelos do duto, conforme ilustra a fig.10.

Figura 10 – Duto veicular com chanfro

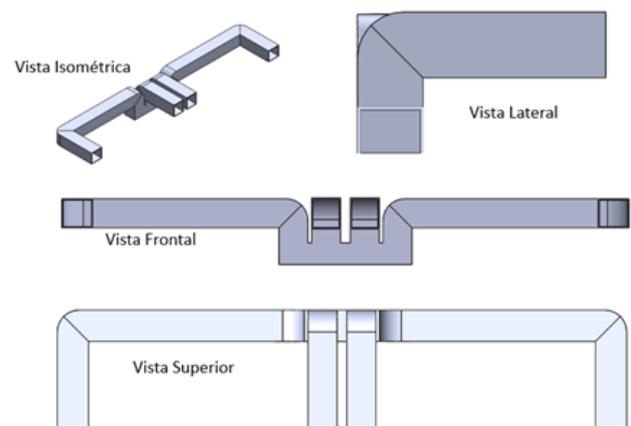


Fonte: Os autores.

3.1.3 Duto com raios externos de 50 mm

A geometria tem raios de 50 mm nas regiões externas dos cotovelos do duto, conforme ilustra a fig.11.

Figura 11 – Duto com raios externos de 50 mm

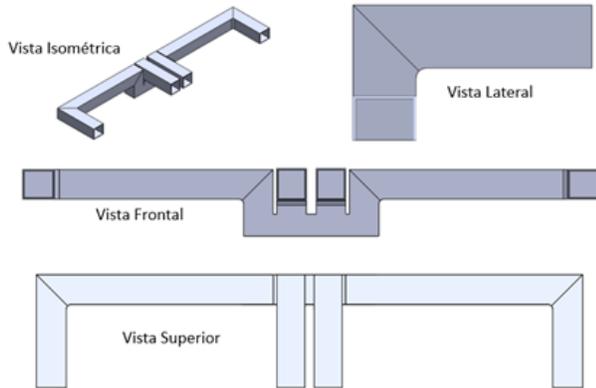


Fonte: Os autores.

3.1.4 Duto com raios internos de 15 mm

Este duto tem raios de 15 mm nas regiões internas dos cotovelos do duto, enquanto que as partes externas do cotovelo têm ângulos de 90°, conforme ilustra a fig.12.

Figura 12 – Duto com raios internos de 15 mm

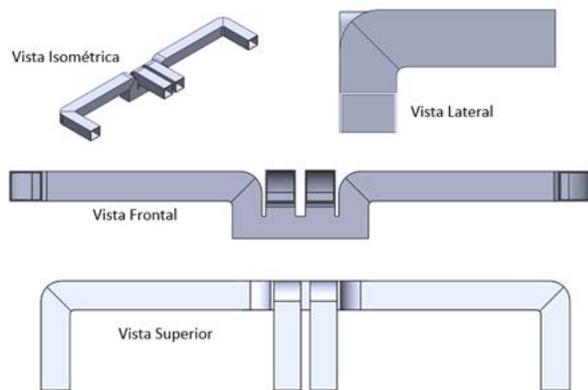


Fonte: Os autores.

3.1.5 Duto com raios externos de 50 mm e internos de 15 mm

Esta geometria é diferenciada nas regiões de cotovelo, apresenta raios internos de 15 mm e raios externos de 50 mm, conforme ilustra a fig. 13:

Figura 13 – Duto com raios externos de 50 mm e internos de 15 mm



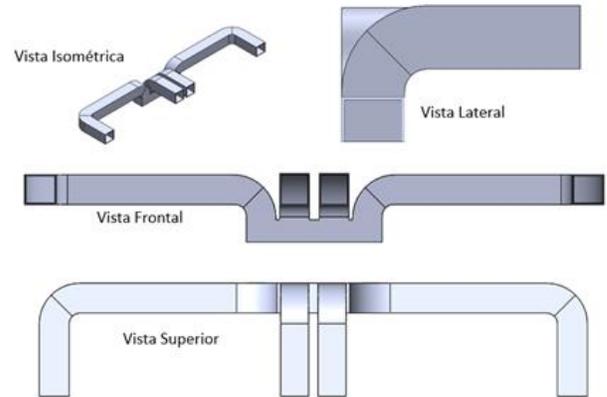
Fonte: Os autores.

3.1.6 Duto com raios externos de 100 mm e internos de 30 mm

Assim como o modelo anterior, o duto com raios externos de 100 mm e internos de 30 mm também apresenta raios internos e externos nas regiões de

cotovelo, mas nesta geometria os raios internos são de 30 mm e os raios externos são de 100 mm, assim como mostra a fig.14.

Figura 14 – Duto com raios externos de 100 mm e internos de 30 mm

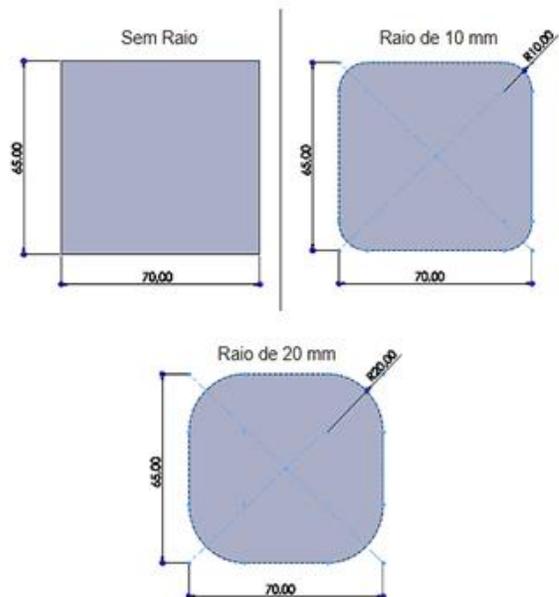


Fonte: Os autores.

3.1.7 Seções Transversais

Além das diferentes geometrias, outro parâmetro que foi modificado foi a seção transversal do duto. No total foram avaliados três tipos diferentes de seção transversal, sendo uma delas com canto retos, a segunda com filetes de 10 mm e a terceira com filetes de 20 mm. A fig. 15 ilustra os diferentes formatos entre as seções transversais.

Figura 15 – Comparativo das Seções Transversais



Fonte: Os autores.

É válido ressaltar que a simulação de cada um dos modelos descritos anteriormente foi realizada com os três diferentes tipos de seção transversal especificados nessa seção.

4 METODOLOGIA

O presente trabalho utiliza como metodologia a simulações numérica aplicada a um sistema de dutos de ar condicionado de painel de instrumentos automotivo. Nessa seção, serão expostas todas as configurações utilizadas para a simulação numérica do escoamento no interior dos dutos de ar condicionado veicular, apresentados na seção anterior.

As configurações adotadas foram examinadas utilizando como ferramenta ANSYS/FLUENT 2021R2 em sua versão acadêmica. Esta ferramenta incorpora vários métodos avançados para análise de escoamentos, como o método de volumes finitos para a discretização das equações de Navier-Stokes e modelos de turbulência, como o k-ε, que foi abordado neste estudo.

O propósito desta simulação computacional é comparar os resultados obtidos para diferentes modelos geométricos e identificar a influência dos parâmetros geométricos na perda de carga e na intensidade turbulenta no escoamento.

4.1 PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

Nesta seção, serão descritos brevemente o procedimento adotado para a definição das características da malha computacional, as condições iniciais e de contorno assumidas, e a parametrização das regiões para a obtenção dos resultados.

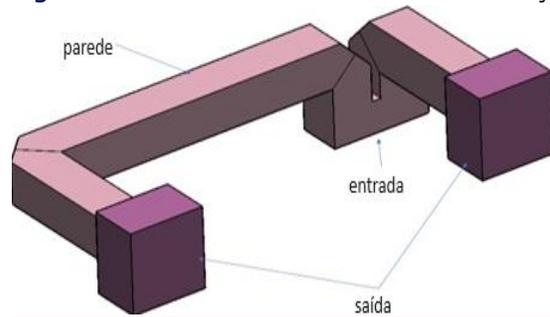
4.1.1 Modelo geométrico e condições de contorno para simulação

Todas as geometrias avaliadas no presente estudo exibem um padrão simétrico. Portanto, com o objetivo de otimizar os recursos computacionais e considerando as limitações da licença acadêmica, optou-se por manter apenas um duto central e um duto lateral. A suposição é que, devido à simetria, todos os fenômenos observados no lado esquerdo serão equivalentes no lado direito.

Além disso, uma geometria auxiliar nas regiões de saída foi criada, a fim de que a condição de contorno de saída fosse estabelecida sem influenciar nos

resultados dentro do duto em pontos que ficassem próximos à saída. A fig.16 ilustra como ficou o duto com chanfro após esse procedimento.

Figura 16 – Modelo do duto utilizado nas simulações



Fonte: Os autores.

As condições de contorno adotadas estão descritas na tabela 1.

Tabela 1- Condições de contorno

Condição de contorno	Grandeza	Valor
Entrada	Vazão Volumétrica (L/s)	45
Saída	Pressão Manométrica (Pa)	0
Parede	Não Deslizamento	
Fluido (Ar)	Massa Específica (kg/m ³)	1,225
	Viscosidade (Pa.s)	1,79 x 10 ⁻⁵

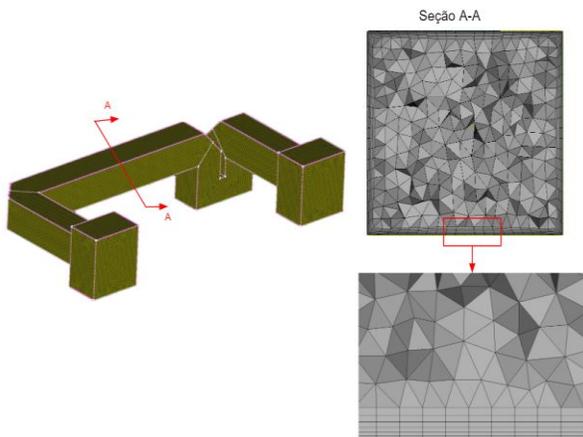
Fonte: Os autores.

4.1.2 Discretização e parametrização da malha

A elaboração da malha para todos os modelos adotou um procedimento análogo, uma vez que a versão acadêmica do ANSYS/FLUENT 2021R2 impõe uma restrição no tamanho da malha, limitando-a a 512 mil elementos. Primeiramente, a superfície interna do duto, que é a região de interesse para o escoamento, foi extraída. A partir dessa geometria, uma malha volumétrica foi criada, sendo que na região de camada limite (na proximidade com a parede) um refinamento maior foi utilizado, onde foram utilizadas 7 camadas de elementos, sendo a menor delas de 0,2 mm e as demais seguiam um padrão de crescimento de 1,2, ou seja, a segunda camada era de 1,2 vezes 0,2

mm, a terceira era de 1,2 vezes o tamanho da segunda e assim sucessivamente. De forma que as 7 camadas juntas tivessem um tamanho de 2,6 mm. A fig.17 ilustra os elementos de refinamento gerados na seção transversal do modelo.

Figura 17 – Elementos da Malha com detalhe de refino na camada limite



Fonte: Os autores.

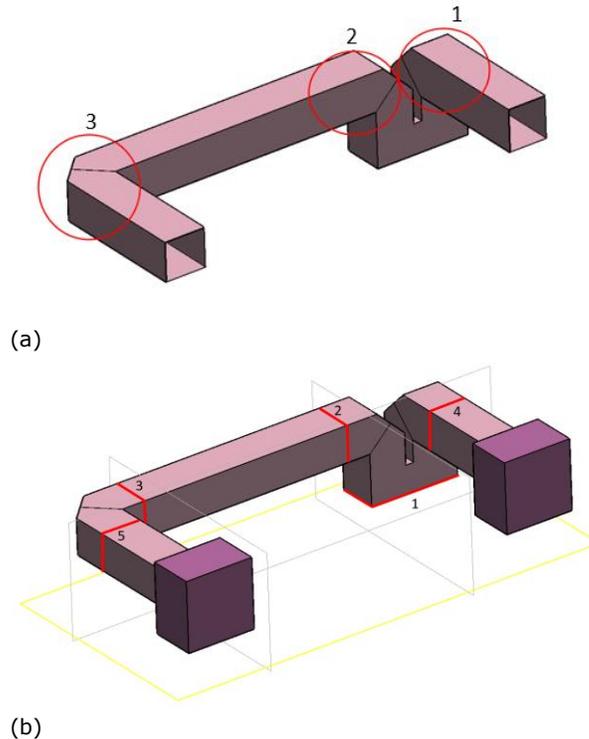
O restante do volume foi discretizado com elementos tetraédricos, onde o tamanho médio de cada elemento foi definido de forma que a quantidade total de elementos não ultrapassasse o limite da licença acadêmica do software. No geral os elementos ficaram com um tamanho médio entre 3 e 5 mm, sendo que nas regiões de cotovelo, que é onde existem as variações na geometria, um refinamento maior da malha foi realizado.

O critério de convergência que foi observado em todas as análises foi o acúmulo de erro devido ao método de solução numérico. Foi definido como condição de convergência um erro máximo acumulado menor ou igual a $1,0 \times 10^{-4}$ para alguns parâmetros, sendo eles: a velocidade (m/s) nas três componentes vetoriais do espaço; a energia cinética de turbulência (m^2/s^2), a taxa de dissipação turbulenta (m^2/s^2) e também a continuidade - conservação de massa (m^3/s).

4.1.3 Parametrização das regiões de obtenção dos resultados

De forma a obter padrões comparativos entre as diferentes geometrias avaliadas, foram definidas regiões comuns para obtenção dos dados. Inicialmente, estimou-se que os cotovelos seriam as regiões que provocariam a maior queda de pressão. Assim, essas regiões foram identificadas e os planos para a obtenção dos dados de pressão foram definidos, conforme ilustrado na fig.18.

Figura 18 – Identificação dos cotovelos (a) e definição dos planos de medição de pressão (b)



Fonte: Os autores.

Para realizar essa avaliação, as pressões foram medidas em planos específicos ao longo do duto, conforme demonstrado na Figura 18(b), que ilustra a posição de cada um desses planos.

Considera-se que o delta de pressão do cotovelo 1 é a diferença de pressão entre os planos 1 e 4, o delta de pressão do cotovelo 2 é a diferença de pressão entre os planos 1 e 2 e o delta de pressão do cotovelo 3 é o delta de pressão entre os planos 3 e 5. Além disso, também foram visualizados graficamente a distribuição de pressão e o perfil de velocidade ao longo do duto, sendo que nas regiões dos cotovelos, seções foram feitas para que uma observação mais criteriosa do comportamento do fluido pudesse ser feita.

5 RESULTADOS

Após a execução das análises, foram obtidos os resultados da pressão na face de entrada do ar (Pfe), uma medida de importância crucial, pois determina a energia disponível para o escoamento do fluido. Além disso, foi medida a velocidade média do fluido (Vm), que representa a média das velocidades do ar em diferentes pontos ao longo da seção transversal do duto. Também foi avaliada a

energia cinética turbulenta (K) no interior do duto que representa uma medida direta da intensidade da turbulência no escoamento, e a distribuição percentual da quantidade de ar que escoa pela saída central e pela saída lateral (Fcl) para cada duto apresentados na seção 3.1.

5.1 RESULTADOS DOS DUTOS RETANGULARES

A seguinte seção, apresenta os resultados obtidos da simulação do duto retangular. A tabela 2 apresenta os resultados de pressão na face de entrada (Pef), energia cinética turbulenta (K), velocidade média do fluido (Vm) e distribuição percentual da quantidade de ar na saída central e lateral (Fcl).

Tabela 2 – Resultados de P_{ef}, K, V_m e Fcl para os dutos retangulares.

Seção Transversal	P _{ef} (Pa)	K (m ² /s)	V _m (m/s)	Fcl
Sem raio	49,3	1,28	4,71	56% / 44%
Raio de 10 mm	49,2	1,25	4,76	56% / 44%
Raio de 20 mm	53,1	1,38	4,93	57% / 43%

Fonte: Os autores

Analisando os dados de pressão na face de entrada do duto, observa-se que para o duto com o raio na seção transversal de 20mm obteve-se uma pressão de 53,1 Pa, sendo superior à das demais seções transversais.

Na tabela 3 são apresentados os dados de delta de pressão do cotovelo 1, 2 e 3, que relaciona os planos conforme mencionados na seção 4.1.3.

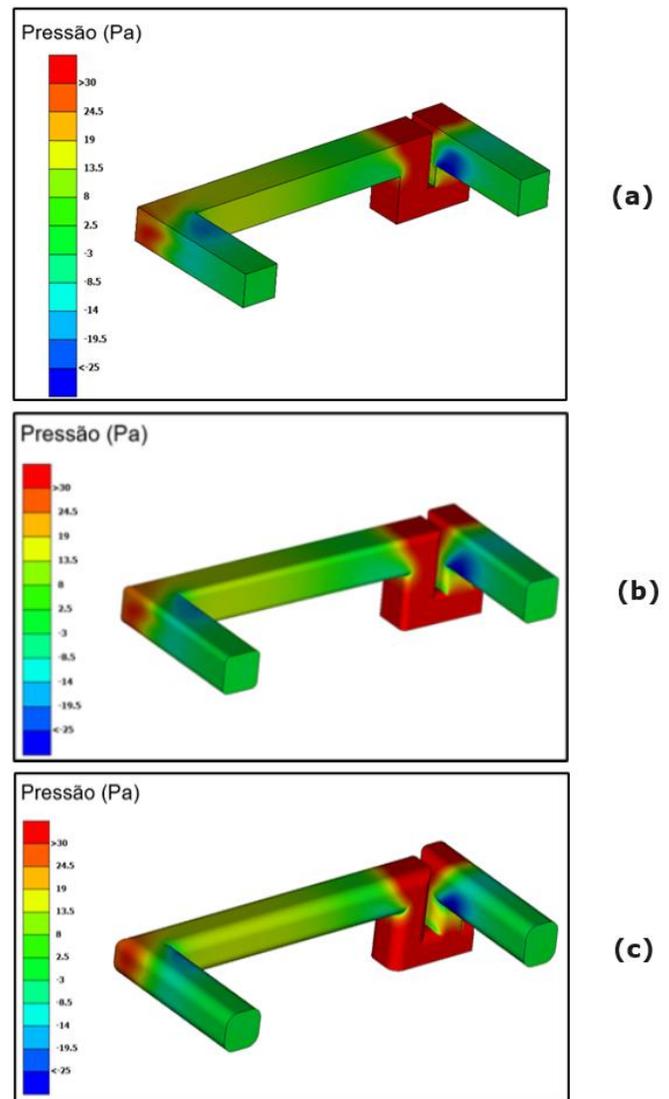
Tabela 3 – Perda de carga nos cotovelos dos dutos retangulares.

Seção Transversal	ΔP (Pa) no Cotovelo		
	1	2	3
Sem raio	36,8	25,6	21,8
Raio de 10 mm	36,7	25,5	21,7
Raio de 20 mm	39,6	27,6	23,4

Fonte: Os autores

A fig. 19 ilustra respectivamente, a distribuição de pressão no duto retangular de seções quadradas sem raio, com raio de 10 mm e raio de 20 mm.

Figura 19 – Pressão no duto retangular sem raio (a), com raio de 10 mm (b) e raio de 20 mm (c).



Fonte: Os autores.

Analisando as tabelas 2 e 3, e a figura 19, observa-se que para a seção transversal do duto retangular com o raio de 20 mm a perda de carga no cotovelo 1, 2 e 3 foi maior, quando comparado as outras seções transversais, necessitando de uma maior pressão de entrada e favorecendo o aumento da quantidade de ar pelo duto central.

A perda de carga mínima foi registrada para um raio de 10 mm. A introdução de uma curvatura no perfil resultou em uma diminuição da energia cinética turbulenta, bem como uma redução na pressão de entrada. No entanto, uma expansão no raio, como no caso do raio de 20 mm, resultou em um declínio no desempenho da pressão, levando a um aumento no consumo de energia. Este

fenômeno foi observado de maneira similar na seção que não apresentava raio. Estes resultados sugerem que, para a geometria com dutos retangulares, um aumento na curvatura não necessariamente resulta em uma redução na variação de pressão em curvas.

5.2 RESULTADOS DOS DUTOS COM CHANFROS

Os resultados obtidos para o duto com chanfros são apresentados nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Resultados de Pfe, K, Vm e Fcl para os dutos com chanfros.

Seção Transversal	Pef (Pa)	K (m ² /s)	Vm (m/s)	Fcl
Sem raio	50,2	1,17	4,91	56% / 44%
Raio de 10 mm	57,9	1,17	4,85	57% / 43%
Raio de 20 mm	57,1	1,46	5,13	56% / 44%

Fonte: Os autores

Tabela 5 – Perda de carga nos cotovelos dos dutos com chanfros.

Seção Transversal	ΔP (Pa) no Cotovelo		
	1	2	3
Sem raio	37,3	27,2	21,0
Raio de 10 mm	43,0	31,4	24,2
Raio de 20 mm	42,4	30,9	23,9

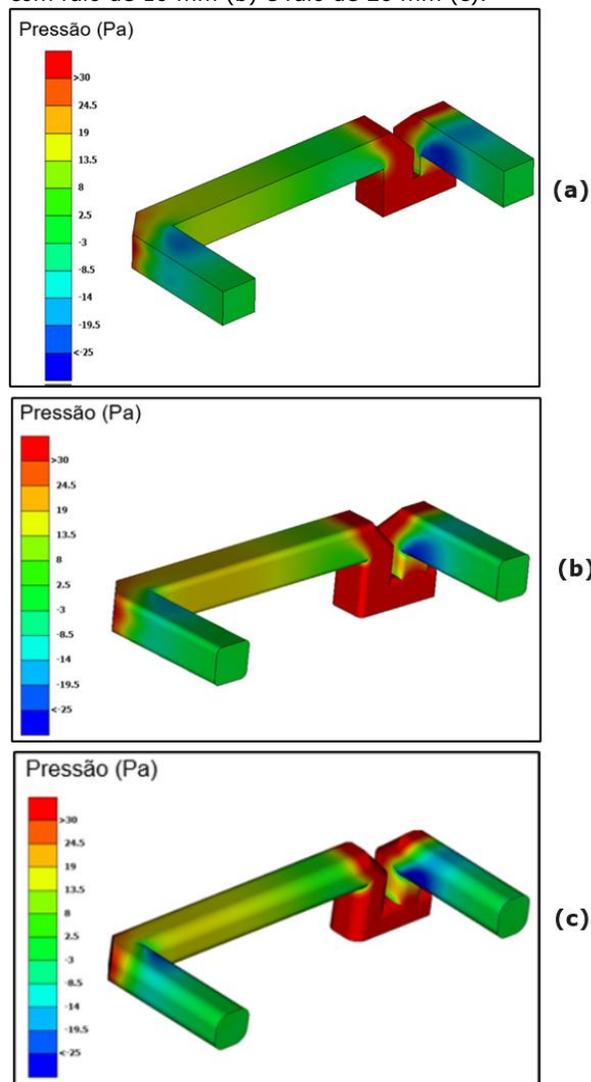
Fonte: Os autores

A figura 20 ilustra respectivamente, a distribuição de pressão no duto com chanfro com seções transversais sem raio, com raio de 10 mm e raio de 20 mm.

Analisando as tabelas 4 e 5, e a figura 20, observa-se que para a seção transversal do duto com chanfro nos cotovelos e com o raio de 10 mm na borda da seção transversal apresentou a maior perda de carga nos cotovelos 1, 2 e 3, quando comparado as outras seções transversais, necessitando de uma maior pressão de entrada e favorecendo o aumento da quantidade de ar pelo duto central.

A menor perda de carga observada foi para a seção transversal sem o raio de curvatura nas bordas. A curvatura no perfil favoreceu o aumento da energia cinética turbulenta e da pressão de entrada.

Figura 20 – Pressão no duto com chanfro sem raio (a), com raio de 10 mm (b) e raio de 20 mm (c).



Fonte: Os autores.

Os resultados obtidos indicam que, para os dutos que apresentam chanfros em suas curvas, a incorporação de um raio na seção transversal da tubulação resulta em um aumento na variação de pressão nas curvas. Portanto, essa abordagem não se mostra eficaz como estratégia para a redução da perda de carga.

5.3 RESULTADOS DOS DUTOS COM RAIOS EXTERNOS DE 50 MM.

Um terceiro modelo simulado foi observando qual a influência da adição de um raio na curvatura nos cotovelos. Para essa seção foram obtidos dados com raio externo de 50 mm. Os resultados são apresentados nas tabelas 6 e 7.

A figura 21 ilustra respectivamente, a distribuição de pressão no duto com raios externos de 50 mm nos cotovelos e com seções transversais sem raio, com raio de 10 mm e raio de 20 mm.

Tabela 6 – Resultados de Pfe, K, Vm e Fcl para os dutos com raios externos de 50 mm nos cotovelos.

Seção Transversal	P _{ef} (Pa)	K (m ² /s)	V _m (m/s)	F _{cl}
Sem raio	47,8	1,19	4,77	56% / 44%
Raio de 10 mm	48,3	1,21	4,82	56% / 44%
Raio de 20 mm	52,8	1,36	4,99	57% / 43%

Fonte: Os autores

Tabela 7 – Perda de carga nos cotovelos dos dutos com raios externos de 50 mm.

Seção Transversal	ΔP (Pa) no Cotovelo		
	1	2	3
Sem raio	35,5	25,8	19,6
Raio de 10 mm	35,9	26,1	19,8
Raio de 20 mm	39,2	28,5	21,6

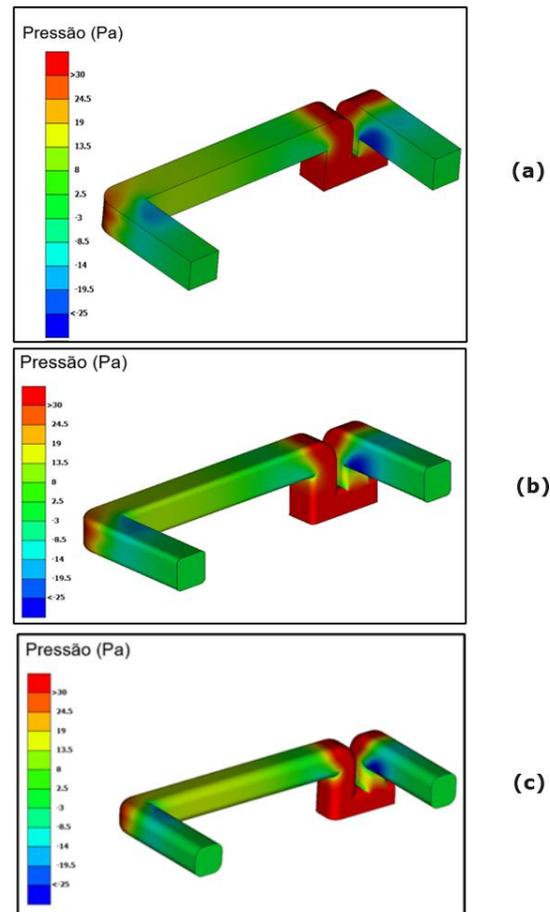
Fonte: Os autores

Analisando as tabelas 6 e 7, e a figura 21, observa-se que para a seção transversal do duto com raios externos de 50 mm nos cotovelos e com o raio de 20 mm na borda da seção transversal apresentou a maior perda de carga nos cotovelos 1, 2 e 3, quando comparado às outras seções transversais, necessitando de uma maior pressão de entrada e favorecendo o aumento da quantidade de ar pelo duto central.

A menor perda de carga observada foi para a seção transversal sem o raio de curvatura nas bordas. A curvatura no perfil favoreceu o aumento da energia cinética turbulenta e da pressão de entrada de forma gradual, a medida que aumentou o raio de curvatura no perfil da seção transversal.

Para a situação de raio externo de 50 mm no cotovelo, observa-se que a seção transversal retangular (sem presença de raio) apresentou melhores resultados de minimização dos efeitos de dissipação de energia na forma de pressão e cinética turbulenta.

Figura 21 – Pressão no duto com raio externo de 50 mm nos cotovelos e seções transversais sem raio (a), com raio de 10 mm (b) e raio de 20 mm (c).



Fonte: Os autores.

5.4 RESULTADOS DOS DUTOS COM RAIOS INTERNOS DE 15 MM.

Os resultados obtidos para o duto com raios internos de 15 mm são apresentados nas tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Resultados de Pfe, K, Vm e Fcl para os dutos com raios internos de 15 mm.

Seção Transversal	P _{ef} (Pa)	K (m ² /s)	V _m (m/s)	F _{cl}
Sem raio	36,8	0,84	4,59	55% / 45%
Raio de 10 mm	34,2	0,69	4,58	56% / 44%
Raio de 20 mm	37,1	0,77	4,77	56% / 44%

Fonte: Os autores.

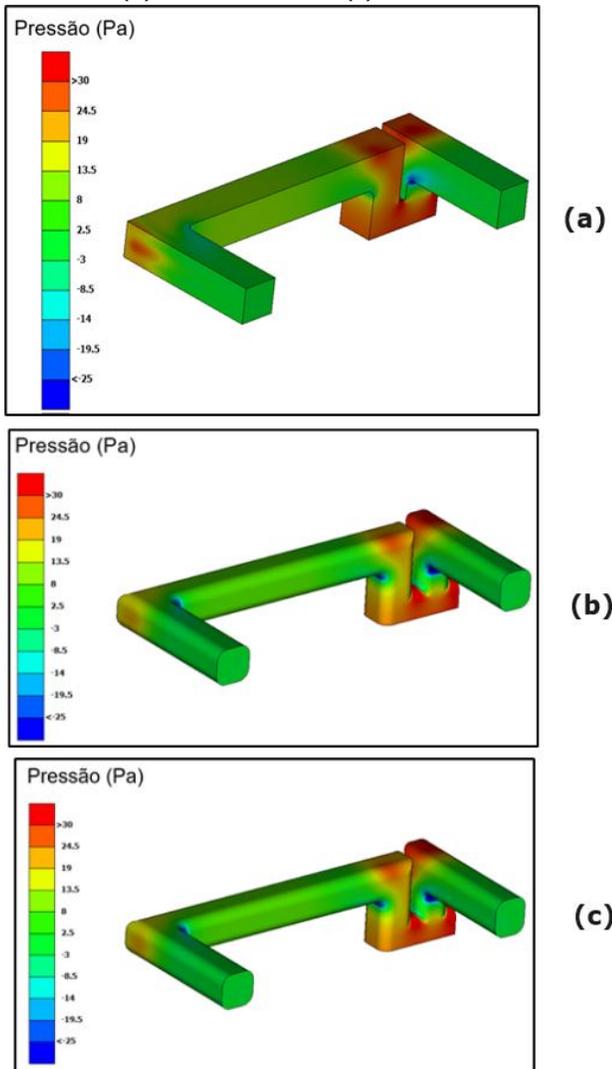
Tabela 9 – Perda de carga nos cotovelos dos dutos com raios internos de 15 mm.

Seção Transversal	ΔP (Pa) no Cotovelo		
	1	2	3
Sem raio	15,3	14,6	10,6
Raio de 10 mm	14,2	13,5	9,9
Raio de 20 mm	15,4	14,7	10,8

Fonte: Os autores

A figura 22 ilustra respectivamente, a distribuição de pressão no duto com raios internos de 15 mm nos cotovelos e com seções transversais sem raio, com raio de 10 mm e raio de 20 mm.

Figura 22 – Pressão no duto com raio externo de 50 mm nos cotovelos e seções transversais sem raio (a), com raio de 10 mm (b) e raio de 20 mm (c).



Fonte: Os autores

Analisando as tabelas 8 e 9, e a figura 22, observa-se que para a seção transversal do duto com raio interno de 15 mm e com o raio de 20 mm a perda de carga no cotovelo 1 foi maior, quando comparada às outras seções transversais, necessitando de uma maior pressão de entrada e favorecendo o aumento da quantidade de ar pelo duto central.

A menor perda de carga observada foi para o raio de 10 mm. A curvatura no perfil favoreceu a redução da energia cinética turbulenta e redução da pressão de entrada.

5.5 RESULTADOS DOS DUTOS COM RAIOS EXTERNOS DE 50 MM E INTERNOS DE 15 MM.

As seções precedentes conduziram análises de geometrias que estavam sujeitas à influência de raios internos ou externos nas curvaturas do duto, bem como à influência do raio na seção transversal. Portanto, é relevante examinar a influência dos parâmetros geométricos na perda de carga e outros fenômenos, em dutos que estão sujeitos às curvas internas e externas no duto de forma simultânea. Nesta seção, apresentamos os resultados obtidos para o duto com raios externos de 50 mm e internos de 15 mm, que estão detalhados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Resultados de P_{fe} , K , V_m e F_{cl} para os dutos com raios externos de 50 mm e interno de 15 mm nos cotovelos.

Seção Transversal	P_{ef} (Pa)	K (m^2/s)	V_m (m/s)	F_{cl}
Sem raio	33,8	0,69	4,59	55% / 45%
Raio de 10 mm	33,4	0,67	4,62	56% / 44%
Raio de 20 mm	36,7	0,74	4,83	56% / 44%

Fonte: Os autores

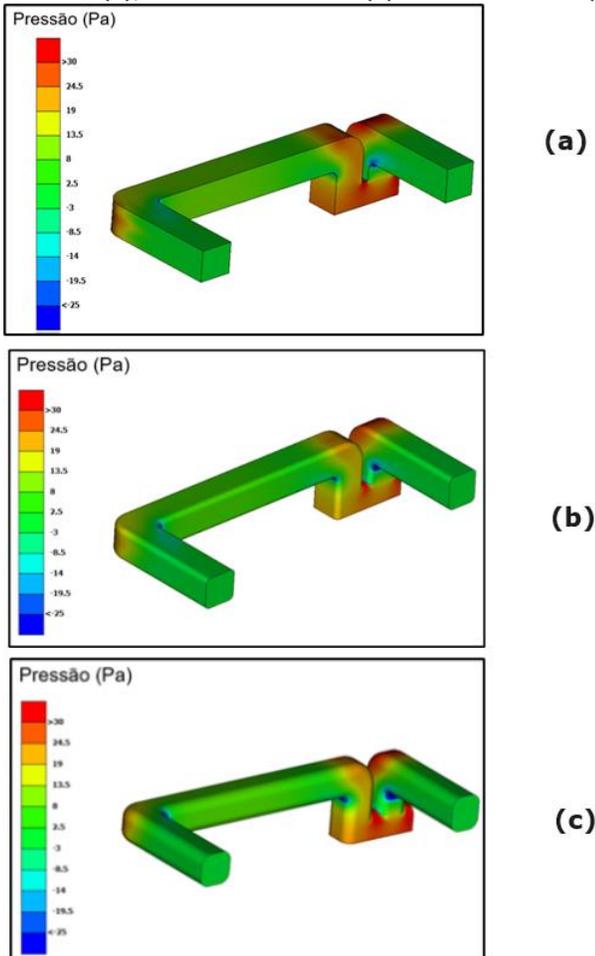
Tabela 11 – Perda de carga nos cotovelos dos dutos com raios externos de 50 mm e interno de 15 mm.

Seção Transversal	ΔP (Pa) no Cotovelo		
	1	2	3
Sem raio	13,3	13,5	9,0
Raio de 10 mm	13,1	13,4	8,8
Raio de 20 mm	14,4	14,7	9,7

Fonte: Os autores

A figura 23 ilustra respectivamente, a distribuição de pressão no duto com raios externo de 50 mm e internos de 15 mm nos cotovelos e com seções transversais sem raio, com raio de 10 mm e raio de 20 mm.

Figura 23 – Pressão no duto com raio externo de 50 mm e interno de 15 mm nos cotovelos e seções transversais sem raio (a), com raio de 10 mm (b) e raio de 20 mm (c).



Fonte: Os autores

Analisando as tabelas 10 e 11, e a figura 23, observa-se que para o duto com raio externo de 50 mm e interno de 15 mm a seção transversal com o raio de 20 mm foi a que apresentou a maior perda de carga, quando comparada às outras seções transversais, necessitando de uma maior pressão de entrada e favorecendo o aumento da quantidade de ar pelo duto central.

A menor perda de carga observada foi para o raio de 10 mm. A curvatura no perfil favoreceu a redução da energia cinética turbulenta e redução da pressão de entrada.

Observa-se que a expansão no raio, como no caso do raio de 20 mm, resultou na maior perda de carga

e o aumento da intensidade turbulenta no fluido, o que provoca o aumento do consumo de energia. Estes resultados sugerem que, para a geometria com raios externos de 50 mm e internos de 15 mm, um aumento na curvatura não necessariamente resulta em uma redução na variação de pressão em curvas.

5.6 RESULTADOS DOS DUTOS COM RAIOS EXTERNOS DE 100 MM E INTERNOS DE 30 MM.

Os resultados obtidos para o duto com raios externos de 100 mm e internos de 30 mm são apresentados nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Resultados de P_{fe} , K , V_m e F_{cl} para os dutos com raios externos de 100 mm e raio interno de 30 mm nos cotovelos.

Seção Transversal	P_{fe} (Pa)	K (m^2/s)	V_m (m/s)	F_{cl}
Sem raio	27,3	0,37	4,70	54% / 46%
Raio de 10 mm	27,9	0,39	4,77	54% / 46%
Raio de 20 mm	31,0	0,44	4,98	54% / 46%

Fonte: Os autores

Tabela 13 – Perda de carga nos cotovelos dos dutos com raios externos de 100 mm e raio interno de 30 mm.

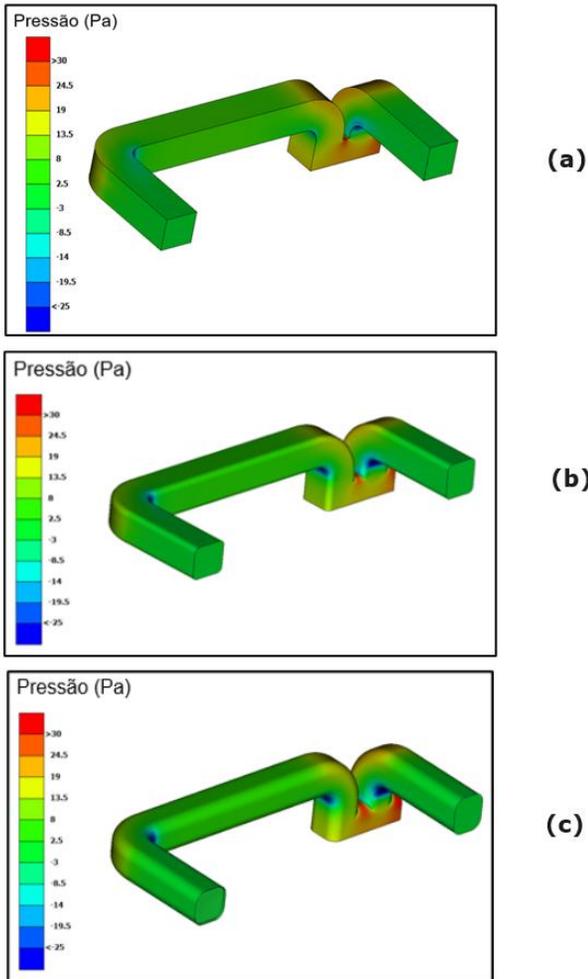
Seção Transversal	ΔP (Pa) no Cotovelo		
	1	2	3
Sem raio	7,7	7,3	3,1
Raio de 10 mm	7,9	7,4	3,2
Raio de 20 mm	8,8	8,3	3,5

Fonte: Os autores

A figura 24 ilustra respectivamente, a distribuição de pressão no duto com raios externo de 100 mm e internos de 30 mm nos cotovelos e com seções transversais sem raio, com raio de 10 mm e raio de 20 mm.

Analisando as tabelas 12 e 13, e a figura 24, observa-se que para o duto com raios externos de 100 mm e interno de 30mm nos cotovelos e com a seção transversal de raio de 20 mm na borda da seção transversal apresentou a maior perda de carga nos cotovelos 1, 2 e 3, quando comparado as outras seções transversais, necessitando de uma maior pressão de entrada e favorecendo o aumento da energia cinética turbulenta.

Figura 24 – Pressão no duto com raio externo de 100 mm e interno de 30 mm nos cotovelos e seções transversais sem raio (a), com raio de 10 mm (b) e raio de 20 mm (c).



Fonte: Os autores.

A menor perda de carga observada foi para a seção transversal sem o raio de curvatura nas bordas. A curvatura no perfil favoreceu o aumento da energia cinética turbulenta e da pressão de entrada de forma gradual, à medida que aumentou o raio de curvatura no perfil da seção transversal.

Para a situação de raio externo de 100 mm e interno de 30 mm no cotovelo, observa-se que a seção transversal retangular (sem presença de raio) apresentou melhores resultados de minimização dos efeitos de dissipação de energia na forma de pressão e cinética turbulenta.

5.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS DUTOS

Observando os resultados de pressão na face de entrada, é possível notar que o duto que apresentou a menor variação de pressão foi o duto com raios externos de 100 mm e internos de 30 mm.

A energia de turbulência em cada um dos dutos avaliados apresentou uma correspondência com os valores de pressão na face de entrada de forma que, no geral, quanto menor a pressão na face de entrada, menor a energia de turbulência medida na simulação. E isso está alinhado com as equações governantes da fluidodinâmica

Para a velocidade média dos dutos, pode-se observar que os dutos com a presença de raio interno são os que têm as menores velocidades, enquanto que a presença do raio externo e do chanfro tendem a aumentar a velocidade média no duto, visto que os mesmos causam uma restrição da passagem de ar ao reduzir o volume do duto, quando comparado com o duto retangular. Além disso, também é possível concluir que a presença dos filetes nas seções transversais faz com que a velocidade média aumente, visto que esses filetes reduzem a área de seção transversal.

Analisando o diferencial de pressão do sistema, a presença do chanfro no duto não foi eficaz quando comparado ao duto retangular. Considerando uma média dos resultados para os três diferentes tipos de seção transversal, o duto com chanfro teve um aumento de 9% na perda de carga, comparado com o duto retangular. Isso deve ao fato de que o chanfro causou uma restrição de passagem de ar muito grande na região dos cotovelos, de forma que o vórtice na parte interna ficasse maior do que os vórtices no duto retangular.

Já o duto com raios externos de 50 mm que tem a presença de um raio externo de 50 mm, apresentou uma pequena redução na perda de carga (Pa) quando comparado ao duto retangular, mesmo que a velocidade média no sistema tenha aumentado. Essa redução foi de aproximadamente 2%. Isso se deve ao fato de que o escoamento ficou mais organizado nas regiões externas no cotovelo e a região interna não foi prejudicada.

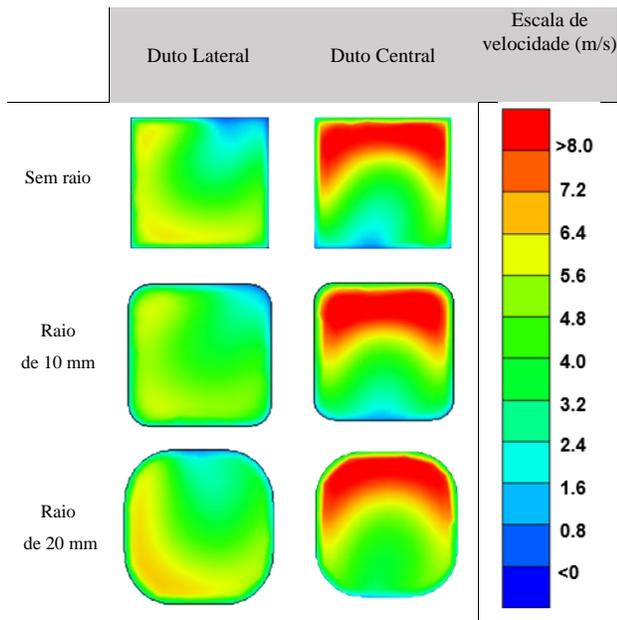
Já no duto com raios internos de 15 mm, percebe-se que a presença dos raios internos nos dutos mostrou uma efetividade na melhoria dos resultados muito maior do que a presença do raio e do chanfro externo, pois a inclusão do raio interno permite que o escoamento de ar se mantenha mais aderido à superfície. Isso representou uma melhoria de 27% no diferencial de pressão. Além disso, a velocidade média e a energia cinética de turbulência tiveram uma queda significativa. Vale

ressaltar que as condições de contorno utilizada em todos os modelos foram as mesmas, a única diferença entre os modelos é a geometria.

O duto com raios externos de 50 mm e internos de 15 mm, que contém a presença de raios internos e externos na região dos cotovelos teve resultados ainda melhores, de forma que o diferencial de pressão diminuiu em cerca de 4% quando comparado com o duto com raios internos de 15 mm e a energia cinética de turbulência também diminuiu. O que já era de se esperar, visto que a presença do raio externo no duto com raios externos de 50 mm e a presença do raio interno no duto com raios internos de 15 mm se mostraram eficazes.

Por fim, no duto com raios externos de 100 mm e internos de 30 mm, observa-se que tem a menor queda de pressão e a menor energia cinética de turbulência. Essa perda de carga teve uma redução média de 17% quando comparada com o duto com raios externos de 50 mm e internos de 15 mm. Ou seja, o aumento da dimensão dos raios internos e externos se mostrou eficaz.

Figura 25 – Distribuição de velocidade na saída do duto com chanfro.



Fonte: Os autores.

Além dos resultados já expostos, a figura 25, apresenta uma comparação gráfica da distribuição de velocidade em cada seção transversal na saída do duto com chanfro.

Analisando a figura 25, é possível notar que a seção transversal com raio de 20 mm não favorece

a homogeneidade do perfil de velocidade nas seções de saída.

5 CONCLUSÕES

A partir das análises CFD realizadas neste trabalho, podemos concluir que a geometria do duto de ar condicionado automotivo desempenha um papel fundamental na eficiência do sistema. Ao modificar certos parâmetros da geometria, como formato, tamanho e curvatura do duto, foi possível observar impactos significativos na redução da perda de carga e da turbulência.

A perda de carga, que é a diminuição da pressão do ar ao longo do duto, foi identificada como um fator que afeta diretamente o desempenho do sistema de ar condicionado. Por meio da otimização da geometria do duto, observamos uma redução na perda de carga, o que favorece um menor consumo energético do sistema e um melhor aproveitamento da potência disponível.

No presente trabalho foram realizadas simulação e análise em seis diferentes dutos sujeitos as mesmas condições iniciais, e observou-se que a menor variação de pressão na face de entrada e melhores resultados de minimização dos efeitos de dissipação de energia na forma de pressão e cinética turbulenta foi observada no duto com raios externos de 100 mm e raios internos de 30 mm.

Nos dutos com raios externos de 50 mm e interno de 15 mm, no duto com raios internos de 15 mm, e no duto retangular, a seção transversal que se mostrou mais eficiente foi aquela com um raio de 10 mm. Esta configuração permitiu uma organização do escoamento nas curvas, minimizando a intensidade turbulenta e proporcionando resultados mais favoráveis. No entanto, quando ocorreu o aumento do raio da seção transversal, os resultados não foram positivos. Para os raios de 20 mm, observou-se um aumento da energia cinética turbulenta, o que provocou um aumento da energia de pressão e as maiores perdas de carga. Portanto, conclui-se que a adição de raios nas seções transversais é favorável para a redução da perda de carga até um determinado ponto. Após esse limite, a perda de carga aumenta devido ao aumento da energia cinética da turbulência.

Foi possível concluir que para o presente estudo a presença de raios internos nas curvas dos dutos favorece o escoamento. Esses raios internos suavizam as mudanças na geometria, permitindo que o fluido se mantenha aderido às superfícies dos

duto, minimizando a formação de regiões de recirculação e turbulência. Isso resulta em uma redução nas perdas de pressão e melhora a eficiência do sistema, sendo que a presença de raios internos tem uma eficácia muito maior do que os raios externos. O modelo que teve a menor redução de queda de pressão foi exatamente aquele que tinha o maior raio interno nas regiões de cotovelo.

Além disso, a seção transversal do duto também tem influência sobre os resultados, de forma que uma área de seção transversal maior favorece para uma menor perda de carga, sendo assim o incremento de filetes na seção transversal original não apresentou melhora nos resultados.

Já os dutos com chanfro, com raios externos de 50 mm e raio externo de 100 mm e interno de 30 mm, tiveram melhores resultados com a seção transversal sem raio. A presença dos raios de 10 e 20 mm aumentaram a intensidade turbulenta o que ocasionaram o aumento da perda de carga. Para os dutos com raio externo, observou-se que a perda de carga aumentava proporcionalmente ao aumento do raio da seção transversal.

Já a redução da turbulência no escoamento de ar também proporcionou benefícios adicionais. A turbulência gera perdas de energia e faz com que a variação de pressão no sistema aumente, tanto é que os modelos com as menores energias de turbulência foram aqueles que também tinham a menor variação de pressão.

Finalmente, por meio do uso de simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), é possível avaliar o desempenho do sistema de maneira precisa e eficiente. Isso permite otimizações no projeto com o objetivo de alcançar maior eficiência energética, reduzir as perdas de carga e melhorar a distribuição do fluxo do ar condicionado. Portanto, pode-se concluir que os parâmetros geométricos dos dutos causam variação na perda de carga. Para reduzir a perda de carga, é apropriado adicionar um raio interno às curvas, a fim de suavizar o fluxo. Quando este é associado a um raio externo, a perda de carga é menor e o duto se torna mais eficiente.

REFERÊNCIAS

- [1] SOUZA, Samuel Reis. Análise CFD de um duto de ar condicionado de painel de instrumento automotivo. Trabalho de Conclusão de curso. Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, UFBA. Salvador, 2023.
- [2] BANDEIRA, F.J.S., GONÇALVES, G.F.N., LOUREIRO, J.B.R. et al. **Turbulence and Bubble Break up in Slug Flow with Wall**

Injection. Flow Turbulence Combust 98, 923–945 (2017).

- [3] KORAY KARABULUT, **The effects of rectangular baffle angles and heights on heat transfer and pressure drop performance in cross-triangular grooved rectangular flow ducts**, International Journal of Heat and Fluid Flow, Volume 105, 2024.
- [4] BARMAK, Ilya. PICCHI, Davide. GELFGAT, Alexander. and BRAUNER, Neima. **Flow of a shear-thinning fluid in a rectangular duct.** Physical Review Fluids, 2024
- [5] ABBAS J.S. Al-Lami, EUGENY Y. Kenig, **New pressure drop and heat transfer correlations for turbulent forced convection in internally channeled tube heat exchanger ducts**, Case Studies in Thermal Engineering, Volume 54, 2024.
- [6] ASAKO, Y., HONG, C., YAMAGUCHI, Y., FAGHRI, M., Tan, L. K., & SIDIK, N. A. C. **Physically Realistic Inlet-Velocity Profiles in Duct Flows.** Heat Transfer Engineering, 1–12. 2024.
- [7] PUTRA, R. P., SUTARDI, WIDODO, W. A., YUVENDA, D., LAPISA, R., K., A., KRISMADINATA, & HARMANTO, D. (2024). **Experimental investigation of turbulent flow through a square-sectioned duct and 90° square elbow by using circular turbulator.** EUREKA: Physics and Engineering, (2), 45-54.
- [8] CLARK Catherine E., RASIMARZABADI Faezeh, ABO Hamza el Ella, BRETON Hugo, CHIKHAOUI Ines and ZINGG David W.. **S-Duct with Boundary Layer Ingestion: Geometry Optimization and Validation.** AIAA SCITECH 2024 Forum. 2024.
- [9] BICALHO, G. I., HANRIOT, S. M., MAIA, C. B., & CABEZAS-GÓMEZ, L. **Assessment of the Fluid Dynamics Aspects of a Vehicle Ventilation System.** International Journal of Ventilation, 14(1), 65–76. (2015).
- [10] BICALHO, G. I. **“Aumento da eficiência do ar condicionado veicular pela melhoria do sistema de ventilação”**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2009
- [11] GAZIOLLA & GOMES. **Sistema de Climatização Automotivo**, Trabalho de

Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de tecnologia FATEC, Santo André, 2010.

- [12] KITADA Motohiro, ASANO Hideo, KANBARA Masahiro, AKAIKE Shigeru. **Development of automotive air-conditioning system basic performance simulator: CFD technique development**, JSAE Review, Volume 21, Issue 1, 2000.
- [13] LIBIN Tan e YUEJIN Yuan. **Computational fluid dynamics simulation and performance optimization of an electrical vehicle Air-conditioning system**, Alexandria Engineering Journal, Volume 61, Issue 1, 2022.
- [14] PANAGIOTIDOU, Marianna. **Optimization of Vehicle Air Duct Geometry**, National Technical University Of Athens, School Of Mechanical Engineering, Athens, 2019.
- [15] WAREY Alok, KAUSHIK Shailendra, KHALIGHI Bahram, CRUSE Michael, VENKATESAN Ganesh. **Data-driven prediction of vehicle cabin thermal comfort: using machine learning and high-fidelity simulation results**. International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 148, 2020.
- [16] LIZAL F, PECH O, JEDELSKY J, TUHOVCAK J, JICHA M. **The automotive ventilation test case: Investigation of the velocity field downstream of a benchmark vent using smoke visualization and hot-wire anemometry**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2019.
- [17] ALSALEEM, Sulaiman Mohammed. A **Computational Fluid Dynamics (Cfd) Analysis Of Developing Turbulent Flow In Straight Ducts**, Master's thesis, Texas A & M University. 2017
- [18] CARMIGNAN NETO, Dionisio. **Análise Numérica de um Sistema de Ventilação Automotivo**, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011
- [19] HE, Jiahao. **Design and Optimization of Automotive Air Conditioning Duct Based on CFD Algorithm**. Journal of Physics Conference Series. 2022.
- [20] OLLEH, N, HUSAIN, NA, KAMAR, HM, KAMSAH, NB & IDRUS ALHAMID, M,. **'Outlets airflow velocity enhancement of an automotive hvac duct'**, Evergreen, vol. 8, no. 1, pp. 163-169. 2021.
- [21] DALY, Steven; **Automotive Air Conditioning and Climate Control Systems**, Elsevier, 2006.