

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEMEC - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO NOBRE FRANCO BORRASCA

**PROJETO CONCEITUAL E ANÁLISE DE FLUXO DE UM  
ABAFADOR VALVULADO.**

SÃO CARLOS  
2024

BRUNO NOBRE FRANCO BORRASCA

**PROJETO CONCEITUAL E ANÁLISE DE FLUXO DE UM  
ABAFADOR VALVULADO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao DEMec -  
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta

SÃO CARLOS  
2024



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905  
Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 12/2024/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

BRUNO NOBRE FRANCO BORRASCA

PROJETO CONCEITUAL E ANÁLISE DE FLUXO DE UM ABAFADOR VALVULADO.

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 09 de fevereiro de 2024

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Alexandre Tácito Malavolta
Membro da Banca 1	Anderson Antonio Ubices de Moraes
Membro da Banca 2	Flávio Yukio Watanabe



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Tácito Malavolta, Docente**, em 09/02/2024, às 17:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Anderson Antonio Ubices de Moraes, Docente**, em 09/02/2024, às 17:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Flavio Yukio Watanabe, Docente**, em 09/02/2024, às 17:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1354515** e o código CRC **64CC0F27**.



A minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais Hideraldo e Franceli e minha irmã Isabella, por sempre me incentivarem a estudar e compreensão e suporte nos momentos mais difíceis da graduação. Sem eles, eu não teria essa oportunidade de formação acadêmica.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta, pela paciência, confiança e direcionamentos durante todo este trabalho. Um agradecimento a todos que contribuíram, direta e indiretamente, para a realização deste trabalho.

## RESUMO

No mundo automotivo o ruído que é emitido pelo escapamento dos veículos a combustão tem grande importância no seu projeto, podendo ser voltado a performance com alcance de mais decibéis e um fluxo mais livre, melhorando o rendimento do veículo em carros esportivos, ou em automóveis voltados ao uso do cotidiano e familiar, um ronco mais abafado, com menos decibéis é o mais desejado para o projeto. Pensando nisso o ramo automobilístico, principalmente de alta performance, criou o abafador valvulado, o qual será o tema desse trabalho. Este tem como principal benefício a alteração das características acústicas do sistema de exaustão em apenas um apertado de botão, alterando completamente a experiência do usuário com o automóvel, tornando um esportivo mais usável no cotidiano com as válvulas fechadas com a diminuição do som emitido pelo mesmo, ou o aumento do som, abrindo as válvulas, seja em algum evento específico ou apenas pela experiência sonora. O objetivo desse trabalho será a realização do projeto conceitual de um abafador valvulado com dimensões próximas aos abafadores convencionais oferecidos no mercado sem esse dispositivo. Para isso foi utilizado de software CAD NX *Siemens* para o desenho do abafador em 3D e posteriormente a realização do estudo dos fluxos de gases em seu interior. Os resultados obtidos indicam que o uso de uma válvula interna para a alteração do caminho a ser percorrido pelos gases de exaustão pode aumentar a restrição quando a válvula se encontra fechada, diminuindo o som do veículo, ou, quando aberta, torna o fluxo livre dos gases, melhorando a performance do automóvel e aumentando o som emitido pelo sistema de escape.

Palavras-chave: abafador; abafador valvulado; escapamento.

## **ABSTRACT**

In the automotive world, the noise emitted by the exhaust of combustion vehicles is of great importance in its design. It can be focused on performance, achieving more decibels and a freer flow, thereby improving the vehicle's efficiency in sports cars. On the other hand, for everyday and family use, a muffled sound with fewer decibels is more desirable for the project. Considering this, the automotive industry, especially in high-performance vehicles, introduced the valved muffler, which is the topic of this work. The main benefit of this type of muffler is the alteration of the acoustic characteristics of the exhaust system with just the push of a button, completely changing the user's experience with the vehicle. It makes a sports car more usable in daily life with the valves closed, reducing the emitted sound, or enhancing the sound by opening the valves, either for a specific event or for the auditory experience. The objective of this work is to carry out the conceptual design of a valved muffler with dimensions similar to conventional mufflers available in the market without this device. For this purpose, Siemens NX CAD software was used for the 3D design of the muffler, followed by the study of gas flows inside it. The results indicate that the use of an internal valve to alter the path of the exhaust gases can increase restriction when the valve is closed, reducing the vehicle's sound. Conversely, when open, it allows for a free flow of gases, improving the vehicle's performance and increasing the sound emitted by the exhaust system.

Keywords: exhaust system; muffler; valvetronic exhaust.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Réplica do automóvel criado por Karl Benz. . . . .	14
Figura 2 – Abafador valvulado fornecido pela Porsche. . . . .	15
Figura 3 – Sistema de escape completo. . . . .	19
Figura 4 – Motor a combustão. . . . .	20
Figura 5 – Abafador ressonador. . . . .	21
Figura 6 – Abafador de câmaras. . . . .	21
Figura 7 – Abafador com tubos internos perfurados. . . . .	22
Figura 8 – Simulação da pressão de contorno no abafador. . . . .	25
Figura 9 – Simulação da velocidade de contorno dos gases. . . . .	25
Figura 10 – Análise da pressão de contorno. . . . .	26
Figura 11 – Análise da velocidade de contorno. . . . .	26
Figura 12 – Fluxograma metodologia. . . . .	27
Figura 13 – Projeto do abafador valvulado. . . . .	28
Figura 14 – Tubo de entrada do abafador projetado. . . . .	28
Figura 15 – Válvula fechada e aberta. . . . .	28
Figura 16 – Estrutura interna do abafador. . . . .	29
Figura 17 – Estrutura interna do abafador. . . . .	29
Figura 18 – Volume interno do abafador. . . . .	30
Figura 19 – Abafador com malha de 3 e 5 mm. . . . .	31
Figura 20 – Volume interno - Corte transversal. . . . .	32
Figura 21 – Velocidade e pressão - Simulação número 1 . . . . .	34
Figura 22 – Velocidade e pressão - Simulação número 2 . . . . .	35
Figura 23 – Velocidade e pressão - Simulação número 3 . . . . .	35
Figura 24 – Velocidade e pressão - Simulação número 4 . . . . .	36
Figura 25 – Velocidade e pressão - Simulação número 5 . . . . .	36
Figura 26 – Velocidade e pressão - Simulação número 6 . . . . .	36
Figura 27 – Velocidade e pressão - Simulação número 7 . . . . .	37
Figura 28 – Velocidade e pressão - Simulação número 8 . . . . .	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites máximos de emissão de ruído para veículos automotores. . . .	23
Tabela 2 – Propriedades do ar. . . . .	31
Tabela 3 – Número de nós e elementos por simulação. . . . .	31
Tabela 4 – Simulações realizadas. . . . .	32
Tabela 5 – Resultados obtidos de velocidade e pressão . . . . .	33
Tabela 6 – Perda de transmissão . . . . .	35

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CAD	Desenho Assistido por Computador

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Gamma$	Letra grega Gama
$\lambda$	Comprimento de onda
$\in$	Pertence
$dB$	Decibel
$p$	Pressão sonora
$\rho$	Densidade do meio
$c$	Velocidade do som
$\mathcal{U}$	Deslocamento da partícula
$\partial t$	Período de tempo
$I_0$	Intensidade de referência
$I$	Intensidade sonora da fonte
$TL$	Perda de transmissão
$P_i$	Pressão de entrada
$P_o$	Pressão de saída
$f$	Frequência
$IL$	Perda de inserção
$NR$	Redução de ruído
$P_i$	Pressão inicial
$P_o$	Pressão final

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
2.1 Fundamentos básicos da acústica	17
2.2 Sistema de Escape	19
2.3 Modelos de abafadores:	21
2.4 Legislação vigente e forma de medição	23
2.5 Avaliação de desempenho acústico de abafadores	24
<b>3 – METODOLOGIA</b>	<b>27</b>
3.1 Projeto conceitual	27
3.2 Modelo de elementos finitos	30
3.2.1 Carregamentos e condições de contorno	31
<b>4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>33</b>
<b>5 – CONCLUSÃO</b>	<b>38</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>39</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A fabricação do primeiro automóvel que se tem conhecimento foi no ano de 1886 por Karl Benz, sua empresa Benz-Patent Motorwagen fabricava um veículo o qual possuía um motor monocilíndrico de quatro tempos com 954 cilindradas, o qual fornecia “impressionantes” 0,75 CV a 400 rpm conforme pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Réplica do automóvel criado por Karl Benz.



Fonte: Esporte (2023)

Desde então o homem tem uma relação de interesse e busca na melhoria do mesmo, seja aumentando sua performance, diminuindo o consumo de combustível ou melhorando seu conforto interno, com novas tecnologias sendo aplicadas a cada novo modelo que foi lançado ao longo do tempo.

Atualmente, o mercado possui uma gama diversa com grande diversidade de modelos e tipos de carroceria, como sedan, hatch, coupé, peruas, suvs, caminhonetes entre tantas outras variantes, somando a isso o uso de diversos combustíveis, como gasolina, álcool, diesel e atualmente a chegada de carros híbridos e elétricos de forma mais intensa no cenário automobilístico.

Um segmento que vem chamado o interesse de grandes montadoras, é o mercado de esportivos, marcas como Audi, Bentley, Bmw, Ferrari, Porsche, Lamborghini, McLaren, Aston Martin dentre outras, disputam em um mercado de alto valor agregado, em que cada detalhe que possa se diferenciar de outra montadora tem uma grande importância, seja no acabamento dos materiais utilizados, motorização, freios, ajustes eletrônicos e eficiência do veículo.

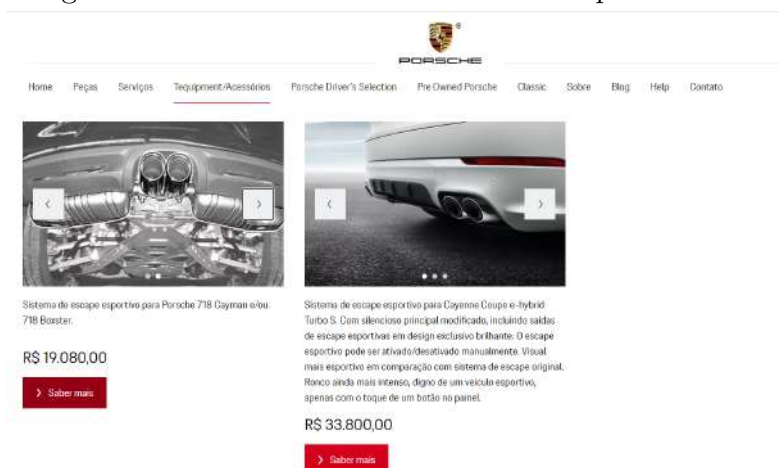
Nesse sentido, montadoras que atuam nesse segmento, têm buscado formas de

oferecer uma experiência diferente aos seus clientes durante o uso dos seus produtos, dentre elas, uma que vem se destacando é o som fornecido pelo sistema de escape de cada automóvel, porém algumas dificuldades têm sido encontradas nesse processo, dentre elas pode-se considerar o fato de que em um mesmo sistema de escapamento, é necessário oferecer um ronco alto para que o cliente possa ouvir e interagir com o veículo em um autódromo ou em algum uso severo, e em paralelo precisa ser silencioso durante o uso no cotidiano, ou quando o proprietário desejar um som mais baixo, seja para entrar em um estacionamento, andar na cidade ou viajar longas distâncias.

A opção encontrada no mercado *aftermarket* foi o uso dos difusores, estes vem ganhando mercado, por ser uma opção mais econômica, porém apresenta diversos problemas com o uso prolongado do sistema que impede que seja implementado no mercado pelas próprias montadoras. Dentre eles podemos citar o fato do difusor ficar normalmente posicionado logo após o catalisador do veículo, sendo assim o barulho sonoro será alto e acaba passando vibração para a cabine do automóvel, somando a isso, o aquecimento do assoalho é outro fator que agrava a segurança do sistema, uma vez que os gases do escapamento são direcionados para um local em baixo da cabine o qual não foi projetado para receber a quantidade de calor fornecida pelo sistema. Agravando o sistema, devido as altas temperaturas encontradas no sistema de escape logo após o catalisador. Somando-se a esse fator, é comum que o motor elétrico utilizado nesse tipo de solução acabe travando e impossibilitando sua função como um todo, necessitando a troca do mesmo para solução.

A solução encontrada pelas montadoras foi a criação de sistemas de escapamento valvulados, os quais possibilitam a escolha do cliente na altura do som emitido pelo veículo, entretanto o mesmo apresenta alguns problemas relacionados ao custo de produção, hoje no ano de 2023, é possível verificar a venda desse sistema por valores entre R\$20000,00 a R\$35000,00 como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Abafador valvulado fornecido pela Porsche.



Fonte: Porsche (2023)

Este trabalho visa primariamente desenvolver um projeto conceitual de um abafa-

dor valvulado por meio de software CAD, apresentando uma estrutura simplificada em comparação aos modelos atualmente adotados pelas montadoras. O propósito é superar as limitações associadas ao uso de difusores, buscando soluções que possam ser validadas por simulações utilizando elementos finitos. Dessa forma, pretende-se oferecer uma alternativa viável para a implementação desse tipo de equipamento em veículos de menor valor agregado. Entre as premissas fundamentais do projeto, destacam-se:

- Possibilitar ao proprietário do veículo a escolher o nível desejado de som em relação ao sistema de exaustão.
  - Garantir que não ocorram alterações nas emissões de gases tóxicos com a introdução do novo sistema.
-



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são abordados aspectos essenciais, como fundamentos básicos da acústica, sistemas de escape, modelos de abafadores automotivos, legislação vigente e métodos de medição. Cada um desses tópicos desempenha um papel crucial na compreensão e avaliação do desempenho acústico de abafadores veiculares.

Iniciar com uma revisão abrangente dos princípios fundamentais da acústica fornecerá uma base sólida para explorar as especificidades relacionadas aos sistemas de escape automotivos. Em seguida, a discussão se aprofundará nos diversos modelos de abafadores existentes, destacando suas características e impacto na redução de ruído.

A análise da legislação vigente será um ponto relevante, uma vez que as normativas governamentais desempenham um papel crucial na determinação dos padrões de emissão de ruído para veículos automotores. Essa seção fornecerá um contexto regulatório importante para avaliar o desempenho acústico dos abafadores, considerando as exigências legais em vigor.

Posteriormente, o foco se deslocará para os métodos de medição, delineando as ferramentas e técnicas utilizadas para avaliar objetivamente o desempenho acústico dos abafadores automotivos. Esta seção preparará o terreno para a discussão detalhada sobre a avaliação de desempenho, que encerrará o capítulo.

### 2.1 Fundamentos básicos da acústica

A acústica no âmbito da engenharia mecânica, é uma disciplina crucial, especialmente ao considerar o *design* e a avaliação de sistemas sonoros em veículos automotivos. Nesta revisão bibliográfica, é explorado de maneira mais detalhada os fundamentos da acústica, incluindo a natureza do som, sua propagação, a unidade de medida decibel ( $dB$ ), as faixas de frequência audíveis pelos humanos e as técnicas de medição aplicadas em automóveis.

Rossing e Fletcher (2019) definem o som como sendo uma onda mecânica, caracterizada pela compressão e rarefação do meio através do qual se propaga.

A equação da onda acústica, expressa a relação entre a pressão sonora ( $p$ ), a densidade do meio ( $\rho$ ), a velocidade do som ( $c$ ), o deslocamento da partícula ( $\mathcal{U}$ ) e o período ( $\partial t$ ).

$$p = \rho c \frac{\partial \mathcal{U}}{\partial t} \quad (1)$$

Essa equação descreve como as variações na pressão causam perturbações que se propagam como ondas sonoras.

Já em relação a propagação do som, Rossing e Fletcher (2007) descrevem que estas envolvem a transmissão de ondas longitudinais, governadas pela equação de onda acústica. Esta equação descreve como as variações de pressão se propagam ao longo do espaço ( $x$ ) e do tempo ( $t$ ).

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2)$$

Fatores como o *design* do escapamento do veículo e as características dos materiais afetam a propagação do som no ambiente automotivo.

Ainda nesse sentido, se tratando da natureza do som Kinsler, Frey e Coppens (1999) explicam a unidade logarítmica decibel ( $dB$ ), o qual quantifica a potência sonora comparando a uma potência de referência ( $I_0$ ). Nessa equação o ( $I$ ) representa a potência sonora da fonte e ( $I_0$ ) potência mínima capaz de ser ouvida pelo ser humano.

$$dB = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

Essa escala logarítmica permite a representação de uma ampla gama de intensidades sonoras, sendo essencial na análise e ajuste de sistemas de áudio em automóveis.

Outro ponto de extrema importância no projeto de uma abafador automotivo é referente a Transmission Loss ( $TL$ ) um indicador crucial para avaliar o desempenho de um silenciador. No projeto do silenciador, é essencial considerar não apenas o desempenho acústico, mas também fatores como volume, custo de fabricação e a influência no desempenho global do motor. Ao identificar os parâmetros estruturais significativos do silenciador, é possível maximizar a  $TL$  sem comprometer o desempenho global do motor, resultando na redução do ruído de escape.

Fu *et al.* (2021) evidência que o desempenho do silenciador pode ser avaliado pelo Transmission Loss ( $TL$ ) causada por fenômenos complexos de propagação (reflexão e dissipação) no silenciador. Alguns parâmetros de *design* da perda de transmissão incluem número de furos, distribuição dos furos e espaçamento das chapas internas do abafador. Ao ajustar esses parâmetros destacados, o ( $TL$ ) pode ser significativamente aumentada. Nessa equação temos ( $P_i$ ) como sendo a pressão inicial e ( $P_o$ ) como pressão final no tubo.

$$TL = 20 \log_{10} \frac{P_i}{P_o} \quad (4)$$

O tubo perfurado é uma parte importante do sistema do silenciador. Ele pode reduzir o nível de potência da fonte de ruído produzida pelo fluido, desta forma o uso de defletores em silenciadores de escape pode melhorar suas perdas de transmissão (SOHEI; TSUYOSHI; TAKASHI, 2006).

Elsayed *et al.* (2017) estudaram a influência do tamanho dos defletores internos do silenciador com a variação da  $TL$  e contra pressão do silenciador, e apontaram que aumentar o tamanho do defletor pode aumentar a contra pressão e reduzir a  $TL$  de pico

para uma baixa frequência. Comparado com um único furo central, aumentar o número de furos no defletor reduzirá a  $TL$ . No entanto, vários furos são mais benéficos para reduzir a contra pressão. Nas regiões de frequência intermediária e alta, a redução do espaçamento do defletor pode melhorar a perda de transmissão.

Na aplicação prática, o desempenho global, o volume e o custo de fabricação dos motores a combustão interna devem ser levados em consideração. Portanto, às vezes, ajustar os parâmetros de *design* mais influentes é benéfico para maximizar o  $TL$  do silenciador.

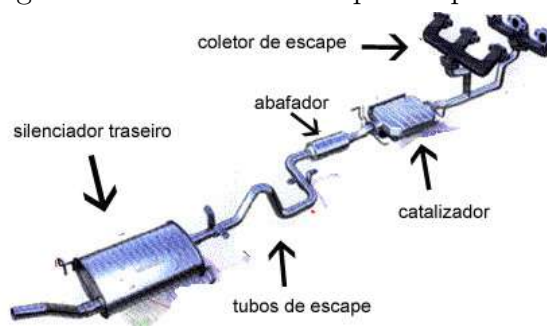
Já Moore (2012) evidência que a faixa audível para o ouvido humano, é de aproximadamente de 20 Hz a 20 kHz. A relação conecta a frequência ( $f$ ), o comprimento de onda ( $\lambda$ ), e a velocidade do som ( $c$ ), permitindo ajustes precisos para garantir uma experiência auditiva agradável no interior do veículo.

$$c = f\lambda \quad (5)$$

## 2.2 Sistema de Escape

O sistema de escape completo contendo coletores, catalisadores, abafadores e tubos conforme Figura 3 desempenha um papel crítico ao coletar e direcionar os gases de combustão para fora do motor. Essa função é imperativa para preservar a integridade do motor, evitando danos causados pelos gases quentes e prejudiciais que, se não removidos, poderiam comprometer o desempenho e a durabilidade do motor.

Figura 3 – Sistema de escape completo.



Fonte: Riviera (2020)

Os motores a combustão, notáveis pela sua versatilidade e papel vital em diversas aplicações, são mecanismos complexos que convertem a energia química dos combustíveis em energia mecânica. Neste contexto, uma revisão bibliográfica abrangente se faz necessária, focando nos motores de quatro tempos e na crucial importância do sistema de escape.

Como definido em Heywood (1998), o motor a combustão é uma sofisticada máquina térmica que converte a energia liberada pela combustão de combustíveis em energia mecânica. Este processo envolve a admissão de uma mistura ar-combustível,

Figura 4 – Motor a combustão.



Fonte: Guerra (2017)

compressão, ignição e exaustão, resultando em movimento linear que é transformado em movimento rotativo.

Os motores de quatro tempos, também conhecidos como motores ciclo Otto conforme Figura 4, são configurações comuns em veículos automotores. Cada um dos quatro ciclos (admissão, compressão, combustão e exaustão) desempenha um papel crucial no processo de combustão, culminando no movimento rotativo necessário para a propulsão.

Primeramente em relação ao direcionamento dos gases oriundo da combustão do combustível, o sistema de escape desempenha um papel crítico ao coletar e direcionar os gases de combustão para fora do motor. Essa função é imperativa para preservar a integridade do motor, evitando danos causados pelos gases quentes e prejudiciais que, se não removidos, poderiam comprometer o desempenho e a durabilidade do motor.

Já em relação a eficiência volumétrica o *design* do sistema de escape contribui diretamente para a eficiência volumétrica do motor. Melhorando a aspiração de ar, otimiza-se a queima de combustível, resultando em maior eficiência global do motor e, por conseguinte, um desempenho aprimorado.

Em paralelo, o sistema de escape auxilia na redução das emissões de gases tóxicos. Em sintonia com as crescentes preocupações ambientais, os sistemas modernos de escape incorporam catalisadores. Esses dispositivos convertem gases poluentes, como óxidos de nitrogênio e monóxido de carbono, em substâncias menos nocivas, contribuindo assim significativamente para a redução de emissões.

Por fim, como uma das principais funções temos a atenuação de ruídos. O sistema de escape incorpora estratégias para minimizar o ruído gerado durante a combustão como mostrado no estudo de Rocha (2011), materiais de isolamento acústico e câmaras de ressonância são meticulosamente projetados para proporcionar um ambiente mais silencioso para os ocupantes do veículo, atendendo simultaneamente às regulamentações de ruído.

### 2.3 Modelos de abafadores:

Os abafadores desempenham um papel crucial nos sistemas de escape de motores a combustão, influenciando não apenas o desempenho acústico, mas também características de desempenho. Nesta revisão bibliográfica, serão explorados os principais modelos de abafadores, suas diferenças e as distinções entre abafadores esportivos e convencionais.

Os abafadores ressonadores são concebidos para minimizar ruídos específicos em frequências determinadas, sua geometria pode ser verificada na Figura 5. Esses dispositivos são comumente empregados para eliminar ressonâncias indesejadas no sistema de escape, promovendo assim uma aprimorada qualidade sonora.

Figura 5 – Abafador ressonador.



Fonte: Luzian (2022)

Abafadores de câmara, apresentam uma geometria específica conforme Figura 6, este modelo faz uso de câmaras internas e materiais absorventes para reduzir o som. Esses modelos demonstram eficácia na atenuação de ruídos de baixa frequência, contribuindo para a obtenção de um tom mais profundo.

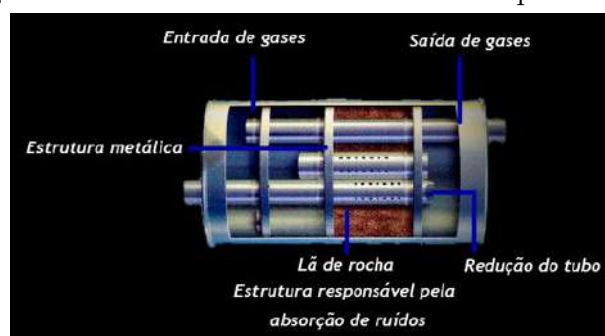
Figura 6 – Abafador de câmaras.



Fonte: Ohop (2022)

Os abafadores que incorporam tubos perfurados ou materiais perfurados como pode ser verificado na Figura 7 empregam essa característica para permitir a passagem dos gases por meio de pequenos orifícios, resultando na redução do ruído. Esses modelos são amplamente encontrados em abafadores esportivos, onde a eficiência na gestão do fluxo de gases e a minimização do som são elementos essenciais para melhorar o desempenho acústico do sistema de escape. A presença de perfurações proporciona uma abordagem específica para controlar a emissão sonora, destacando a aplicação prática desses abafadores em contextos automotivos voltados para o desempenho esportivo.

Figura 7 – Abafador com tubos internos perfurados.



Fonte: Car (2023)

Pode-se verificar a diferença entre os modelos principalmente em relação a duas características, eficiência acústica e desempenho. Abafadores ressonadores são eficazes na eliminação de frequências específicas, enquanto abafadores de câmara tendem a oferecer uma atenuação mais ampla. Abafadores perforados e tubo perfurado, por sua vez, são conhecidos por proporcionar um som mais agressivo e esportivo. A eficiência do sistema de escape pode ser influenciada pelos diferentes modelos. Alguns abafadores podem proporcionar melhor fluxo de gases, resultando em um desempenho aprimorado do motor.

Os abafadores esportivos, concebidos para aprimorar o desempenho e proporcionar um som mais esportivo, conforme abordado por Blair (2015) em seu trabalho sobre a ciência do som na engenharia esportiva, frequentemente incorporam *designs* perfurados. Esses projetos são estrategicamente orientados para priorizar dois objetivos principais: o aumento do fluxo de gases no sistema de escape e a criação de um som mais agressivo e distintivo.

A utilização de *designs* perfurados nesses abafadores visa otimizar a eficiência na gestão do fluxo de gases, contribuindo para uma melhor resposta do motor. Simultaneamente, a presença de perfurações desempenha um papel significativo na modulação do som, resultando em uma nota mais esportiva e marcante. Assim, esses abafadores não apenas buscam melhorar o desempenho do veículo, mas também proporcionar uma experiência auditiva que reflita a natureza esportiva e agressiva associada a esse tipo de configuração.

Já os abafadores convencionais, como discutido por Heywood (1988) em seu trabalho sobre os fundamentos de motores de combustão interna, têm como principal

ênfase a atenuação do ruído e a conformidade com regulamentações ambientais. Esses dispositivos frequentemente adotam um *design* mais restritivo, buscando reduzir os níveis de som gerados pelo sistema de escape.

#### 2.4 Legislação vigente e forma de medição

Conforme a resolução Número 272 de 14 de setembro do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (2000) a qual se encontra presente na Tabela 1 a emissão de ruído para veículos a combustão deverá atender os seguintes limites de dB:

Tabela 1 – Limites máximos de emissão de ruído para veículos automotores.

CATEGORIA		NÍVEL DE RUÍDO - dB(A)			
DESCRIÇÃO		OTTO	DIESEL		
			Injeção		
			Direta	Indireta	
a	Veículo de passageiros até nove lugares	74	75	74	
b	Veículo de passageiros com mais de nove lugares PBT até 2.000 kg	76	77	76	
	Veículo de carga ou de tração e veículo de uso misto PBT entre 2.000 kg e 3.500 kg	77	78	77	
c	Veículo de passageiro ou de uso misto com PBT maior que 3.500 kg	Potência máxima menor que 150kW (204 cv)	78	78	78
		Potência máxima igual ou superior a 150 kW (204 cv)	80	80	80
d	Veículo de carga ou de tração com PBT maior que 3.500 kg	Potência máxima menor que 75 kW (102 cv)	77	77	77
		Potência máxima entre 75 kW (102 cv) e 150 kW (204 cv)	78	78	78
		Potência máxima igual ou superior a 150 kW (204 cv)	80	80	80

Fonte: Conselho Nacional do Meio Ambiente (2000)

Diversos métodos podem ser empregados para medir as propriedades sonoras do fluxo durante o projeto desses silenciadores.

Os principais parâmetros analisados durante o projeto de silenciadores incluem a perda de inserção (*IL*) que pode ser definida como a medida da eficiência na redução de ruído, indicando a diferença de pressão sonora antes e depois do silenciador. Representada em decibéis (dB), uma *IL* maior indica maior eficácia do silenciador na atenuação do ruído do sistema de exaustão. Somando-se a esse fator encontra-se a redução de ruído (*NR*) que representa a eficácia geral do silenciador em reduzir o ruído no sistema de exaustão. E por fim o Transmssion Loss (*TL*).

A análise dessas propriedades é fundamentada na teoria de ondas planas em dutos, e vários métodos clássicos foram desenvolvidos para determinar esses dados, destacando-se o Método dos Dois Microfones descrito por Seybert e Ross (1977) e o Método do Tubo de Impedância.

A proposta do Método dos Dois Microfones por Seybert e Ross (1977) baseia-se na consideração do efeito do escoamento de gases no interior dos dutos. Essa técnica envolve o uso de uma fonte sonora que gera um sinal randômico de banda conhecida, denominado ruído branco. Esse sinal é caracterizado por bandas de largura e uma forma constante da densidade espectral de potência.

Embora o Método do Tubo de Impedância seja amplamente empregado devido à sua grande precisão e confiabilidade nas medições, a aquisição de dados é lenta. A avaliação das diversas frequências de interesse é realizada separadamente, e a obtenção dos máximos e mínimos das posições e magnitude ao longo do tubo é feita com a movimentação do microfone no interior do duto, o que torna o processo moroso. Além disso, não é possível captar frequências muito baixas sem o uso de tubos mais longos (BETTS, 1988).

Estudos subsequentes sobre essa técnica, segundo Allam (2004), destacam algumas condições para sua utilização. É crucial que as medições sejam realizadas na região de onda plana, e as paredes do duto devem ser rígidas para evitar a excitação de frequências com maior ordem. Durante a montagem do aparato experimental, o posicionamento do silenciador também deve ser considerado, recomendando-se uma distância mínima correspondente ao dobro do diâmetro do microfone mais próximo para evitar os efeitos de campo próximos de excitação.

A consideração final foi realizada por Bodén e Åbom (1986) e aborda a faixa de aplicação do Método dos Dois Microfones. A presença de erros de medição é inerente a qualquer processo de aquisição de dados, e, portanto, para a utilização dessa técnica, é necessário respeitar uma faixa de medição a fim de evitar grandes discrepâncias nos resultados. Segundo os autores, durante a perturbação do sistema, a onda plana gerada não deve ser atenuada por nenhum aparato experimental; no entanto, na prática, isso nem sempre ocorre. Portanto, a negligência da atenuação na região de posição dos dois microfones não deve ser desconsiderada, e para isso, os erros de sensibilidade compensam esses desvios, sendo o número de Mach o principal parâmetro de análise

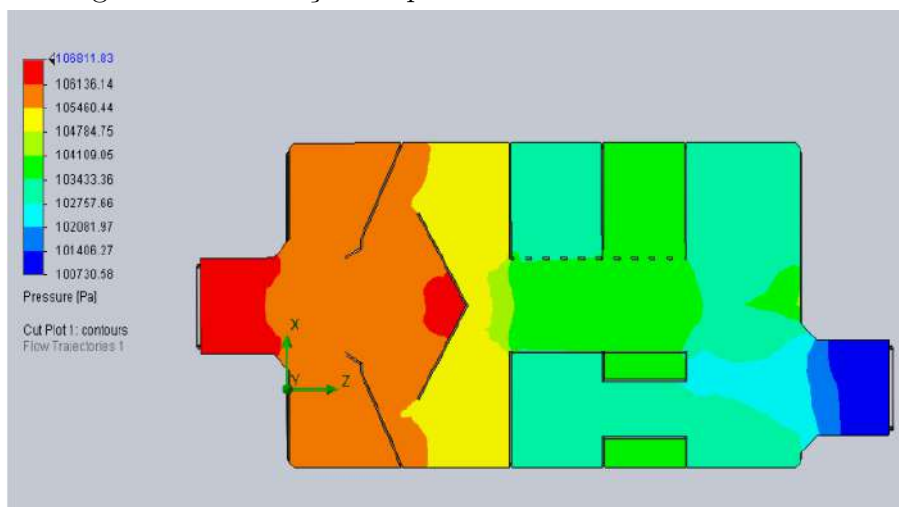
## 2.5 Avaliação de desempenho acústico de abafadores

Ao longo das últimas décadas, foram realizados diversos estudos para avaliação do desempenho dos abafadores, um dos métodos que mais se destaca é por meio da utilização e simulação por meio software CAD. Nesse sentido observa-se diferentes maneiras de se verificar a eficiência do abafador por meio da simulação 3D. Tutunea, Calbureanu e Lungu (2013) em seu estudo, empregou de dois principais fatores para evidenciar a eficiência de seu abafador: pressão e velocidade dos gases.

O desempenho médio do fluxo do abafador considerado na análise acústica foi avaliado por meio dos dois fatores citados anteriormente. A simulação aerodinâmica como mostrada na Figura 9 foi utilizada para observar as linhas de corrente, contornos de velocidade, vorticidade, densidade, número de Mach e temperatura do abafador. Os gases



Figura 8 – Simulação da pressão de contorno no abafador.

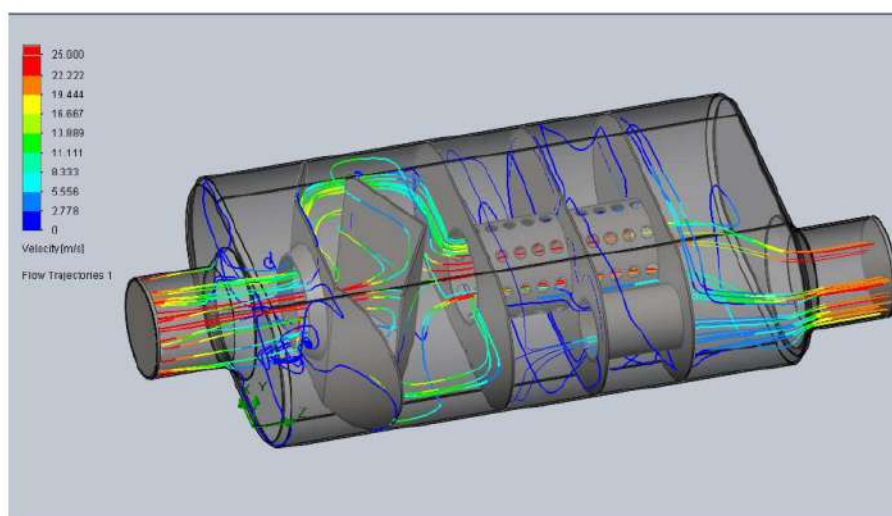


Fonte: Tutunea, Calbureanu e Lungu (2013)

oriundos da queima entram com alta temperatura na tubulação de entrada.

Conforme Figura 8 na tubulação de entrada, os gases têm uma pressão elevada que diminui com a recirculação dos gases através dos tubos perfurados do abafador de escape. Em seu trabalho, o campo de velocidade mostra reduções na velocidade dos gases queimados no abafador de escape com o aumento da velocidade na parte superior da tubulação de saída. Desta forma a simulação realizada por Tutunea, Calbureanu e Lungu (2013) utiliza da variação de pressão e velocidades dos gases na entrada e saída do abafador como forma de correlacionar com a redução de ruído do mesmo.

Figura 9 – Simulação da velocidade de contorno dos gases.

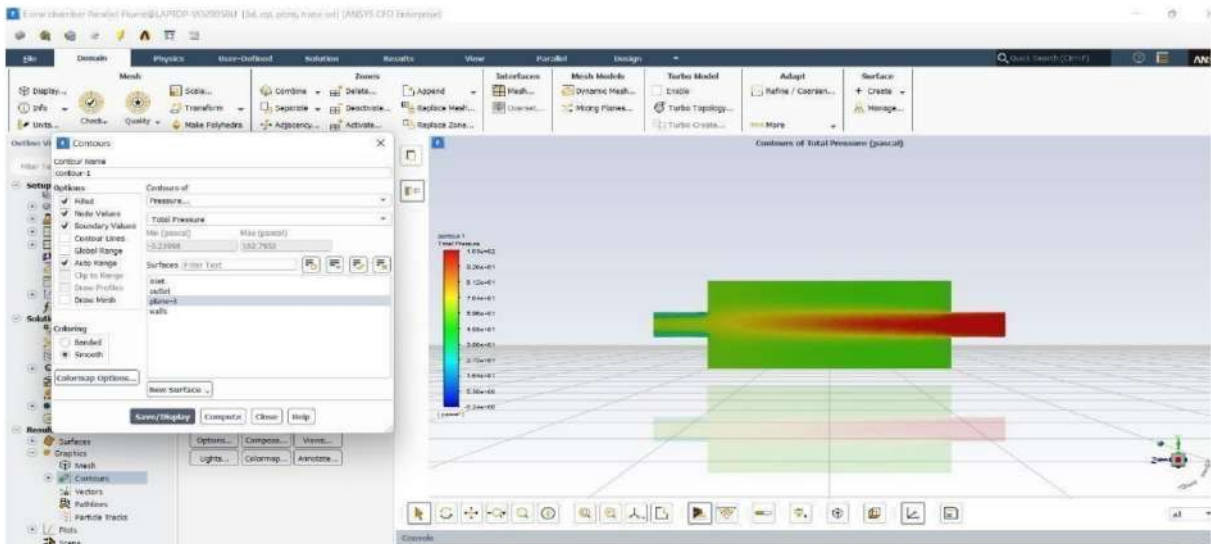


Fonte: Tutunea, Calbureanu e Lungu (2013)

Yadav, Lohith e Dammu (2022) em seu estudo correlacionam a velocidade e pressão dos gases na entrada e saída do abafador como forma de evidenciar a eficiência do mesmo em diferentes modelos variando a geometria interna e vendo como isso afeta os

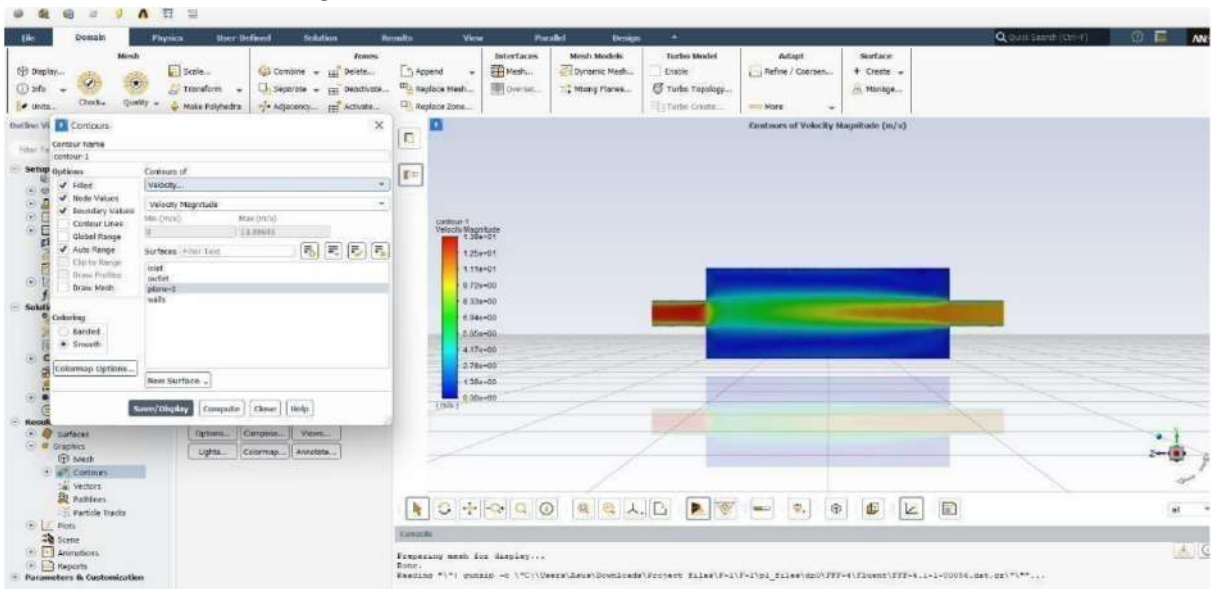
resultados obtidos conforme Figuras 10 e 28. Nesse estudo modelos que tiverem uma maior diferença entre as pressões de entrada e saída, e em paralelo um aumento na velocidade de saída dos gases apresentariam uma maior redução sonora. Ainda nesse estudo fica claro que o abafador contendo tubos perfurados apresentam uma melhor eficiência em comparação aos demais.

Figura 10 – Análise da pressão de contorno.



Fonte: Yadav, Lohith e Dammu (2022)

Figura 11 – Análise da velocidade de contorno.

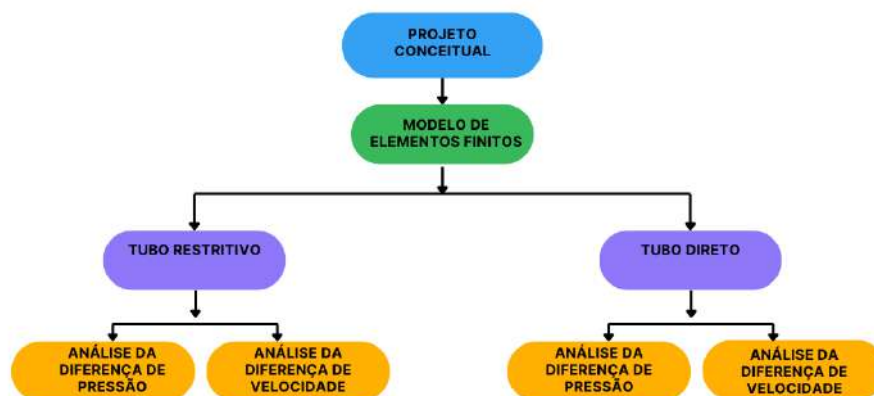


Fonte: Yadav, Lohith e Dammu (2022)

### 3 METODOLOGIA

Nesse capítulo será apresentada a metodologia que será utilizada na elaboração do experimento. O trabalho visa aprofundar-se na concepção e análise de um componente crucial no controle de emissões sonoras em sistemas automotivos: o abafador. Compreender e otimizar o desempenho desse dispositivo torna-se cada vez mais relevante, não apenas para atender às crescentes demandas de eficiência e desempenho veicular, mas também para mitigar os impactos ambientais associados ao ruído gerado pelos veículos. A metodologia adotada neste trabalho é estrategicamente dividida em três etapas distintas: Projeto Conceitual, Modelo de Elementos Finitos e Simulações como pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma metodologia.



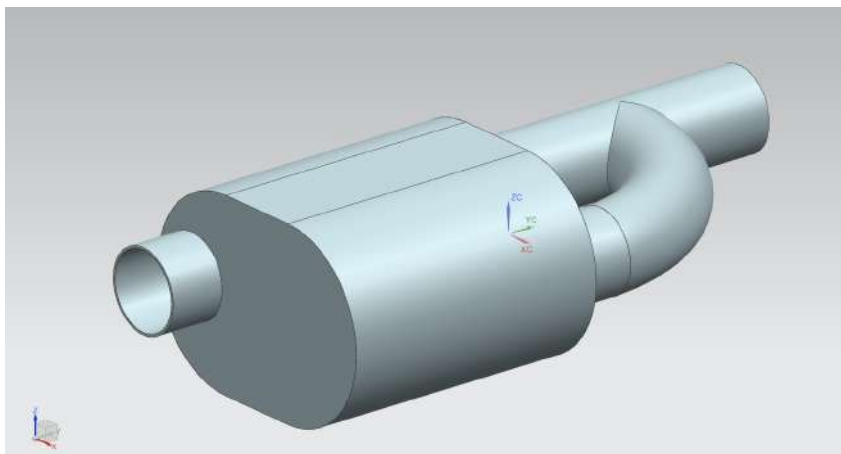
Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 3.1 Projeto conceitual

Será desenvolvido em software CAD NX *Siemens* 12.0 o projeto de um abafador de exaustão no qual irar ser possível a presença de dois diferentes níveis de ruído no mesmo sistema a escolha do proprietário.

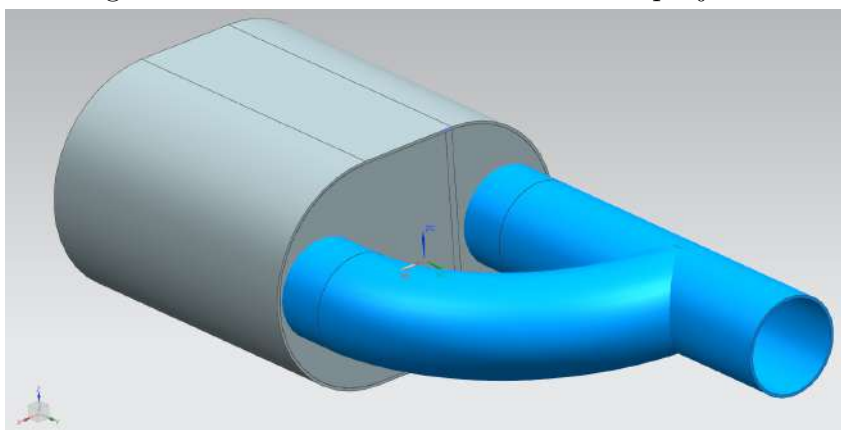
O desenho desenvolvido nesse trabalho, como apresentado nas Figuras 13 e 14 possui uma entrada única com diâmetro de 63,5 mm, tamanho esse que foi escolhido por ser a medida mais utilizada no sistema de escape em carros do mercado nacional, essa tubulação se divide em duas tubulações de entrada no abafador, as quais apresentam o mesmo diâmetro de 63,5 mm.

Figura 13 – Projeto do abafador valvulado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

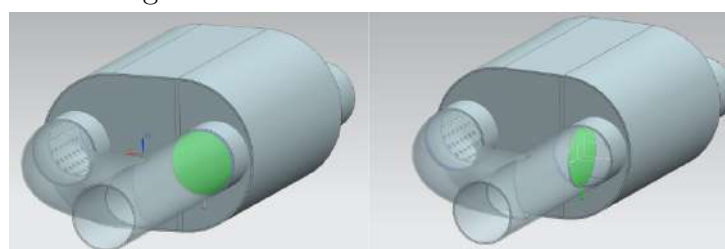
Figura 14 – Tubo de entrada do abafador projetado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A determinação de qual caminho a ser seguido pelos gases fica sendo determinado pela posição de uma borboleta eletrônica conforme ilustrado na Figura 15 esse mecanismo permite que quando aberta o fluxo seja direcionado pelo caminho menos restritivo “Tubo direto” e quando fechada, direciona os gases para a tubulação mais restritiva “Tubo restritivo”.

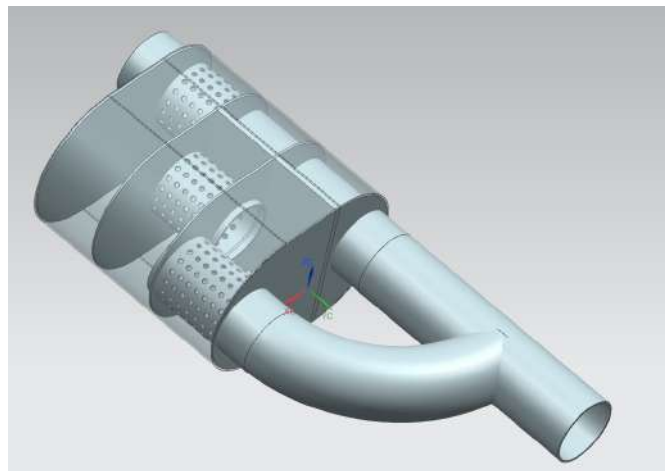
Figura 15 – Válvula fechada e aberta.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

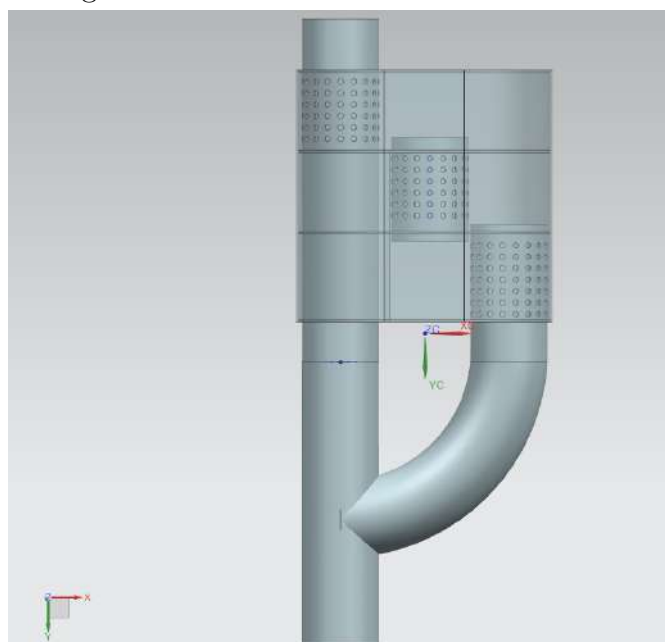
O corpo do abafador conforme mostrado nas Figuras 16 e 17 é composto por uma estrutura de 220 mm de comprimento e 150 mm de altura. Já em relação a tubulação interna, o caminho menos restritivo não apresenta nenhuma interferência interna ao longo da passagem dos gases. Por outro lado na tubulação restritiva, essa será composta por 2 tubos internos de 90 mm de comprimento e diâmetro de 63,5 mm, os quais apresentam furações de 5 mm de diâmetro ao longo do seu corpo. Somando-se a isso a geometria apresenta duas abas internas que ajudam na fixação dos tubos no seu interior e auxiliam na restrição do fluxo dos gases. Por fim, os dois fluxos (restritivo e direto) direcionam para a mesma tubulação de saída a qual apresenta o diâmetro de 63,5 mm.

Figura 16 – Estrutura interna do abafador.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 17 – Estrutura interna do abafador.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

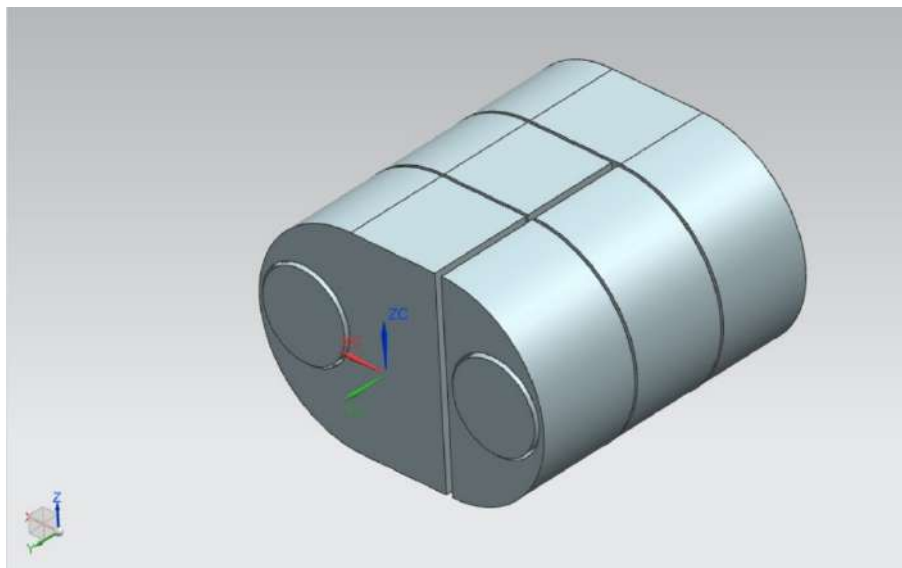
### 3.2 Modelo de elementos finitos

Como é possível observar, a geometria apresenta complexidade, caracterizada por numerosas curvaturas, dobras e protuberâncias de atuadores. Esses elementos não foram incluídos na análise fluidodinâmica devido à sua complexidade, resultando em várias simplificações na geometria para reduzir o número de nós e elementos na malha.

Concomitantemente às simplificações, buscam entender como o design do abafador altera o fluxo de gases em seu interior, utilizando-se de um laptop Acer Nitro 5 o qual apresenta processador i7 de 9ª geração somando-se ao uso do software NX *Siemens* 12 para realizar simulações de fluxo e comparar como diferentes fatores como velocidade, número de elementos, número de nós e velocidade de entrada na tubulação influenciam na exaustão dos gases oriundos do escapamento.

Após o desenvolvimento do abafador no software NX *Siemens* 12.0 inicia-se o processo para criação do modelo de elementos finitos. Primeiramente será realizado a determinação do volume interno conforme mostrado na Figura 20 no qual o fluxo de gases irar percorrer. Para isso, usou-se das ferramentas “*unite*” para unir todas as peças do abafador em somente um corpo, “*extrude*” fornecendo a área total do objeto e posteriormente da ferramenta “*subtract*” para determinar o volume interno do abafador.

Figura 18 – Volume interno do abafador.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após a determinação do volume interno, inicia-se o processo de simulação, o qual utiliza do Solver “*Simcenter Thermal/Flow*” e Analysis Type “*Flow*” para a solução do mesmo. Todas simulações utilizam o ar como elemento que escoar pelo abafador, as propriedades do material podem ser visualizadas na Tabela 2.

Será realizado ao longo do trabalho duas dimensões de elemento de malha. O primeiro utiliza do elemento tetraédrico linear de 4 nós com 5 mm enquanto o segundo tipo



Tabela 2 – Propriedades do ar.

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	1,2041	Kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente térmico de expansão	0,00341	1/°C
Condutividade térmica	26,30	μW/mm°C
Calor específico	1007	J/(Kg K)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

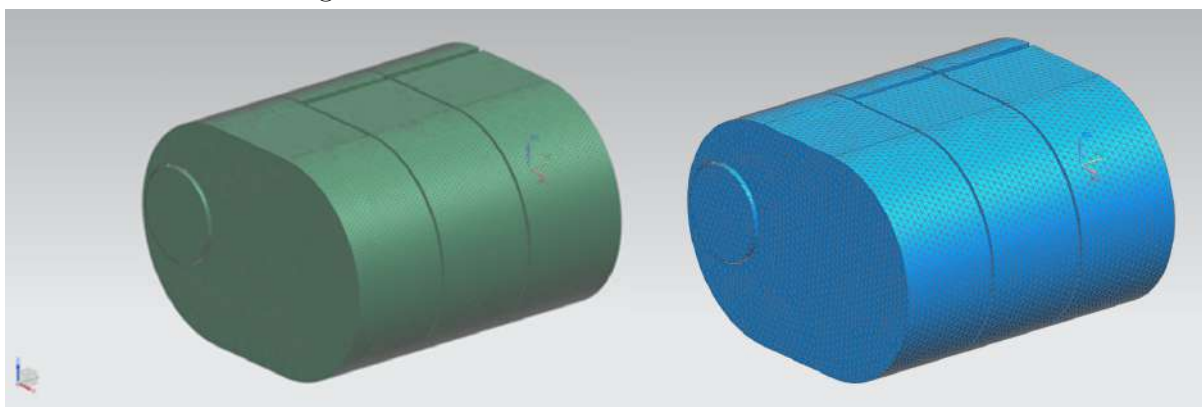
utiliza o mesmo elemento porém com 3 mm conforme mostrado na Tabela 3 e Figura 19. Utilizou dessas dimensões e do tipo de elemento devido ao poder computacional utilizado nas simulações, em que a diminuição do tamanho de elemento aumentava significativamente o tempo de simulação. A Figura 20 representa um corte transversal no volume interno no abafador, o qual pode ser entendido como o volume no qual o ar irar percorrer ao longo do objeto.

Tabela 3 – Número de nós e elementos por simulação.

Tamanho da malha (mm)	Número de elementos	Números de nós
5	302704	64451
3	976422	197238

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 19 – Abafador com malha de 3 e 5 mm.

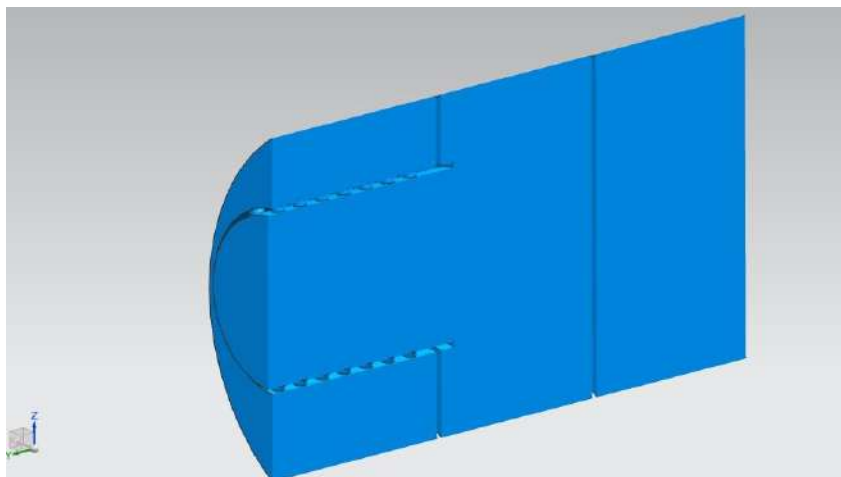


Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 3.2.1 Carregamentos e condições de contorno

Já em relação as condições de contorno teve-se duas diferenciações, tudo direto e tudo restritivo. Utilizou-se primeiramente de uma velocidade inicial de 50 m/s, porém como proposto por Tutunea, Calbureau e Lungu (2013) a velocidade dos gases oriundos

Figura 20 – Volume interno - Corte transversal.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

da queima é próxima a 25 m/s no abafador, desta forma será realizado a simulação das duas velocidades como entrada no mesmo. Sendo assim, conforme mostrado na Tabela 4 dividiu-se o processo de simulação em oito diferentes simulações todas utilizando a solução do tipo “*transient*”, variando entre “tubo direto” e “tubo restritivo”, tamanho de malha, velocidade de entrada dos gases, número de *steps* e tempo de simulação. Possibilitando desta forma, após a realização das simulações encontrar a diferença de pressão e velocidade dos gases após passarem pelo abafador.

Tabela 4 – Simulações realizadas.

Simulação	Velocidade (m/s)	Nº de steps	Tamanho da malha (mm)	Tempo (seg)
1. Tubo direto	50	100	5	4
2. Tubo restritivo	50	100	5	4
3. Tubo direto	50	400	5	1
4. Tubo restritivo	50	400	5	1
5. Tubo direto	25	400	5	1
6. Tubo restritivo	25	400	5	1
7. Tubo direto	25	400	3	1
8. Tubo restritivo	25	400	3	1

Fonte: Elaboração do próprio autor.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização do projeto conceitual, criação do modelo de elementos finitos e finalmente as oito simulações, foi possível obter diversas informações sobre como a geometria do abafador altera a velocidade e pressão dos gases após a passagem pelo projeto. Somando-se a isso com a diferença de pressão de entrada e saída dos gases pode-se obter a Perda de Transmissão ( $TL$ ), em que quanto maior for esse número, maior a perda de transmissão sonora das ondas como mostrado por (FU *et al.*, 2021). Os valores encontrados de pressão e velocidade na saída e entrada do abafador ao longo das oito simulações estão presentes na Tabela 5

Tabela 5 – Resultados obtidos de velocidade e pressão

Simulação	1	2	3	4	5	6	7	8
Pressão entrada [Pa]	1830	19490	1820	19000	450	4080	470	3780
Pressão saída [Pa]	1730	4070	1730	4120	430	810	450	820
Velocidade entrada [m/s]	50,0	50,0	50,0	49,9	25,0	25,0	25,0	25,0
Velocidade saída [m/s]	52,7	79,4	53,3	80,2	26,3	35,2	26,5	35,9

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Realizou pimeiramente a Simulações 1 e posteriormente a Simulação 2 conforme Figuras 21 e 22 afim de analisar o efeito que a geometria do abafador ocasionava no fluxo de gases oriundos da queima, neste caso foi feito as duas opções de fluxo, tubo direto e tubo restrito. Foi possível observar que no caso do tubo direto “Simulação 1” ocorreu uma menor perda de pressão em relação a entrada e saída do mesmo cerca 5%, por outro lado houve um incremento de 5% em relação a velocidade de entrada e saída. Já quando comparado ao tubo restrito “Simulação 2” obteve-se uma grande diferença dos resultados, a pressão reduziu em cerca de 80% enquanto a velocidade de saída dos gases aumentou em 58%.

Posteriormente seguiu-se para as Simulações 3 e 4 as quais estão apresentadas nas Figuras 23 e 24, nelas ocorreram um aumento no número de steps de 100 para 400 e em paralelo um decréscimo no tempo de simulação de 4 para 1 segundo, pois foi observado que os gases de exaustão nas condições de contorno da simulação anterior percorriam o corpo do abafador em menos de 1 segundo e para melhorar a captação de dados aumentou-se o número de steps. Verificou-se que em ambas simulações mesmo aumentando os números de steps e diminuindo o tempo de simulação obteve-se valores muito próximos as Simulações 1 e 2, obtendo no caso do tubo direto “Simulação 3” uma redução de 5% na pressão e um aumento de 6,5% na velocidade. Em paralelo a “Simulação 4” com tubo restrito apresentou 79% de redução na pressão de saída quando comparado a velocidade de entrada e um aumento de 60,5% na velocidade de saída dos gases. É possível observar que o aumento

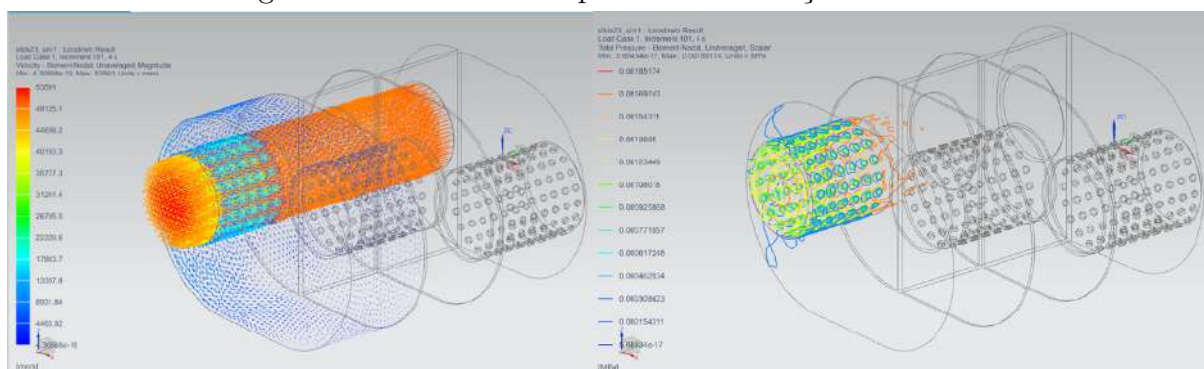
na quantidade de steps e diminuição do tempo de simulação não apresentou grandes divergências entre os valores encontrados nas Simulações 1 e 2.

Seguindo no estudo, iniciou-se as Simulações 5 e 6, conforme Figuras 25 e 26, estas por sua vez apresentaram a velocidade de entrada reduzida em cerca de 50% obtendo o valor de 25m/s como input inicial, de mais fatores se mantiveram iguais as Simulações 3 e 4. Primeiramente no tubo direto “Simulação 5” observou uma redução de 4,5% em relação a pressão de saída quando comparado a entrada, já a velocidade houve um pequeno aumento de 5% da velocidade de saída quando comparada a de entrada. Já em relação ao tubo restritivo “Simulação 6”, observou-se uma redução de 80% na pressão enquanto a velocidade de saída apresentou um incremento de 41% quando comparada a velocidade de entrada. Foi possível verificar que mesmo com uma redução na velocidade inicial dos gases a porcentagem de redução de pressão e aumento na velocidade se mantiveram ao longo dos experimentos.

Somando-se a esse processo, iniciou-se as Simulação 7 e 8, conforme Figuras 27 e 28, buscando entender como o tamanho de malha alterava os valores obtidos durante a simulação, optou-se por diminuir a dimensão do elemento tetraédrico de 4 nós de 5 para 3 mm. Observou-se que mesmo com um número de elementos e número de nós maior, quando comparado as Simulações 5 e 6 obteve-se resultados semelhantes aos anteriores, conforme mostrado na Tabela 5.

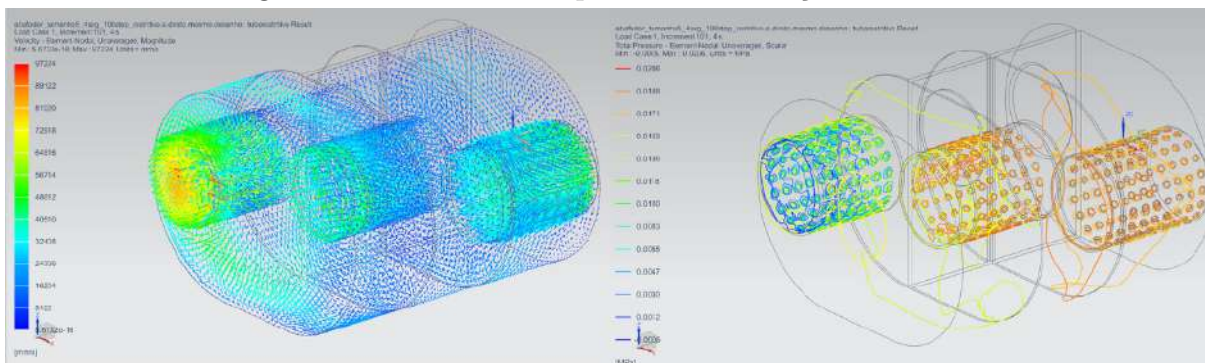
Por fim, com os dados obtidos ao longo das simulações foi possível por meio da Equação 4, determinar a Perda de Transmissão de todas as simulações conforme Tabela 6. Observou-se que mesmo alterando diversos fatores e condições de contorno os valores obtidos de TL para o fluxo em tubo direto e tubo restritivo se mantiveram ao longo do processo com valores próximos. Em paralelo, é possível verificar com a mudança do fluxo de gases entre tubo direto e tubo restritivo alteram os valores de TL, sendo que no primeiro caso a média encontrada para o TL foi de 0,42 enquanto para o tubo restritivo foi de 13,54.

Figura 21 – Velocidade e pressão - Simulação número 1



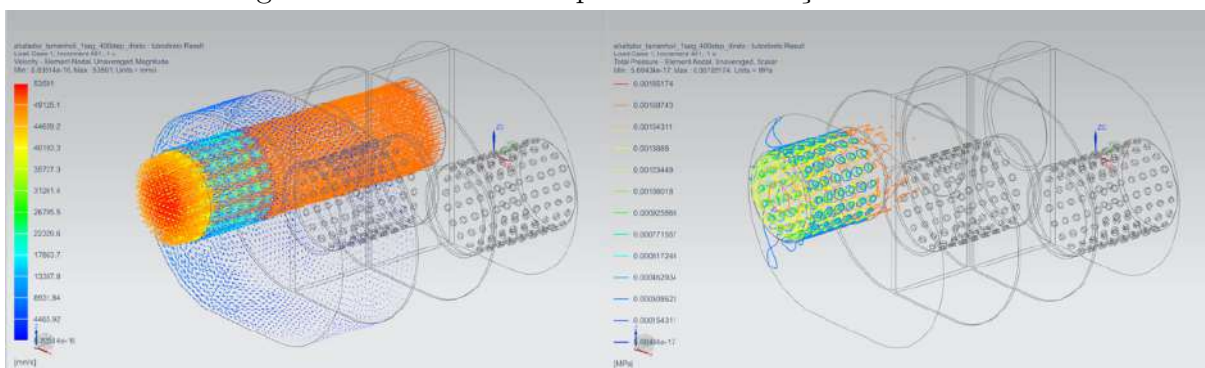
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 22 – Velocidade e pressão - Simulação número 2



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 23 – Velocidade e pressão - Simulação número 3



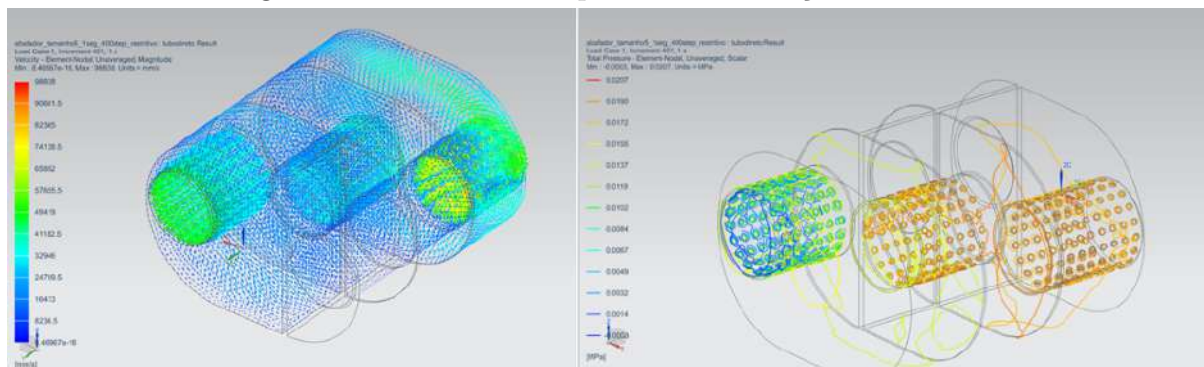
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 6 – Perda de transmissão

Simulação	1	2	3	4	5	6	7	8
TL	0,48	13,60	0,44	13,28	0,39	14,04	0,38	13,27

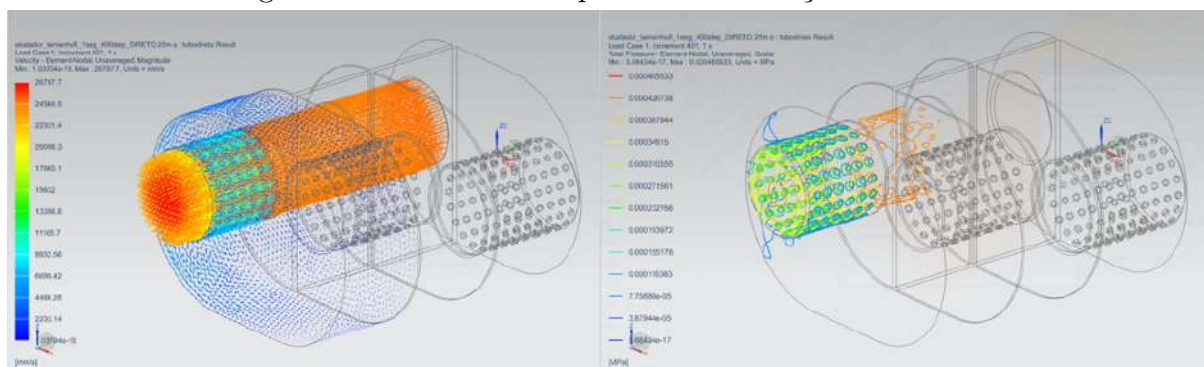
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 24 – Velocidade e pressão - Simulação número 4



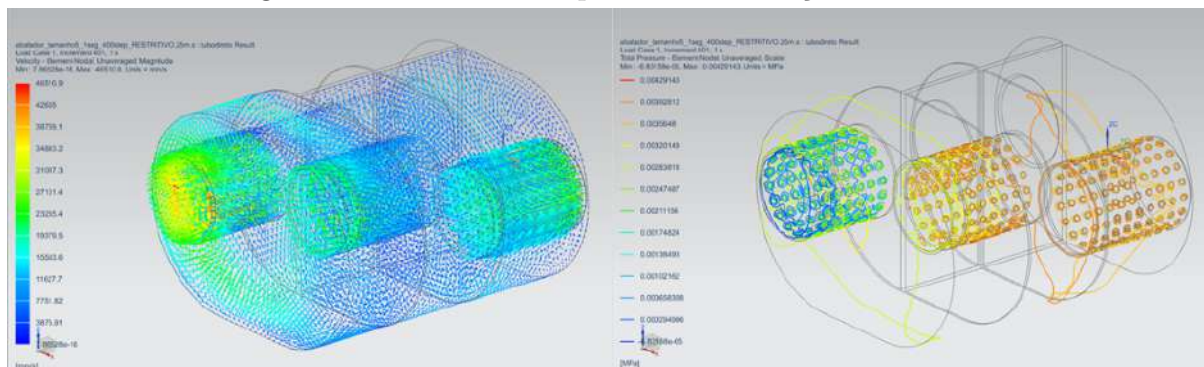
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 25 – Velocidade e pressão - Simulação número 5



Fonte: Elaboração do próprio autor.

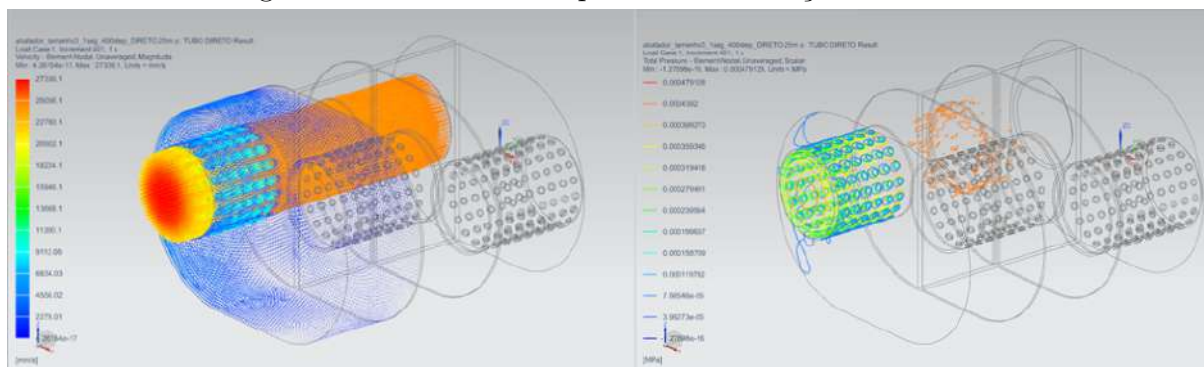
Figura 26 – Velocidade e pressão - Simulação número 6



Fonte: Elaboração do próprio autor.

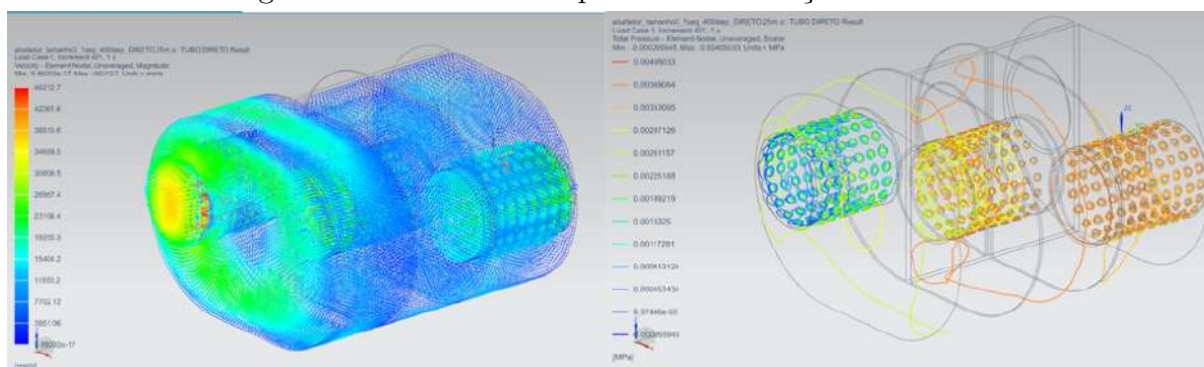


Figura 27 – Velocidade e pressão - Simulação número 7



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 28 – Velocidade e pressão - Simulação número 8



Fonte: Elaboração do próprio autor.

## 5 CONCLUSÃO

O sistema de exaustão de um automóvel equipado com motor a combustão interna desempenha um papel crucial na eficiência do veículo. Ele impacta na quantidade de ar aspirado pelo motor, reduz os ruídos gerados e influencia a emissão de gases nocivos, contribuindo assim para a preservação do meio ambiente.

Diante desse contexto, o objetivo deste estudo foi desenvolver um projeto de abafador valvulado juntamente com a análise de fluxo dos gases no sistema de escapamento, com foco especial no silenciador. Para isso foi essencial abordar as equações fundamentais que governam essa análise, explorar a dinâmica dos fluidos computacional, examinar as equações pertinentes a essa abordagem, e discutir os modelos de abafadores, bem como as melhorias implementadas ao longo do tempo para a criação do projeto final apresentado do abafador.

Desta forma, os resultados obtidos pelo desenvolvimento do trabalho indicam que a proposta do projeto conceitual referente a criação de um abafador valvulado a qual tivesse dimensão próxima ao de um silenciador original e que apresenta-se dois níveis de ruído a escolha do proprietário foi concluída com sucesso. Em paralelo foi possível observar que em relação ao tubo direto e tubo restrito a variação de fluxo encontrada internamente no abafador proporciona uma diferença substancial entre os valores encontrados de velocidade e pressão considerando os dados de entrada e saída do silenciador. Somando-se a esse fator, utilizando dos valores obtidos de Perda de Transmissão foi factível verificar novamente a grande divergência de restrição encontrada entre as duas opções de fluxo dos gases no abafador considerando tubo direto e tubo restritivo.

Por fim, em perspectiva para trabalhos futuros, torna-se interessante realizar a simulação de ruído presente em alguns softwares CAD. Esse experimento possibilitará a verificação dos níveis de decibéis após a passagem do fluxo de gases. Além disso, considera-se a viabilidade da fabricação de um silenciador para validar diferentes fluxos, utilizando métodos de medição de nível de decibéis apresentados ao longo do trabalho, como os dois microfones. Além da medição de  $dB$ , seria possível determinar experimentalmente outros parâmetros com um protótipo, como a perda por inserção ( $IL$ ) e a redução de ruído ( $NR$ ).

## REFERÊNCIAS

- ALLAM, S. Acoustic modelling and testing of advanced exhaust system components for automotive engines. In: . [s.n.], 2004. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:32962234>>. Citado na página 24.
- BETTS, J. **Finite Element Study of Plane Wave Acoustic Phenomena in Duts**. Dissertação (Mestrado) — Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, April 1988. Citado na página 24.
- BLAIR, G. P. **The Science of Sound: Acoustics in Sports Engineering**. [S.l.]: CRC Press, 2015. Citado na página 22.
- BODÉN, H.; ÅBOM, M. Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 79, n. 2, p. 541–549, 02 1986. ISSN 0001-4966. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.393542>>. Citado na página 24.
- CAR, S. S. **Perforated muffler, what is it like inside?** 2023. Acesso em: 08/12/2023. Disponível em: <<http://blog.sigmacar.com.br/wp-content/uploads/2016/03/escapamento2.jpg>>. Citado na página 22.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução N°272 DE 14 DE SETEMBRO DE 2000**. Brasil, 2000. Citado na página 23.
- ELSAYED, A. *et al.* Investigation of baffle configuration effect on the performance of exhaust mufflers. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 10, p. 86–94, 2017. ISSN 2214-157X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X16301769>>. Citado na página 18.
- ESPORTE, A. **130 anos da patente do primeiro automóvel**. 2023. Acesso em: 27/01/2023. Disponível em: <<https://autoesporte.globo.com/carros/noticia/2016/01/130-anos-da-patente-do-primeiro-automovel.html>>. Citado na página 14.
- FU, J. *et al.* Effects of structural parameters on transmission loss of diesel engine muffler and analysis of prominent structural parameters. **Applied Acoustics**, v. 173, p. 107686, 2021. ISSN 0003-682X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X20307908>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 33.
- GUERRA, P. **Educação Automotiva**. 2017. Acesso em: 01/11/2023. Disponível em: <<https://educacaoautomotiva.com/2017/07/06/motor-4-tempos-como-funciona/>>. Citado na página 20.
- HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1988. Citado na página 22.
- HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1998. Citado na página 19.
- KINSLER, L. E.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B. **Fundamentals of Acoustics**. [S.l.]: John Wiley Sons, 1999. Citado na página 18.

- LUZIAN. **Abafador Ressonador**. 2022. Acesso em: 02/11/2023. Disponível em: <<https://luzian.com.br/abafadores/abafador-la015/>>. Citado na página 21.
- MOORE, B. C. J. **An Introduction to the Psychology of Hearing**. [S.l.]: Brill, 2012. Citado na página 19.
- OHOP, H. **Whats is a muffler and whats does it do**. 2022. Acesso em: 08/12/2023. Disponível em: <<https://www.thedrive.com/guides-and-gear/what-is-a-muffler-and-what-does-it-do>>. Citado na página 21.
- PORSCHE. **Opções de escape**. 2023. Acesso em: 05/07/2023. Disponível em: <<https://www.porsche.com/brazil/pt/modelstart/all/?modelrange=911>>. Citado na página 15.
- RIVIERA. **Sistema de escape completo**. 2020. Acesso em: 05/11/2023. Disponível em: <<https://oficinariviera.com.br/site/dicas/87-sistema-de-exaustao/#prettyPhoto>>. Citado na página 19.
- ROCHA, R. Gomes da. **Estudo de um método para projetar sistemas de escape de um motor de combustão interna a 4 tempos**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade do Porto, 2011. Citado na página 20.
- ROSSING, T.; FLETCHER, N. **Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response**. [S.l.]: Academic Press, 2007. Citado na página 18.
- ROSSING, T.; FLETCHER, N. **Principles of Vibration and Sound**. [S.l.]: Springer, 2019. Citado na página 17.
- SEYBERT, A. F.; ROSS, D. F. Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 61, n. 1, p. 1362–1370, 1977. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- SOHEI, N.; TSUYOSHI, N.; TAKASHI, Y. Acoustic analysis of elliptical muffler chamber having a perforated pipe. **Journal of Sound and Vibration**, v. 297, n. 3, p. 761–773, 2006. ISSN 0022-460X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X06003920>>. Citado na página 18.
- TUTUNEA, D.; CALBUREANU, M.; LUNGU, M. The computational fluid dynamics (CFD) study of fluid dynamics performances of a resistance muffler. **Internacional Journal of Mechanics**, v. 7, n. 4, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 31.
- YADAV, R.; LOHITH, P.; DAMMU, Y. **Modeling and Analysis of Diesel Engine Muffler Using CFD**. Dissertação (Bachelor of Technology) — Anil Neerukonda Institute Of Technology Sciences, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.