



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



**Marcos Vinicius Silva Rodrigues**

**METODOLOGIA DE PROJETO E OTIMIZAÇÃO  
ACÚSTICA DE MUFFLERS REATIVOS  
APLICADOS A GRUPOS GERADORES  
UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO COM  
MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Goiânia  
2026

Processo: 23070.057855/2025-41  
Documento: 5928879



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

### 1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação     Tese     Outro\*: \_\_\_\_\_

\*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

### 2. Nome completo do autor

**Marcos Vinicius Silva Rodrigues**

### 3. Título do trabalho

**METODOLOGIA DE PROJETO E OTIMIZAÇÃO ACÚSTICA DE MUFFLERS REATIVOS APLICADOS A GRUPOS GERADORES UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO COM MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

### 4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento  SIM     NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);
- b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Marlize Garcia Fagundes Neto, Professor do Magistério Superior**, em 23/01/2026, às 09:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Vinicius Silva Rodrigues, Discente**, em 23/01/2026, às 09:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5928879** e o código CRC **7AE338F7**.

**Marcos Vinicius Silva Rodrigues**

**METODOLOGIA DE PROJETO E OTIMIZAÇÃO ACÚSTICA  
DE MUFFLERS REATIVOS APLICADOS A GRUPOS  
GERADORES UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO COM  
MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, Como Requisito Para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto

Universidade Federal de Goiás – UFG  
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação – EMC  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – PPGMEC

Goiânia  
2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rodrigues, Marcos Vinicius Silva  
METODOLOGIA DE PROJETO E OTIMIZAÇÃO ACÚSTICA DE  
MUFFLERS REATIVOS APLICADOS A GRUPOS GERADORES UTILIZANDO  
ALGORITMO GENÉTICO COM MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS [manuscrito ]  
/ Marcos Vinicius Silva Rodrigues. - 2026.  
CXXXV, 135 f.: 2026

Orientador: Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de  
Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-  
graduação em Engenharia Mecânica, Goiânia, 2026.

Anexo.

Apêndice.

Inclui: lista de figuras, lista de tabelas.

1. Silenciadores Reativos. 2. Geradores. 3. TL. 4. MEF. 5. GA.

I. Neto, Marlipe Garcia Fagundes , orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 07 da sessão de Defesa de Dissertação de **Marcos Vinicius Silva Rodrigues**, que confere o título de Mestre em **Engenharia Mecânica**, na área de concentração em **Ciências Mecânicas**.

Aos **vigésimo primeiro dia do mês de janeiro de dois mil e vinte e seis**, a partir das **09h**, no Auditório da Engenharia Mecânica, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “METODOLOGIA DE PROJETO E OTIMIZAÇÃO ACÚSTICA DE MUFFLERS REATIVOS APLICADOS A GRUPOS GERADORES UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO COM MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Marlize Garcia Fagundes Neto (UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Gino Bertolucci Colherinhas (UFG)**, membro titular interno e Professor Doutor **Marcus Antonio Viana Duarte (UFU)** membro titular externo, com participação via video chamada. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Marlize Garcia Fagundes Neto**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **vigésimo primeiro dia do mês de janeiro de dois mil e vinte e seis**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Marlize Garcia Fagundes Neto, Professor do Magistério Superior**, em 21/01/2026, às 10:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gino Bertolucci Colherinhas, Professor do Magistério Superior**, em 21/01/2026, às 10:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcus Antonio Viana Duarte, Usuário Externo**, em 21/01/2026, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5911364** e o código CRC **5FDC37C6**.



# **METODOLOGIA DE PROJETO E OTIMIZAÇÃO ACÚSTICA DE MUFFLERS REATIVOS APLICADOS A GRUPOS GERADORES UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO COM MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, Como Requisito Para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto

**Qualificação Avaliada em 21 de janeiro de 2026, pela Seguinte Banca Examinadora:**

---

**Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto**  
Orientador – UFG

---

**Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte**  
Avaliador Externo - UFU

---

**Prof. Dr. Gino Bertollucci Colherinhas**  
Avaliador Interno – UFG

Goiânia  
2026

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que, quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me guiar, dar força e sabedoria ao longo desta jornada acadêmica. Foi Ele quem me concedeu resiliência para enfrentar os desafios e perseverança nos momentos mais difíceis. Sem Sua presença em minha vida, a concretização deste trabalho não teria sido possível. Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, professor Marlipe Garcia Fagundes Neto, por sua orientação segura, paciência e apoio constante, que foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço à Universidade Federal de Goiás (UFG) pelo ambiente acadêmico estimulante e por toda a estrutura institucional oferecida ao longo do curso, especialmente às Pró-Reitorias de Pós-Graduação (PRPG) e de Pesquisa e Inovação (PRPI), pelo suporte contínuo à pesquisa científica e tecnológica. Também sou grato à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido durante o mestrado, bem como à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pelo apoio financeiro destinado à aquisição de aparatos experimentais fundamentais para a execução desta pesquisa.

Aos colegas da BRG Brasil Geradores, manifesto meu reconhecimento pela parceria, colaboração prática e suporte técnico ao longo de todo o processo de pesquisa e desenvolvimento. Por fim, deixo um agradecimento especial à minha esposa, Polliane Alves Silva Rodrigues, por seu amor, paciência e compreensão incondicionais. Ao meu filho, Rafael e João, dedico este trabalho como símbolo da minha inspiração diária. Aos meus pais, José Wiles e Juveni Oliveira, expresso minha eterna gratidão pelo incentivo, exemplo de dedicação e por sempre acreditarem em meu potencial. Estendo ainda meus agradecimentos a toda a minha família, cujo carinho e apoio foram essenciais para a realização desta etapa da minha vida.

*A independência da nação passa pela capacidade em gerar conhecimento.*

*Almirante Eng. Othon Luiz Pinheiro da Silva.*

## RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um silenciador acústico reativo otimizado para sistemas de escape de grupos geradores, a partir de um estudo de caso que utiliza como referência um modelo comercial com atenuação média de 35 dB(A), empregado em ambiente industrial. O objetivo central é reduzir o ruído emitido e garantir conformidade com as normas vigentes. Embora fundamentais em diversas aplicações, esses geradores constituem fontes significativas de poluição sonora, especialmente durante a fase de exaustão dos motores de combustão interna. A pesquisa emprega simulações numéricas baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF), integradas a algoritmos genéticos, para explorar geometrias não convencionais de silenciadores, como aquelas com entrada lateral e defletores assimétricos. A função objetivo foi definida para maximizar a Transmission Loss (TL) em uma faixa de frequência (1500–2500 Hz), estrategicamente selecionada com base na principal fonte de ruído do sistema. A validação experimental parcial foi conduzida por meio do método das duas cargas, conforme a norma ASTM E2611-09. Além disso, foram propostos ensaios de campo com base na norma ABNT NBR ISO 8528-10. Os resultados demonstram a robustez do Algoritmo de Genético (GA) e o potencial para gerar silenciadores reativos mais simples e de menor custo, mantendo desempenho acústico comparável ao silenciador combinado (reativo e resistivo) adotado no caso prático comercial. Essa constatação é corroborada por simulações e testes iniciais, reforçando a efetividade da abordagem.

**Palavras-chaves:** Silenciadores reativos; geradores; TL; MEF; GA.

## ABSTRACT

This work proposes the development of an optimized reactive acoustic silencer for exhaust systems of generator sets, based on a case study that adopts as reference a commercial model with an average attenuation of 35 dB(A), employed in an industrial environment. The main objective is to reduce the noise emitted and ensure compliance with current standards. Although essential in several applications, generator sets constitute significant sources of noise pollution, especially during the exhaust phase of internal combustion engines. The research employs numerical simulations based on the Finite Element Method (FEM), integrated with Genetic Algorithms (GA), to explore non-conventional silencer geometries, such as configurations with lateral inlet and asymmetric baffles. The objective function was defined to maximize the Transmission Loss (TL) within a frequency range of 1500–2500 Hz, strategically selected based on the primary noise source of the system. Partial experimental validation was conducted using the two-load method, in accordance with ASTM E2611-09. In addition, field tests based on the ABNT NBR ISO 8528-10 standard were proposed. The results demonstrate the robustness of the Genetic Algorithm and the potential of the methodology to generate simpler and lower-cost reactive silencers while maintaining acoustic performance comparable to the combined silencer (reactive and resistive) adopted in the commercial practical case. This finding is corroborated by simulations and initial tests, reinforcing the effectiveness of the proposed approach.

**Keywords:** Reactive mufflers; Generator; TL; MEF; GA.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1.1: LAYOUT GRUPO GERADOR NO INVÓLUCRO. ....                          | 18 |
| FIGURA 1.2: LAYOUT GRUPO GERADOR ABERTO.....                                 | 19 |
| FIGURA 1.3: CICLO DIESEL.....  | 19 |
| FIGURA 1.4: INSTALAÇÃO TÍPICA DE SILENCIADOR NA SAÍDA DE ESCAPE DE MCI. .... | 20 |
| FIGURA 1.5: DESENHO TÉCNICO SCNO ATUAL. ....                                 | 22 |
| FIGURA 1.6: MODELO VISTA LATERAL GERADOR CARENADO E SCNO ATUAL. ....         | 23 |
| FIGURA 1.7: EQUIPAMENTO VISTA FRONTAL GERADOR CARENADO E SCNO ATUAL. ....    | 23 |
| FIGURA 1.8: FLUXOGRAMA SIMPLIFICAÇÃO. ....                                   | 24 |
| FIGURA 1.9: FLUXOGRAMA OTIMIZAÇÃO.....                                       | 24 |
| FIGURA 2.1: APARATO TEÓRICO PARA AVALIAÇÃO DA TL. ....                       | 29 |
| FIGURA 2.2: SILENCIOSO REATIVO E CURVA TÍPICA EM BAIXA FREQUÊNCIA.....       | 31 |
| FIGURA 2.3: SILENCIOSO RESISTIVO E CURVA TÍPICA EM ALTA FREQUÊNCIA. ....     | 31 |
| FIGURA 2.4: CURVA CARACTERÍSTICA DE SILENCIADOR COMBINADO. ....              | 32 |
| FIGURA 2.5: SILENCIADOR COM ENTRADA AXIAL. ....                              | 32 |
| FIGURA 2.6: SILENCIADOR COM ENTRADA LATERAL.....                             | 33 |
| FIGURA 2.7: SILENCIADOR COM EIXOS ORTOGONAIS. ....                           | 33 |
| FIGURA 2.8: SILENCIADOR FLUXO RETILÍNEO. ....                                | 34 |
| FIGURA 2.9: SILENCIADOR COM FLUXO CRUZADO. ....                              | 34 |
| FIGURA 2.10: SILENCIADOR COM FLUXO REVERTIDO.....                            | 35 |
| FIGURA 2.11: SILENCIADOR ESCOAMENTO COMPLEXO. ....                           | 35 |
| FIGURA 2.12: DEFINIÇÃO DA MALHA, ELEMENTOS E NÓS. ....                       | 36 |
| FIGURA 2.13: ELEMENTOS DE MALHA EM SILENCIADOR AXIAL SIMPLES.....            | 36 |
| FIGURA 2.14: SAN PARA PREDIÇÃO DE TL.....                                    | 38 |
| FIGURA 2.15: ETAPAS PRINCIPAIS DO GA.....                                    | 42 |
| FIGURA 2.16: ESQUEMA APARATO EXPERIMENTAL MÉTODO DAS DUAS CARGAS. ....       | 43 |
| FIGURA 2.17: SUPERFÍCIE DE MEDIÇÃO AO REDOR DO GERADOR. ....                 | 44 |
| FIGURA 3.1: DADOS DE EXAUSTÃO DE REFERÊNCIA MOTOR GRUPO GERADOR.....         | 48 |
| FIGURA 3.2: NÍVEL POTÊNCIA SONORA DO MOTOR SCANIA DC9. ....                  | 51 |
| FIGURA 3.3: DESENHO TÉCNICO SRSNO PROPOSTO.....                              | 52 |
| FIGURA 3.4: MODELO TRIDIMENSIONAL SRSNO PROPOSTO. ....                       | 52 |
| FIGURA 3.5: GEOMETRIA COM MEDIDAS CONTANTES SRSNO. ....                      | 53 |
| FIGURA 3.6: GEOMETRIA COM MEDIDAS CONTANTES MRSNO. ....                      | 53 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 3.7: GEOMETRIA COM MEDIDAS VARIÁVEIS EM Z MRSNO.....                              | 55 |
| FIGURA 3.8: GEOMETRIA COM MEDIDAS VARIÁVEIS EM Y MRSNO.....                              | 55 |
| FIGURA 3.9: FLUXOGRAMA DE OTIMIZAÇÃO.....  | 57 |
| FIGURA 3.10: FLUXO LÓGICO DO GA. ....  | 58 |
| FIGURA 3.11: GEOMETRIA MSRNO COM MALHA APLICADA.....                                     | 61 |
| FIGURA 3.12: GEOMETRIA FLUID 221.....  | 61 |
| FIGURA 3.13: APARATO EXPERIMENTAL COM PROTÓTIPO SRSO <sub>(GE)</sub> . ....              | 66 |
| FIGURA 3.14: PLACA DE AQUISIÇÃO. ....  | 67 |
| FIGURA 3.16: INTERFACE DE AQUISIÇÃO COM COERÊNCIA DO SINAL.....                          | 68 |
| FIGURA 3.17: INTERFACE DE AQUISIÇÃO COM COERÊNCIA DO SINAL.....                          | 68 |
| FIGURA 3.18: GERADOR USADO NA MEDIÇÃO NORMATIVA.....                                     | 70 |
| FIGURA 3.19: SONÔMETRO INTEGRADOR (CLASSE 1).....  | 70 |
| FIGURA 3.20: SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....   | 71 |
| FIGURA 3.21: FLUXOGRAMA METODOLÓGICO COMPLETO. ....                                      | 73 |
| FIGURA 4.1: DESENHO TÉCNICO VISTA A-A EM CORTES MRSO <sub>(AR)</sub> . ....              | 76 |
| FIGURA 4.2: DESENHO TÉCNICO VISTA B-B E C-C EM CORTES MRSO <sub>(AR)</sub> . ....        | 76 |
| FIGURA 4.3: DESENHO TÉCNICO VISTA A-A EM CORTES MRSO <sub>(GE)</sub> . ....              | 77 |
| FIGURA 4.4: DESENHO TÉCNICO VISTA A-A EM CORTES MRSO <sub>(GE)</sub> . ....              | 77 |
| FIGURA 4.5: EVOLUÇÃO DO COMPRIMENTO DAS CÂMARAS 1 E 2 (MM) – MRSO <sub>(AR)</sub> . .... | 78 |
| FIGURA 4.6: EVOLUÇÃO DOS DIÂMETROS DOS FUROS 1 E 2 (MM) – MRSO <sub>(AR)</sub> . ....    | 78 |
| FIGURA 4.7: EVOLUÇÃO DOS OFFSETS DOS FUROS 1 E 2 (MM) – MRSO <sub>(AR)</sub> . ....      | 79 |
| FIGURA 4.8: CONVERGÊNCIA DA TL MÉDIA E MÁXIMA – MRSO <sub>(AR)</sub> . ....              | 79 |
| FIGURA 4.9: TL – GERAÇÃO 37 – MRSO <sub>(AR)</sub> . ....                                | 80 |
| FIGURA 4.10: TL – MELHOR INDIVÍDUO – MRSO <sub>(AR)</sub> . ....                         | 80 |
| FIGURA 4.11: DISTRIBUIÇÃO DA TL POR INDIVÍDUO E GERAÇÃO – MRSO <sub>(AR)</sub> . ....    | 81 |
| FIGURA 4.12: DIVERSIDADE GENÉTICA: OFFSET DOS FUROS – MRSO <sub>(AR)</sub> . ....        | 81 |
| FIGURA 4.13: DIVERSIDADE GENÉTICA: DIÂMETRO DOS FUROS – MRSO <sub>(AR)</sub> . ....      | 82 |
| FIGURA 4.14: DIVERSIDADE GENÉTICA: COMPRIMENTO DAS CÂMARAS – MRSO <sub>(AR)</sub> . .... | 82 |
| FIGURA 4.15: CONVERGÊNCIA DA TL MÉDIA E MÁXIMA – MRSO <sub>(GE)</sub> . ....             | 83 |
| FIGURA 4.16: DISTRIBUIÇÃO DA TL POR INDIVÍDUO E GERAÇÃO – MRSO <sub>(GE)</sub> . ....    | 83 |
| FIGURA 4.17: TL – GERAÇÃO 21 – MRSO <sub>(GE)</sub> . ....                               | 84 |
| FIGURA 4.18: MELHOR INDIVÍDUO – MRSO <sub>(GE)</sub> . ....                              | 84 |
| FIGURA 4.19: EVOLUÇÃO DOS COMPRIMENTOS DAS CÂMARAS – MRSO <sub>(GE)</sub> . ....         | 85 |
| FIGURA 4.20: EVOLUÇÃO DOS DIÂMETROS DOS FUROS – MRSO <sub>(GE)</sub> . ....              | 85 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 4.21: EVOLUÇÃO DOS OFFSETS DOS FUROS – $MRSO_{(GE)}$ .....                | 86 |
| FIGURA 4.22: DIVERSIDADE GENÉTICA: COMPRIMENTO DAS CÂMARAS – $MRSO_{(GE)}$ ..... | 86 |
| FIGURA 4.23: DIVERSIDADE GENÉTICA: DIÂMETRO DOS FUROS – $MRSO_{(GE)}$ .....      | 87 |
| FIGURA 4.24: DIVERSIDADE GENÉTICA: OFFSET DOS FUROS – $MRSO_{(GE)}$ . ....       | 87 |
| FIGURA 4.25 CURVA TL ÓTIMA PYMAPDL PYMOO X MATLAB. ....                          | 88 |
| FIGURA 4.26: NÍVEL DE PRESSÃO SONORA NO $MRSO_{(GE)}$ .....                      | 89 |
| FIGURA 4.27: CURVAS DE TL ÓTIMAS PARA AR E GÁS DE ESCAPE. ....                   | 90 |
| FIGURA 4.28: TL EXPERIMENTAL E SIMULADA DO $SRSO_{(GE)}$ E $MRSO_{(GE)}$ . ....  | 91 |
| FIGURA 4.29: COERÊNCIA ENTRE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA.....                       | 92 |
| FIGURA 4.30: TL ENTRE $SRSO_{(GE)}$ E SCNO. ....                                 | 93 |
| FIGURA 4.31: DISPOSIÇÃO DOS MICROFONES.....                                      | 95 |
| FIGURA 4.32: REGISTROS FOTOGRÁFICOS NORMATIVO.....                               | 97 |
| FIGURA 4.33: $SRSO_{(GE)}$ CONJUNTO, MONTAGEM E COMPONENTES. ....                | 99 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| TABELA 2.1: COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS NUMÉRICOS. ....              | 37 |
| TABELA 2.2: COMPARATIVO DAS TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO. ....           | 39 |
| TABELA 3.1: PLANILHA DE VARIÁVEIS DO GA. ....                      | 54 |
| TABELA 3.2: PLANILHA DE VARIÁVEIS DO GA. ....                      | 56 |
| TABELA 3.3: PLANILHA DE LIMITES DE VARIÁVEIS DO GA. ....           | 58 |
| TABELA 3.4: ESTRATÉGIAS IMPLEMENTADAS DA GA. ....                  | 63 |
| TABELA 3.5: RESULTADOS EXPERIMENTAIS ESPERADOS. ....               | 64 |
| TABELA 3.6: RESULTADOS ANALÍTICOS ESPERADOS. ....                  | 65 |
| TABELA 3.7: RESULTADOS EXPERIMENTAIS ESPERADOS. ....               | 69 |
| TABELA 3.8: RESULTADOS NORMATIVOS ESPERADOS. ....                  | 72 |
| TABELA 3.9: RESULTADOS ECONÔMICOS ESPERADOS. ....                  | 72 |
| TABELA 4.2: RESUMO DE RÉPLICAS $MRSO_{(AR)}$ . ....                | 74 |
| TABELA 4.3: RESUMO DE RÉPLICAS $MRSO_{(GE)}$ . ....                | 74 |
| TABELA 4.5: RESUMO DE RÉPLICAS TIPOS DE MUTAÇÃO. ....              | 75 |
| TABELA 4.6: RESULTADOS MELHORES SOLUÇÕES. ....                     | 75 |
| TABELA 4.7: CONVERGÊNCIA DOS DIÂMETROS INTERNOS NAS RÉPLICAS. .... | 88 |
| TABELA 4.8: NÍVEL DE PRESSÃO SONORA (A) EM CADA PONTO. ....        | 96 |
| TABELA 4.9: NÍVEL DE PRESSÃO SONORA (A) MÉDIA LOGARÍTMICA. ....    | 96 |
| TABELA 4.10: CONSUMO DE CHAPA E CUSTO ESTIMADO. ....               | 98 |
| TABELA 4.11: COMPARAÇÃO DO TEMPO DE PROCESSAMENTO. ....            | 98 |

# SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                         | <b>16</b> |
| 1.1      | GERADORES.....                                  | 18        |
| 1.2      | MOTIVAÇÃO .....                                 | 20        |
| 1.3      | JUSTIFICATIVA.....                              | 21        |
| 1.4      | ESTUDO DE CASO .....                            | 22        |
| 1.4.1    | Estado da arte.....                             | 22        |
| 1.4.2    | Proposta de melhoria .....                      | 24        |
| 1.5      | OBJETIVO GERAL .....                            | 25        |
| 1.6      | PRINCIPAIS ETAPAS.....                          | 25        |
| 1.7      | ESTRUTURA DO TRABALHO.....                      | 26        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>              | <b>27</b> |
| 2.1      | FUNDAMENTOS DE SILENCIADORES.....               | 28        |
| 2.1.1    | Considerações físicas.....                      | 28        |
| 2.1.2    | Parâmetros acústicos.....                       | 28        |
| 2.1.3    | Classificações .....                            | 30        |
| 2.2      | PROJETO DE SILENCIADORES.....                   | 35        |
| 2.2.1    | Simulação aplicada .....                        | 35        |
| 2.2.2    | Otimização aplicada .....                       | 37        |
| 2.2.3    | Algoritmo Genético aplicado.....                | 40        |
| 2.3      | CERTIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO EM SILENCIADORES ..... | 43        |
| 2.3.1    | Técnicas experimentais.....                     | 43        |
| 2.3.2    | Certificação <i>in situ</i> .....               | 44        |
| 2.3.3    | Base normativa .....                            | 44        |
| 2.4      | HIPÓTESES DE PESQUISA .....                     | 45        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>                         | <b>46</b> |
| 3.1      | VISÃO GERAL DA METOLOGIA.....                   | 46        |
| 3.1.1    | Caracterização e diretrizes.....                | 46        |
| 3.1.2    | Escopo e etapas.....                            | 46        |
| 3.2      | FERRAMENTAS E MATERIAIS.....                    | 47        |
| 3.3      | DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....                     | 47        |
| 3.3.1    | Hipóteses de aplicação.....                     | 47        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.3.2    | Hipóteses de simplificadoras .....              | 49        |
| 3.3.3    | Função objetivo .....                           | 50        |
| 3.4      | PROPOSTA E MODELAGEM PARAMÉTRICA .....          | 51        |
| 3.4.1    | Descrição da simplificação .....                | 51        |
| 3.4.2    | Descrição silenciador .....                     | 53        |
| 3.4.3    | Descrição modelo .....                          | 53        |
| 3.4.4    | Parametrização do modelo .....                  | 54        |
| 3.5      | PROCEDIMENTO INTEGRADO DE OTIMIZAÇÃO .....      | 55        |
| 3.5.1    | Otimizador principal .....                      | 57        |
| 3.5.2    | Evoluir população .....                         | 59        |
| 3.5.3    | Gerar executável .....                          | 60        |
| 3.5.4    | Rodar ANSYS MAPDL .....                         | 62        |
| 3.5.5    | Ler TL .....                                    | 62        |
| 3.5.6    | Plotar resultados .....                         | 63        |
| 3.5.7    | Resumo dos parâmetros de GA .....               | 63        |
| 3.6      | CONSOLIDAÇÃO E INVESTIGAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO ..... | 63        |
| 3.7      | COMPARAÇÃO NUMÉRICA .....                       | 65        |
| 3.8      | VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL .....                    | 65        |
| 3.8.1    | Material experimental .....                     | 66        |
| 3.8.2    | Processo experimental .....                     | 67        |
| 3.8.3    | Análise experimental .....                      | 69        |
| 3.9      | CERTIFICAÇÃO NORMATIVA .....                    | 69        |
| 3.9.1    | Material normativo .....                        | 70        |
| 3.9.2    | Processo normativo .....                        | 71        |
| 3.9.3    | Análise normativa .....                         | 72        |
| 3.10     | ANÁLISE DE VIABILIDADE .....                    | 72        |
| 3.11     | SÍNTESE METODOLÓGICA .....                      | 73        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS .....</b>                         | <b>74</b> |
| 4.1      | CONSOLIDAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO .....                | 74        |
| 4.2      | INVESTIGAÇÃO DE DESEMPENHO DA OTIMIZAÇÃO .....  | 77        |
| 4.2.1    | Análise gráfica $MRSO_{(AR)}$ .....             | 78        |
| 4.2.2    | Análise gráfica $MRSO_{(GE)}$ .....             | 82        |
| 4.2.3    | Capacidade de convergência .....                | 87        |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| 4.3  | RESULTADOS NUMÉRICOS.....               | 89         |
| 4.3.1  | Análise pressão sonora .....            | 89         |
| 4.3.2  | Influência temperatura na TL .....      | 90         |
| 4.4  | RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....          | 91         |
| 4.5  | RESULTADOS NORMATIVOS .....             | 95         |
| 4.6  | RESULTADOS ECONÔMICOS .....             | 97         |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÃO.....</b>                   | <b>100</b> |
| 5.1  | DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....            | 100        |
| 5.2  | DISCUSSÃO FINAL .....                   | 101        |
| 5.3  | SUGESTÃO TRABALHOS FUTUROS .....        | 101        |
| <b>6</b>   | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b> | <b>102</b> |
| <br><b>APÊNDICE</b>                                  |   |            |
| <b>APÊNDICE A – ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....</b>       |   |            |
|  |   | <b>106</b> |
| <b>APÊNDICE B – EQUIVALÊNCIA VADD VGLUE.....</b>     |   |            |
|  |   | <b>108</b> |
| <b>APÊNDICE C – TEMPO COMPUTACIONAL.....</b>         |   |            |
|  |   | <b>110</b> |
| <b>APÊNDICE D – CONFIGURAÇÕES EXPERIMENTAIS.....</b> |   |            |
|  |   | <b>111</b> |
| <b>APÊNDICE E – CÓDIGO SCRIPT EM MATLAB.....</b>     |   |            |
|  |   | <b>113</b> |
| <br><b>ANEXO</b>                                     |   |            |
| <b>ANEXO A – ABNT NBR ISO 8528-10.....</b>           |   |            |
|  |   | <b>129</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

O som é uma onda mecânica que se propaga em meios e materiais, transportando energia sem deslocamento de massa. A acústica, por sua vez, é o campo da física que estuda a geração, transmissão e recepção dessas ondas, abrangendo tanto fenômenos físicos quanto aspectos perceptivos. Nesse contexto, ruído é definido como qualquer som indesejado, desagradável ou prejudicial, capaz de provocar desconforto, irritação, perda auditiva ou impactos ambientais e sociais (BISTAFA, 2006).

O controle de ruído tem ganhado crescente relevância nas últimas décadas, impulsionado por exigências normativas, preocupações com a saúde ocupacional e avanços tecnológicos. Trata-se de um campo interdisciplinar que reúne conhecimentos da engenharia, física e biologia, voltado à atenuação do som em meios fluidos e sólidos. Na perspectiva industrial, o ruído é frequentemente tratado como subproduto indesejado, associado à vibração, fluxo de gases e ao funcionamento de máquinas rotativas (BISTAFA, 2006).

A geração de energia constitui elemento essencial para o desenvolvimento socioeconômico, uma vez que nenhum processo produtivo ocorre sem o aporte energético — princípio fundamental da termodinâmica. Nesse contexto, destacam-se os motores de combustão interna (MCI), amplamente empregados em geradores. Esses motores promovem a rotação do eixo do sistema, o qual está conectado a uma excitatriz responsável por gerar a indução eletromagnética que resulta na produção de eletricidade.

Entretanto, esses sistemas representam fontes significativas de ruído, devido às intensas variações de pressão e temperatura presentes nos processos de admissão, combustão e exaustão, que envolvem fluxos de combustíveis e comburentes (ar atmosférico). Em ciclos termodinâmicos complexos, esses apresentam condições dinâmicas específicas que influenciam diretamente a eficiência e emissão sonora (ÇENGEL; BOLES, 2006).

O ruído gerado pelo MCI é particularmente intenso na fase de escape, sendo sua mitigação viabilizada por silenciadores projetados com base em princípios acústicos. Como destaca Brunetti (2012), o sistema de exaustão é um dos principais responsáveis pelo nível de ruído irradiado por motores, tanto em aplicações estacionárias quanto veiculares, exigindo soluções integradas entre a termodinâmica e a acústica.

A globalização e o crescimento urbano têm acelerado a necessidade por fontes confiáveis de energia elétrica, especialmente em contextos industriais, hospitalares e

infraestrutura crítica. Em muitas regiões, a geração descentralizada por meio de grupos geradores tornou-se essencial, sobretudo onde há instabilidades na rede elétrica ou ausência de fornecimento público. No entanto, essa demanda crescente impõe o desafio de mitigar impactos relacionados ao ruído, vibração e emissões (ÇENGEL; BOLES, 2006).

Consequentemente, a busca por soluções mais sustentáveis tem motivado o desenvolvimento de tecnologias acústicas que, além de atenderem às normas de controle de ruído, contribuam para a redução dos custos de fabricação, instalação e manutenção dos sistemas. Nesse cenário, destacam-se os silenciadores, também conhecidos como *mufflers*, dispositivos instalados na linha de escape de MCI com o objetivo de atenuar a emissão sonora, sem comprometer o desempenho do sistema (OH; LEE, 2022).

O desenvolvimento desses equipamentos acompanhou a evolução dos motores, especialmente no setor automotivo. Os primeiros silenciadores surgiram no final do século XIX, baseando-se na manipulação da geometria interna para promover a reflexão e a interferência destrutiva, caracterizando o modelo reativo. Com o tempo, foram introduzidos materiais absorventes, responsáveis por dissipar a energia sonora por meio da fricção viscosa, definindo o modelo resistivo. Posteriormente, consolidou-se a combinação de ambas as abordagens mais usada na atualidade (LIMA; LENZI; BARBIERI, 2006).

Durante as décadas de 1970 e 1980, o projeto desses dispositivos era conduzido por métodos analíticos simplificados, baseados em gráficos empíricos, tabelas dimensionais e correlações, dimensionava-se as câmaras, tubos de conexão e elementos dissipativos utilizando relações geométricas clássicas (TERASHIMA et al., 2022).

Com o avanço da computação nas décadas seguintes, a simulação numérica passou a desempenhar papel central no projeto de silenciadores como o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o da Matriz de Transferência (MMT) tornaram-se amplamente empregados para prever o comportamento acústico de geometrias complexas, proporcionando maior precisão e flexibilidade na fase de desenvolvimento (FU et al., 2015).

Mais recentemente, a aplicação dessas simulações tem sido potencializada por técnicas de otimização, como o Algoritmo Genético (GA), que permitem projetar silenciadores com desempenho superior em função das características espectrais. Tais abordagens reduzem a necessidade de iterações manuais e promovem soluções mais eficazes do ponto de vista construtivo (CHIU; CHANG, 2008).

## 1.1 Geradores

Os grupos geradores (GMG) são equipamentos industriais destinados à conversão de energia mecânica em energia elétrica, sendo amplamente utilizados em situações diversas. São compostos, por um motor de combustão interna — responsável pela geração de potência mecânica — acoplado a um alternador síncrono (AS), que converte o torque em eletricidade. A operação desses motores pode empregar combustíveis, como diesel, biodiesel, gás natural e biogás, cujas propriedades afetam seu desempenho (MASCARELLO, 2019).

A utilização de grupos geradores apresenta diferentes aplicações: fornecimento de energia em caso de falhas da rede pública, suprimento principal em locais remotos e operação em horário de ponta — quando as tarifas são elevadas —, nesse último caso, uma alternativa viável frente ao custo da concessionária. Esses sistemas são empregados em indústrias, hospitais, comércios e edificações de grande porte (MASCARELLO, 2019).

A instalação de grupos geradores pode variar conforme o layout e necessidade. Em aplicações operacionais externas ou mobilidade de locação, é comum o uso de invólucros envolventes também conhecidos como carenagens metálicas, que garantem logística ágil e proteção contra intempéries. A Figura 1.1 ilustra um gerador em uma carenagem metálica.

Figura 1.1: Layout grupo gerador no invólucro.



FONTE: BRG, Nossos produtos SLIM 550. Disponível no endereço eletrônico <https://brggeradores.com.br/slim/>. Acesso em 08 de junho de 2025.

Outro layout comum é o modelo aberto, também conhecido como base de alvenaria, utilizado em salas e locais com estrutura predial previamente construída para essa finalidade, conforme ilustrado na Figura 1.2. Nesse caso, as proteções e demais componentes são integrados à edificação.

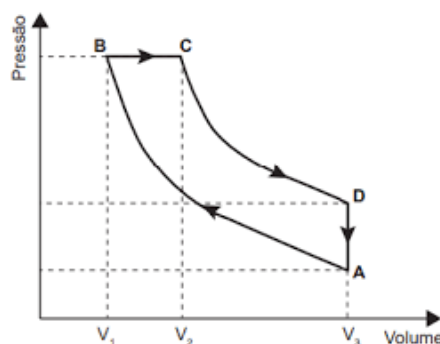
Figura 1.2: Layout grupo gerador aberto.



FONTE: BRG, Nossos produtos ALVENARIA SCANIA. Disponível no endereço eletrônico <https://brggeradores.com.br/alvenaria/>. Acesso em 07 de junho de 2025.

A potência dos geradores é produzida por MCI que operam em ciclos termodinâmicos, como ilustrado na Figura 1.3. O combustível mais usual é o diesel, cuja energia é convertida em trabalho útil, com vibração e ruído indesejável (DUARTE; SIMÕES, 2000).

Figura 1.3: Ciclo Diesel.



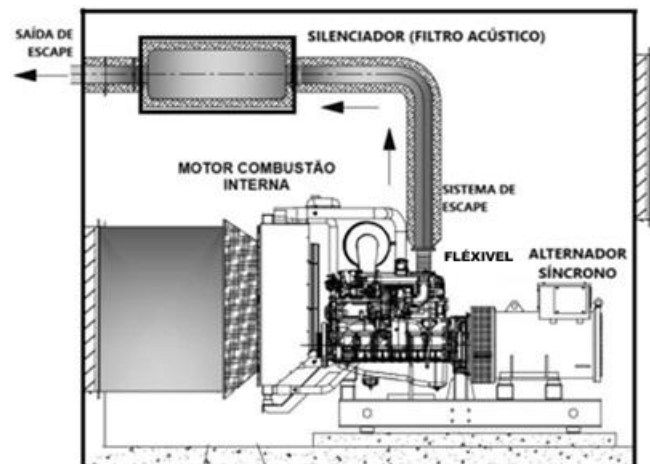
FONTE: Adaptado de Brunetti (2012).

Assim sendo, o mais comum ciclo Diesel em GMG inicia-se com compressão adiabática, seguida da injeção de combustível sob pressão constante, que promove a combustão espontânea. A expansão subsequente gera o movimento, enquanto a exaustão libera gases em altas temperaturas e vazão. Apesar da elevada eficiência, esses motores são responsáveis por significativa emissão sonora, especialmente nas fases de admissão e escape, a partir da elevada taxa de compressão característica do ciclo (BRUNETTI, 2012).

O trabalho útil resulta do movimento alternado, transformado em rotação por meio de biela-manivela. Essa força é transmitida ao volante de inércia acoplada ao eixo, que operam sem variação de velocidades, mantendo rotação em 1500/1800 rpm no AS, responsável pela

geração de energia elétrica na frequência 50/60 Hz (MASCARELLO, 2019). Enquanto isso, os gases de escape são ejetados para a atmosfera. Para mitigar o ruído gerado nesse tempo, é comum usar um silenciador, posicionado entre o flexível após a turbina em motores aspirados e o final da tubulação de descarga, conforme Figura 1.4.

Figura 1.4: Instalação típica de silenciador na saída de escape de MCI.



FONTE: Adaptado de BRG (2025).

## 1.2 Motivação

A motivação para este estudo decorre da vivência profissional do autor em uma empresa do setor de geração de energia e grupos geradores, que utilizam sistemas de escape equipados com silenciadores acústicos. Observou-se que o processo de seleção e aplicação desses dispositivos é conduzido, em grande parte, por métodos empíricos, baseados em tentativas sucessivas, sem o suporte de ferramentas modernas de análise.

Essa experiência profissional permitiu constatar os desafios associados ao dimensionamento acústico, bem como os impactos econômicos decorrentes da adoção de procedimentos não padronizados, os quais frequentemente resultam em retrabalho, atrasos e comprometimento da qualidade.

Essa lacuna entre a indústria e o conhecimento formal constituiu o principal impulso para o desenvolvimento desta pesquisa. Reconhecendo que os métodos atuais dessa indústria carecem de fundamentação científica e que os dados utilizados como referência são arbitrários, torna-se evidente a necessidade de uma abordagem mais precisa e sistemática.

### 1.3 Justificativa

A demanda energética global, aliado aos avanços em infraestrutura, tem impulsionado a adoção de sistemas de geração descentralizada como alternativa estratégica para suprir cargas de forma autônoma. Por outro lado, a presença de geradores em áreas urbanas e industriais impõe desafios significativos, sobretudo no controle do ruído durante a operação. Nesses cenários, o desempenho acústico torna-se um fator decisivo para a viabilidade técnica.

O ruído emitido por geradores em funcionamento contínuo frequentemente ultrapassa os limites recomendados, configurando um obstáculo relevante em ambientes urbanos densamente ocupados. A mitigação desses efeitos exige soluções de engenharia acústica, como os silenciadores, capazes de atenuar a transmissão sonora sem comprometer o desempenho do conjunto. Estratégias eficazes, portanto, devem integrar as particularidades construtivas dos motores às exigências normativas e ambientais.

Embora a mobilidade elétrica reduza o ruído veicular, ela também intensifica a demanda por geração estacionária confiável, sobretudo em estações de recarga rápida. Nessas condições, os grupos geradores permanecem essenciais como fontes suplementares ou emergenciais, especialmente em regiões com infraestrutura limitada, reforçando a necessidade de sistemas de controle de ruído mais eficientes.

Técnicas de otimização em silenciadores desponta como alternativa promissora, pois permite elevar o desempenho sem aumentar a complexidade estrutural. Em paralelo, a substituição gradual do diesel por combustíveis renováveis — como etanol, metano e hidrogênio — alteram o processo de combustão, e provoca apenas variações no espectro sonoro, ou seja, essas possibilitam o desenvolvimento de soluções acústicas adaptáveis.

O subdimensionamento acústico compromete a aceitabilidade ambiental, enquanto o sobredimensionamento afeta negativamente a viabilidade comercial de instalações em áreas críticas. No cenário de competitividade global, o projeto de silenciadores modernos não admite soluções ineficientes. Apesar dos avanços, ainda são escassas as pesquisas dedicadas a geometrias não convencionais de silenciadores, capazes de atender geradores compactos.

Nesse contexto, este trabalho busca preencher essa lacuna técnico-científica por meio do desenvolvimento de uma metodologia baseada em técnicas avançadas de projeto de silenciadores. Além disso, pretende contribuir indiretamente para o avanço da geração de energia sustentável e para as tendências de mobilidade elétrica, por meio da proposição de soluções mais eficientes de controle de ruído em grupos geradores.

## 1.4 Estudo de caso

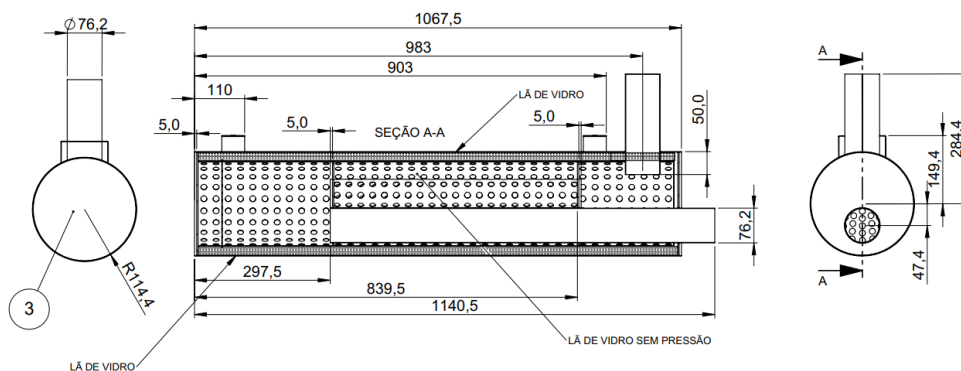
A ausência de critérios técnicos consistentes na aplicação de silenciadores em grupos geradores, observada em uma empresa do setor, constitui a motivação deste trabalho. Diante dessa lacuna, desenvolve-se um estudo aplicado sobre o controle acústico desses sistemas, contemplando a análise de modelos existentes e a proposição de soluções mais adequadas.

O estudo de caso concentra-se em um silenciador (combinado, com elementos reativos e resistivos) utilizado atualmente em uma indústria geradores carenados, cuja atenuação sonora média é estimada em 35 dB(A). Embora o dispositivo seja consolidado comercialmente no mercado, esse valor não é certificado, uma vez que o projeto resulta de engenharia reversa pouco confiável. Definido como SCNO (Silenciador Combinado Não Otimizado), uma vez que se parte da suposição que seu projeto não é ótimo (melhor entre todas as possibilidades).

### 1.4.1 Estado da arte

O ponto de partida é o SCNO, fornecido pela empresa e caracterizado por sua geometria complicada e alto custo de fabricação. A Figura 1.5 apresenta seu desenho atual, evidenciando a estrutura interna com três câmaras de expansão interligadas por tubos perfurados e defletores internos que promovem fluxo complexo. A utilização de material isolante, lã de vidro como absorvedor confirma o tipo combinado, com componentes reativos e resistivos.

Figura 1.5: Desenho técnico SCNO atual.

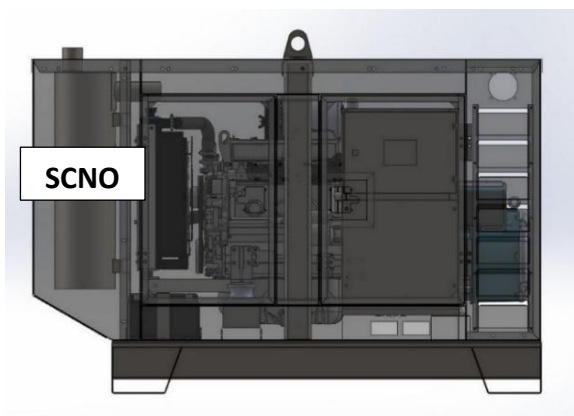


FONTE: Adaptado BRG (2025).

O fluxo de gases na estrutura interna inicia-se a jusante do motor de combustão interna, com pressão absoluta pós-coletor de escape do grupo gerador, até a entrada lateral do silenciador com diâmetro de 76,2 mm e comprimento projetado da circunferência de 170 mm. Em seguida, penetra na primeira câmara de expansão e segue em escoamento complexo por um tubo perfurado até a segunda câmara.

Na sequência, um segundo fluxo complexo inverso ao primeiro, e os gases retornam ao tubo perfurado até a terceira câmara, onde há nova expansão. Por fim, o fluxo sofre reversão em relação à segunda câmara e segue para a saída axial até o ambiente externo atmosférico, com diâmetro 76,2 mm e comprimento projetado da circunferência de 70 mm, localizada perpendicularmente à entrada. A Figura 1.6 ilustra o SCNO (à esquerda) em destaque, aplicado em GMG do estudo de caso, instalado em carenagem com ventilação e dutos de admissão.

Figura 1.6: Modelo vista lateral gerador carenado e SCNO atual.



FONTE: Adaptado BRG (2025).

A Figura 1.7 apresenta uma imagem real do equipamento montado, mostrando a robustez do sistema e a disposição das conexões e demais componentes.

Figura 1.7: Equipamento vista frontal gerador carenado e SCNO atual.



FONTE: Adaptado BRG (2025).

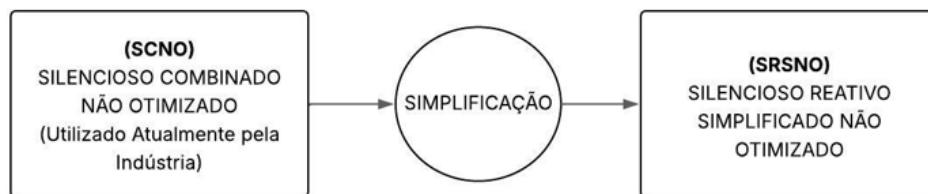
Este modelo com histórico comercial e industrial será adotado como referência técnica para fundamentar a análise proposta neste estudo. A partir dele, será concebido uma proposta de modelo conceitual sendo esse escopo do trabalho.

### 1.4.2 Proposta de melhoria

Uma vez que a aplicação do estudo ocorre em geradores carenados de baixo custo, a proposta toma como base o SCNO e prevê o desenvolvimento de uma versão simplificada dele, também de baixo custo, atendendo às expectativas da empresa. Essa versão está baseada em similaridade, mas apenas com elementos reativos e ainda não apresenta aprimoramento acústico, sendo denominada SRSNO (Silenciador Reativo Simplificado Não Otimizado).

Este silenciador é projetado com redução de impedância acústica dos materiais e estruturas internas singelas, mantendo a compatibilidade com a carenagem e o grupo gerador. Essa versão busca facilitar a fabricação, reduzir gastos e atender às exigências práticas, partindo da premissa: menor complexidade, maior ganho econômico. A Figura 1.8 apresenta uma visão geral do processo de simplificação que será adotado.

Figura 1.8: Fluxograma simplificação.



FONTE: Autoria própria (2025).

Dessa forma, a idealização do SRSNO assegura, preliminarmente, somente a diminuição de despesas e a agilidade no processo produtivo de manufatura da empresa, não garante o desempenho acústico ideal. Pelo contrário, simplificação e perda de material isolante pressupõem, previamente, aumento de ruído.

Assim, é necessário um processo de otimização (buscar melhor solução) no projeto para maximizar a atenuação e equiparar com a referência. O resultado desse processo é designado como SRSO (Silenciador Reativo Simplificado Otimizado). Conforme Figura 1.9.

Figura 1.9: Fluxograma otimização.



FONTE: Autoria própria (2025).

## 1.5 Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia de otimização para o projeto de silenciador acústico reativos, com foco em baixo custo, desempenho acústico elevado e viabilidade construtiva, capaz de alcançar resultados equivalentes ou superiores ao silenciador industrial do tipo combinado clássico do estudo de caso, com atenuação média estimada de 35 dB(A).

## 1.6 Principais etapas

Para atingir o objetivo geral do trabalho, listam-se as seguintes etapas:

- Realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre os fundamentos da acústica de silenciadores, abordando o funcionamento de dispositivos reativos, resistivos e combinados, e suas classificações e boas práticas de projeto.
- Estudar conceitos relacionados ao comportamento acústico de silenciadores, considerando variáveis geométricas, físicas e construtivas que influenciam a eficiência na atenuação, além dos parâmetros mais utilizados.
- Estudar e desenvolver técnicas de projeto, simulação e análise com o intuito de prever o desempenho de diferentes configurações de silenciadores.
- Implementar um sistema integrado de otimização com algoritmo e definir o método adequado à busca da melhor solução construtiva e do melhor desempenho.
- Analisar as equivalências entre ferramentas internas de otimização, certificar sistemas e algoritmos e realizar bibliometria para utilizar tendências científicas.
- Confirmar os dados estimados dos objetos do estudo de caso, com a finalidade de formalizar os parâmetros técnicos dos dispositivos utilizados na indústria.
- Realizar consolidação experimental com o intuito de avaliar a correspondência entre resultados teóricos e dados de desempenho dos modelos e silenciadores.
- Realizar validação normativa em campo, com o intuito de avaliar a eficácia entre o resultado ótimo global, em relação ao valor comercial atual.
- Realizar análise de viabilidade comparativa entre o silenciador comercial atual e a proposta de silenciador ótimo, em termos econômicos e de produtividade.

## 1.7 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, estruturados para conduzir o leitor desde os fundamentos teóricos até os resultados da metodologia proposta, delimitados pela introdução, conclusão e com complementos, conforme descrito a seguir:

O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, abordando o problema do ruído em grupos geradores a diesel e a aplicação de silenciadores. Inclui a motivação, a justificativa, a descrição do estudo de caso e os objetivos principais.

O Capítulo 2 reúne a revisão bibliográfica sobre acústica em dutos, silenciadores reativos, resistivos e combinados, além de ferramentas computacionais e abordagens recentes de modelagem, otimização e validação experimental. Também aprofunda temáticas necessárias para complementar a introdução.

O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada, abrangendo a definição do problema, a modelagem paramétrica, a seleção de ferramentas computacionais e a rotina de otimização com algoritmo, além dos critérios de avaliação e parâmetros físicos considerados. Esse capítulo redireciona e integra todas as técnicas utilizadas ao longo do texto.

O Capítulo 4 apresenta os resultados da pesquisa, incluindo resultados teóricos, simulações acústicas, testes de viabilidade geométrica e aplicação da rotina de otimização. São também apresentados os resultados consolidados da validação experimental, a validação normativa em campo e a análise de viabilidade econômica.

Por fim, o Capítulo 5 expõe a conclusão propondo considerações finais obtidas, com os resultados alcançados, sua relação com os objetivos propostos e a integração com os tópicos introduzidos inicialmente.

Como complemento, apêndices e anexos apresentam análises e descrições adicionais, externas ao texto principal, não constituindo parte dos objetivos centrais da dissertação, mas oferecendo aprofundamentos de interesse ao leitor.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica tem como objetivo consolidar os principais fundamentos teóricos, normativos e metodológicos que embasam o desenvolvimento e a otimização de silenciadores acústicos aplicados a grupos geradores a diesel. Para garantir um mapeamento rigoroso e representativo do estado da arte, foi realizada uma análise bibliométrica sistemática, descrita detalhadamente no Apêndice A, na qual se apresentam os critérios de seleção e classificação das referências utilizadas.

A revisão estrutura-se de forma a responder questões-chave que são fundamentais para o delineamento da metodologia e para a formulação das hipóteses da pesquisa. Entre essas questões, destacam-se: quais os tipos e classificações de silenciadores existentes; como projetar um silenciador eficaz; quais normas técnicas orientam sua aplicação em grupos geradores; quais as técnicas de medição acústica normativa mais indicada; e em que situações o ruído de fluxo se torna relevante na análise acústica. Além disso, discute-se quais técnicas numéricas são mais empregadas na simulação de desempenho acústico.

Outro eixo central da revisão envolve a identificação das principais abordagens de otimização utilizadas no projeto de silenciadores, destacando-se GA, bem como os softwares mais adotados para implementação dessas estratégias. A sistematização dessas informações permite não apenas a fundamentação técnica do estudo, mas também contribui para o alinhamento metodológico da pesquisa com práticas consolidadas na literatura, assegurando coerência científica e aplicabilidade prática.

## 2.1 Fundamentos de Silenciadores

### 2.1.1 Considerações físicas

O projeto desses dispositivos envolve uma abordagem multidisciplinar, integrando conceitos de acústica, escoamento compressível, transferência de calor e análise estrutural. Em grupos geradores a diesel, por exemplo, os silenciadores devem atender a requisitos de desempenho sonoro, térmico e estrutural, respeitando limites de contrapressão e restrições geométricas (YIMER; NALLAMOTHU, 2025).

Variáveis como vazão de escape e número de Mach influenciam diretamente a eficácia do silenciador. Escoamentos mais rápidos podem distorcer as ondas e gerar ruído aerodinâmico, reduzindo a atenuação. A influência do escoamento subsônico depende da configuração adotada; contudo, para números de Mach inferiores a 0,3, os efeitos do ruído de fluxo são desprezíveis, sendo viável a adoção de modelos simplificados, como lineares, sem correção aerodinâmica (FAN; GUO, 2016).

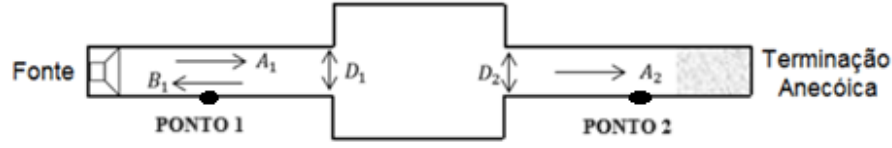
A escolha do tipo de silenciador deve considerar o espectro de ruído, o espaço disponível e a tolerância à perda de carga. Em ambientes externos com limitações físicas, os modelos combinados são vantajosos por atuarem em ampla faixa de frequências (FU et al., 2021). Huang, Wang e Li (2024) destacam que a configuração interna do silenciador influencia também sua estabilidade térmica e mecânica, reforçando a importância de um projeto adaptado às condições reais e práticas de operação.

### 2.1.2 Parâmetros acústicos

A perda de transmissão sonora é amplamente utilizada como parâmetro acústico de desempenho de silenciadores, sendo essencial na caracterização da atenuação de ruído em sistemas de exaustão. Trata-se de uma das abordagens mais robustas por sua principal vantagem: não depender da potência da fonte sonora, o que permite avaliar a eficiência do silenciador de forma isolada (SHAABAN et al., 2022).

Entretanto, uma designação mais utilizada para perda de transmissão é a Transmission Loss (TL). A Figura 2.1 apresenta um esquema teórico de uma câmara de expansão típica, no qual se observa a propagação de uma onda sonora incidente, representada por  $A_1$ , que sofre uma reflexão parcial  $B_1$  e gera uma onda transmitida  $A_2$ , a qual se propaga em direção a uma terminação anecóica ideal (com nenhuma reflexão de som). Esse modelo teórico, proposto por diversos autores, é amplamente utilizado na formulação do método do tipo quatro polos.

Figura 2.1: Aparato teórico para avaliação da TL.



FONTE: Adaptado de Garkauskas (2019).

A formulação matemática da TL parte da diferença entre o nível de potência sonora incidente  $L_{W_1}$  e o transmitido  $L_{W_2}$ , expressa na Equação 2.1:

$$TL = L_{W_1} - L_{W_2} \quad (2.1)$$

Sob condições ideais de propagação em regime harmônico (meio não viscoso, homogêneo e estacionário), a TL pode ser expressa como uma função da razão entre as amplitudes das ondas incidente e transmitida como na Equação 2.2:

$$TL = 20 \log_{10} \frac{A_1}{A_2} \quad (2.2)$$

Essa formulação básica pode ser estendida por meio do modelo de quatro polos, que permite relacionar as variáveis acústicas de entrada e saída de um sistema através de uma matriz de transferência. Essa abordagem é eficaz para sistemas com múltiplas seções, como em silenciadores reativos compostos por câmaras conectadas por tubos ou defletores.

Nesse contexto, a TL pode ser calculada com base nas amplitudes das ondas acústicas nos dois extremos do sistema e nas impedâncias características dos meios em que essas ondas se propagam. Para garantir maior clareza conceitual e evitar ambiguidades, adotam-se nesta dissertação os subscritos *sai* e *ent*, respectivamente, a saída e entrada do sistema.

Assim, define-se a amplitude da onda transmitida como na Equação 2.3:

$$A_{sai} = p_2 + U_2 Y_2 \quad (2.3)$$

em que  $p_2$  é a pressão acústica no plano de saída,  $U_2$  é a velocidade de partícula e  $Y_2$  é a impedância característica do meio após o silenciador. A equação expressa a composição da onda sonora que se propaga no sentido da saída, em direção à terminação anecóica.

Analogamente, a amplitude da onda na entrada é representada pela Equação 2.4:

$$A_{ent} = p_1 + U_1 Y_1 \quad (2.4)$$

Em que  $p_1$ ,  $U_1$  e  $Y_1$  são as grandezas correspondentes no plano de entrada do sistema. Essa forma garante a consistência com a teoria clássica de propagação de ondas planas em meios lineares, permitindo a decomposição em ondas progressivas.

As variáveis  $p_1$  e  $U_1$  podem ser obtidas a partir da matriz  $T$ , que relaciona as grandezas acústicas entre os dois planos conforme Equação 2.5:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_2 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Nessa equação, os coeficientes  $T_{ij}$  dependem das características geométricas e acústicas do sistema (como comprimento, seções, presença de perfurações, materiais absorventes, entre outros), bem como da frequência da excitação. Substituindo as Equações (2.3), (2.4) e (2.5) como formulação geral da TL, e reorganizando os termos, obtém-se a seguinte formulação:

$$TL = 20 \log_{10} \frac{[(A_{out}T_{11} + T_{12} \frac{A_{out}}{Y_2}) + (A_{out}T_{21} + T_{22} \frac{A_{out}}{Y_2}) Y_1]}{2A_{out}} \quad (2.6)$$

Essa expressão é conhecida como a forma matricial, sendo aplicável tanto em condições estacionárias quanto em situações com variação geométrica ao longo do sistema. Trata-se de uma equação geral, que pode ser resolvida numericamente ou experimental.

Vários autores, como Kumar e Munjal (2018), Suryawanshi et al. (2021), e Arslan et al. (2020), utilizaram esse método em conjunto com técnicas numéricas. Contudo, estudos mais recentes têm apontado limitações da TL em cenários de escoamento turbulento ou regimes de Mach elevados, nos quais há necessidade de incorporar efeitos do ruído de fluxo. Para aplicações em motores de combustão interna com escoamentos sônicos, recomenda-se a avaliação conjunta de Transmission Loss e perda de inserção (IL) para garantir maior fidelidade aos resultados (FAN; GUO, 2016).

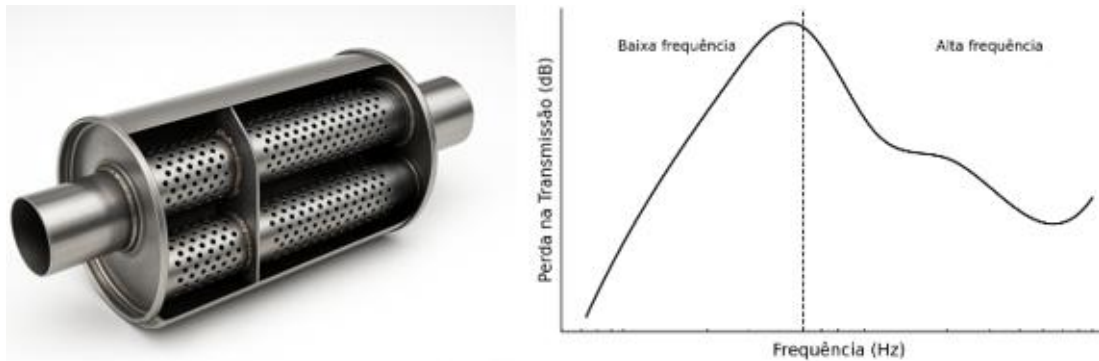
### 2.1.3 Classificações

Os sistemas de exaustão de MCI, necessitam do uso de silenciadores, para reduzir a propagação de ondas sonoras geradas pelo escape. esses são classificados, conforme seu funcionamento, em três categorias: reativos, resistivos e combinados.

Os silenciadores reativos operam com base na variação de impedância acústica, promovida por descontinuidades geométricas, câmaras de expansão e tubos perfurados, que geram múltiplas reflexões e interferências destrutivas das ondas sonoras, redirecionando parte da energia de volta à fonte (LIMA; LENZI; BARBIERI, 2011).

Para Lima, Lenzi e Barbieri (2011) esse tipo é especialmente eficaz em ruídos de baixas frequências, como os associados ao ciclo de exaustão. Sua eficiência está relacionada ao comprimento dos tubos, diâmetros das câmaras e à disposição dos elementos ao longo do trajeto acústico. A Figura 2.2 apresenta um de silenciador reativo, com sua curva.

Figura 2.2: Silencioso reativo e curva típica em baixa frequência.

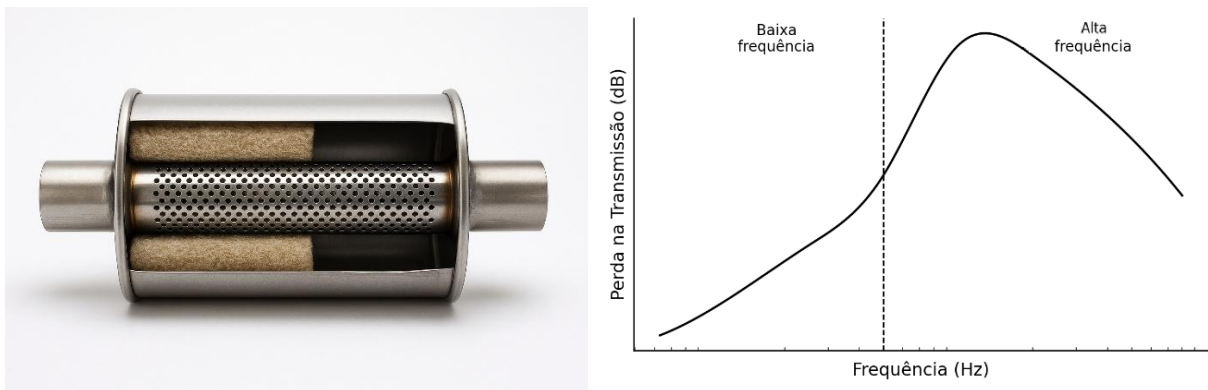


Fonte: Adaptado de Bistafa (2006).

Já os resistivos utilizam materiais porosos ou fibrosos no interior do duto com o objetivo de dissipar energia sonora por meio de perdas viscosas e térmicas. Ao atravessarem esses materiais (lã de vidro, rocha ou espuma) as partículas de ar oscilantes perdem energia por atrito com a estrutura interna, resultando na redução de ruído.

Esse tipo de silenciador apresenta melhor desempenho em médias e altas frequências, devido à menor impedância acústica dos materiais nessas faixas. A Figura 2.3 ilustra um exemplo típico de silenciador resistivo, com destaque para a disposição do material absorvente e sua interação com o fluxo de ar, além da correspondente curva característica em função da frequência (TERASHIMA et al., 2022).

Figura 2.3: Silencioso resistivo e curva típica em alta frequência.

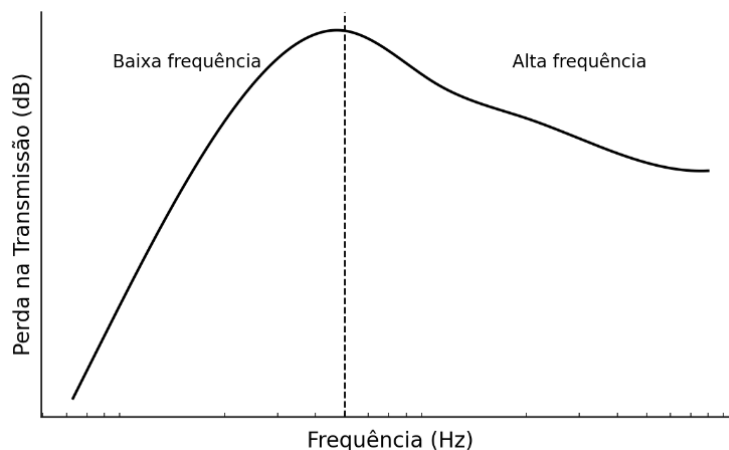


Fonte: Adaptado de Bistafa (2006).

Já os silenciadores combinados também chamados de híbridos integram os mecanismos de reflexão dos modelos reativos com as propriedades de absorção dos elementos resistivos, sendo projetados para ampliar a faixa de atuação acústica. Essa configuração é comum em aplicações industriais, onde a exigência de atenuação se estende por uma ampla gama de frequências (SHI; MAK, 2017). Como visto na

Figura 2.4:

Figura 2.4: Curva característica de silenciador combinado.

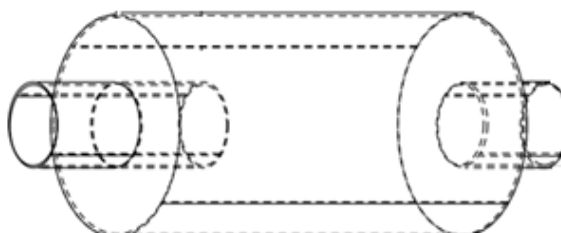


Fonte: Adaptado de Bistafa (2006).

Além da classificação funcional, também existe uma categorização baseada na disposição geométrica da entrada e saída, bem como o tipo de escoamento interno.

No caso dos modelos axiais, tanto a entrada quanto a saída estão alinhadas ao mesmo eixo longitudinal. Essa configuração é a mais tradicional, amplamente abordada na literatura devido à sua simplicidade construtiva e à facilidade de modelagem unidimensional. De acordo com Rafique et al. (2022), os silenciadores axiais apresentam bom desempenho na atenuação de ruídos em baixas frequências, mas, para ampliar sua eficácia em faixas médias e altas, é comum a incorporação de elementos resistivos. A Figura 2.5 ilustra essa configuração.

Figura 2.5: Silenciador com entrada axial.

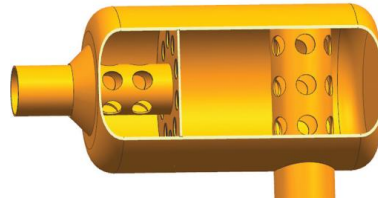


FONTE: Adaptado de Fan e Guo (2016).

Nos modelos laterais, a entrada é posicionada perpendicularmente ou em ângulo em relação ao eixo principal do silenciador. Embora essa configuração seja menos explorada na literatura técnica, é amplamente empregada em aplicações com restrições de espaço.

Segundo Lee (2015), a utilização de entrada lateral, combinada à presença de divisórias internas, modifica significativamente o padrão de propagação das ondas sonoras e a distribuição da pressão acústica nas câmaras internas. A Figura 2.6 detalha um modelo tridimensional de silenciador com entrada lateral, evidenciando sua maior complexidade estrutural.

Figura 2.6: Silenciador com entrada lateral.

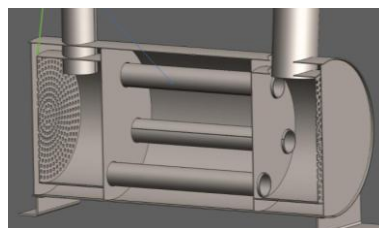


FONTE: Adaptado de Lee et al. (2016).

Na configuração ortogonal, a entrada e a saída estão dispostas em eixos perpendiculares, resultando em um escoamento perpendicular no interior do silenciador. Essa geometria induz mudanças bruscas na direção do fluxo de gases e das ondas sonoras logo na entrada, o que gera padrões complexos de reflexão e interferência e altera significativamente a distribuição da pressão acústica. Embora menos comum, essa disposição é eficaz em certos contextos em que o escoamento complexo pode contribuir para a atenuação sonora.

Zhang, Wu e Cheng (2022) ressaltam que, nesse tipo de configuração, a disposição espacial entre a entrada e a saída é um fator determinante para o desempenho acústico do sistema. A complexidade do escoamento e das interações entre as ondas sonoras torna indispensável o uso de modelagem tridimensional para uma análise precisa do campo acústico. A Figura 2.7 ilustra essa configuração, evidenciando os eixos ortogonais.

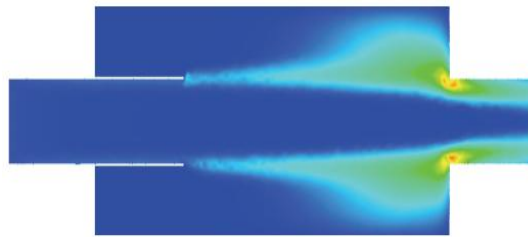
Figura 2.7: Silenciador com eixos ortogonais.



FONTE: Adaptado Zhang, Wu e Cheng (2022).

Os silenciadores também podem ser categorizados com base no escoamento interno. Um exemplo é o fluxo retilíneo, característico dos modelos axiais. De acordo com Cheng et al. (2024), essa configuração permite a condução direta, sem alteração no trajeto, sendo possível ainda a inclusão de prolongamentos nos tubos e conectores entre câmaras, elementos que influenciam diretamente na resposta acústica. A Figura 2.8 apresenta um escoamento retilíneo, com variação da velocidade no eixo principal.

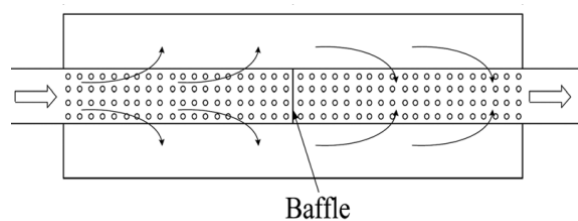
Figura 2.8: Silenciador fluxo retilíneo.



FONTE: Adaptado Cheng et al. (2024).

Outro tipo é o escoamento cruzado, caracterizado pelo fluxo lateral entre câmaras, geralmente obtida por defletores internos ou dutos transversais. Essa configuração aumenta o percurso das ondas sonoras, favorecendo a dissipação e a atenuação em altas frequências. Conforme Li et al. (2022), também oferece maior flexibilidade no dimensionamento das câmaras internas. A Figura 2.9 mostra esse tipo de escoamento, com setas indicando a estagnação e o redirecionamento.

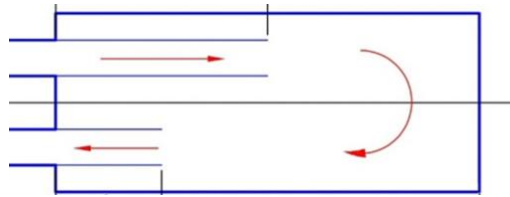
Figura 2.9: Silenciador com fluxo cruzado.



FONTE: Adaptado Li et al. (2022).

O fluxo com reversão se caracteriza pela mudança deliberada da direção do escoamento, obrigando os gases a percorrerem um trajeto mais longo até a saída. Isso prolonga o caminho acústico e intensifica a dissipação sonora por reflexão e interferência. De acordo com Chiu e Chang (2008), quando os pontos de reversão e os volumes intermediários são bem projetados, é possível obter alto desempenho mesmo sem materiais absorventes. A Figura 2.10 exemplifica esse tipo de escoamento, com setas indicando a estagnação e redirecionamento do fluxo.

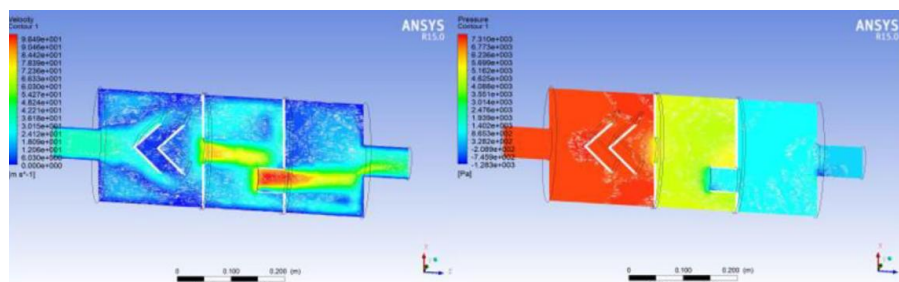
Figura 2.10: Silenciador com fluxo revertido.



FONTE: Adaptado Chiu e Chang (2008).

Por fim, geometrias híbridas ou complexas podem incluir múltiplas câmaras assimétricas, defletores deslocados, tubos inclinados ou entradas não ortogonais, intensificando os mecanismos de dissipação sonora. Na Figura 2.11 observa-se uma simulação dessa configuração, com corte transversal: à esquerda, a escala de cores indica a velocidade do escoamento; à direita, a distribuição de temperatura.

Figura 2.11: Silenciador escoamento complexo.



FONTE: Adaptado (HE et al., 2025).

## 2.2 Projeto de silenciadores

### 2.2.1 Simulação aplicada

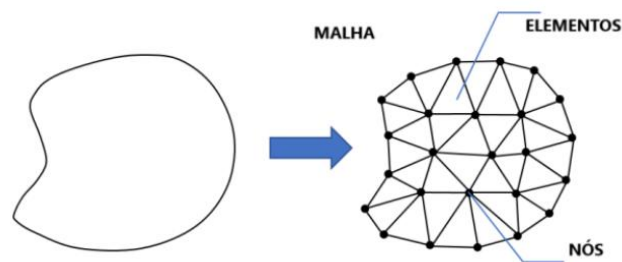
As simulações numéricas têm se consolidado como ferramentas essenciais no desenvolvimento de silenciadores, principalmente diante das exigências de desempenho em espaços reduzidos e faixas de frequência específicas. Ao possibilitarem a análise virtual de diferentes geometrias e condições operacionais, essas técnicas reduzem significativamente a necessidade de protótipos nas fases (LIMA; LENZI; BARBIERI, 2006).

Entre os principais métodos utilizados, destacam-se o MEF, o Método da Matriz de Transferência (MMT) e o Método dos Elementos de Contorno (MEC). Cada um apresenta vantagens e limitações que devem ser consideradas conforme a geometria, o regime acústico e os objetivos do projeto (XUE et al., 2020).

O MEF é amplamente adotado por sua capacidade de representar geometrias complexas, materiais heterogêneos e condições de contorno variadas. Estudos demonstram que o seu uso é eficaz para analisar a distribuição espacial da pressão e da velocidade acústica em modelos tridimensionais, incluindo silenciadores com entrada lateral, reversão de fluxo ou múltiplas câmaras (TERASHIMA et al., 2022).

A divisão em elementos finitos é fundamental nas simulações acústicas para cálculo da TL. Na Figura 2.12, observa-se a conversão da geometria contínua do silenciador em uma malha de nós e elementos, processo que transforma as equações diferenciais da propagação sonora em um sistema algébrico numérico (LIMA; LENZI; BARBIERI, 2006). A precisão depende da qualidade da malha e da relação entre o tamanho dos elementos e o comprimento de onda (XUE et al., 2020). A Figura 2.12 demonstra a estrutura da malha.

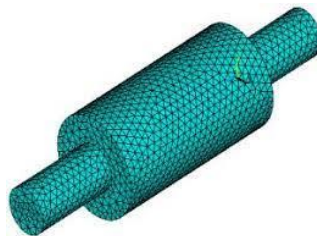
Figura 2.12: Definição da malha, elementos e nós.



FONTE: Adaptado de Silva e Fagundes Neto (2024).

A Figura 2.13 exemplifica esse processo da geometria em um silenciador axial simples por meio da geração de elementos de malha. Esse procedimento é fundamental para a aplicação do MEF, permitindo a representação e a obtenção de resultados com maior precisão.

Figura 2.13: Elementos de malha em silenciador axial simples.



FONTE: Adaptado de ANSYS MAPDL (2025).

Já o Método da Matriz de Transferência é mais indicado para geometrias axiais e simétricas, nas quais o fluxo é assumido como unidimensional. Sua principal vantagem é a agilidade computacional. Estudos como os de Xue et al. (2020) e Mehdizadeh e Paraschivoiu

(2005) evidenciam a boa precisão do MMT em sistemas compostos por tubos perfurados e câmaras de expansão, desde que as simplificações assumidas não comprometam o fenômeno físico em análise. Outros autores, como Barbieri, Barbieri e Lima (2015), também exploraram a integração do MMT com heurísticas de otimização e modelos analíticos.

O Método dos Elementos de Contorno é mais indicado para simulações de radiação acústica em meios externos, como a emissão de ruído em campo livre. É especialmente útil na análise da interação sonora com obstáculos e superfícies reflexivas, aplicando-se em estudos de barreiras acústicas e dispersão sonora. Contudo, o MEC não é recomendado para domínios internos com geometria complexa ou elevada não linearidade, além de exigir malhas de contorno refinadas (BARBIERI; BARBIERI; LIMA, 2015).

Abordagens híbridas também têm sido exploradas, combinando MEF (para o domínio interno) com MEC (para o domínio externo), com o objetivo de unir as vantagens de ambas as técnicas. Estudos como o de Fu et al. (2021) destacam essa integração como uma alternativa eficaz para modelar silenciadores com entradas laterais ou defletores assimétricos.

A escolha do método mais adequado deve considerar fatores como complexidade geométrica, frequência de interesse, tipo de material, efeitos de escoamento e condições reais. A Tabela 2.1 apresenta um comparativo entre os principais métodos abordados, com base em aplicabilidade e custo computacional (BUGARU; VASILE, 2024).

Tabela 2.1: Comparativo entre métodos numéricos.

| <b>MÉTODO</b> | <b>APLICABILIDADE</b>             | <b>CUSTO</b> | <b>VANTAGENS</b>                | <b>LIMITAÇÕES</b>             |
|---------------|-----------------------------------|--------------|---------------------------------|-------------------------------|
| MEF           | Geometrias complexas              | Alto         | Alta precisão                   | Requer malhas densas e tempo  |
| MMT           | Geometrias axiais, simples        | Baixo        | Simplicidade e rapidez          | Limitado a geometrias simples |
| MEC           | Radiação acústica em campo aberto | Médio        | Alta precisão em campos abertos | Ineficaz em domínios internos |
| MEF - MEC     | Modelagem combinada               | Alto         | Modelagem completa              | Complexidade de implementação |

FONTE: Autoria própria (2025).

### 2.2.2 Otimização aplicada

Com o aumento da complexidade geométrica e da demanda por silenciadores compactos e de alto desempenho, os métodos de otimização tornaram-se essenciais no projeto acústico. Essas técnicas permitem explorar amplos espaços de projeto, identificando geometrias que maximizam a TL, ao mesmo tempo que minimizam o custo.

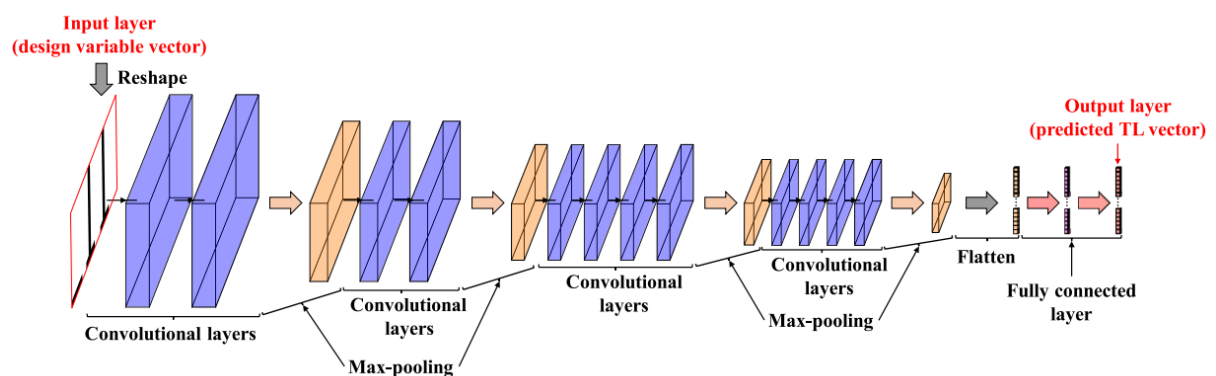
Além dos Algoritmos Genéticos mais comum em aplicações de silenciadores, diversas estratégias de busca global e técnicas híbridas têm sido aplicadas com sucesso no desenvolvimento de silenciadores (LIMA; LENZI; BARBIERI, 2011).

Dentre elas, destaca-se o método *Particle Swarm Optimization* (PSO), especialmente eficaz em problemas com múltiplas variáveis contínuas. Shen e Hou (2017), por exemplo, aplicaram o PSO na calibração de parâmetros internos de silenciadores reativos voltados a veículos leves. Segundo Fan e Guo (2016), esse apresenta bom desempenho quando acoplado a simulações numéricas, desde que o espaço de busca seja adequadamente definido.

Para reduzir o custo computacional, têm-se utilizado *Artificial Neural Networks* (ANN) como modelos preditivos de desempenho. Essas redes evitam a necessidade de resolver o modelo físico a cada nova geometria. Chiu et al. (2023) propuseram uma arquitetura baseada em ANN para estimar a curva de TL de silenciadores com diferentes configurações, utilizando como entrada dados de simulações em MEF.

A rede proposta, denominada *Silencer Analysis Network* (SAN), emprega uma arquitetura convolucional profunda composta por três blocos principais: camadas convolucionais, camadas de *pooling* e uma camada conectada. A Figura 2.14: SAN para predição de TL. propõe o fluxograma da SAN (AN; LEE, 2024).

Figura 2.14: SAN para predição de TL.



FONTE: Adaptado de An e Lee (2024).

Na entrada, o vetor de variáveis de projeto é convertido em uma imagem binária  $16 \times 100$ , onde cada pixel indica a presença (1) ou ausência (0) de partições rígidas na geometria discretizada do silenciador. Essa imagem é processada por 12 camadas convolucionais, que extraem padrões topológicos relevantes. Em seguida, quatro camadas de *max-pooling* reduzem a dimensionalidade dos dados, preservando as características de alto nível. O resultado é

processado por uma camada totalmente conectada, cuja saída é um vetor de 300 elementos representando a curva prevista de TL ao longo da faixa de frequência (AN; LEE, 2024).

Outra abordagem relevante é a *Response Surface Methodology* (RSM), empregada para construir superfícies de resposta aproximadas a partir de modelos de regressão. Essa técnica permite localizar regiões promissoras no projeto (BARBIERI; BARBIERI, 2013).

Em aplicações industriais, destaca-se o conceito de *Design for Acoustics* (DOA), que busca otimizar simultaneamente desempenho acústico, contrapressão, custo de fabricação e ocupação volumétrica. Essa abordagem requer a integração entre modelagem paramétrica, simulação (via MEF ou MEC) e algoritmos de busca global. Estudos como os de Lima, Lenzi e Barbieri (2006) e outros mais recentes demonstram a eficácia dessa combinação, especialmente quando se considera a interação fluido-acústica.

Para resumir segue a Tabela 2.2 aplicadas a silenciadores, organizada segundo os seguintes critérios: tipo de técnica, vantagens, limitações e aplicações típicas. Está formatada para uso direto na dissertação.

Tabela 2.2: Comparativo das técnicas de otimização.

| <b>TÉCNICA</b> | <b>APLICABILIDADE</b>  | <b>VANTAGENS</b>  | <b>LIMITAÇÕES</b>                           |
|----------------|--|---|---|
| <b>GA</b>      | Otimização de geometrias complexas com múltiplos objetivos; integração MEF   | Robusto, bom para problemas com ótimos locais           | Alto custo computacional se multiobjetivo   |
| <b>PSO</b>     | Ajuste de dimensões internas e parâmetros em projetos reativos ou combinados | Rápido, eficiente para variáveis contínuas              | Sensível à definição do espaço de busca     |
| <b>ANN-SAN</b> | Criação de modelos preditivos de TL a partir de variações geométricas        | Reduz simulações, gera modelos preditivos               | Exige muitos dados para treinamento         |
| <b>RSM</b>     | Avaliação preliminar de tendências e regiões promissoras                     | Simple, útil para explorar regiões promissoras          | Baixa precisão fora da região ajustada      |
| <b>DOA</b>     | Projetos industriais com múltiplas restrições e objetivos simultâneos        | Considera múltiplos objetivos (acústica, custo, espaço) | Requer modelagem multidisciplinar integrada |

FONTE: Autoria própria (2025).

### 2.2.3 Algoritmo Genético aplicado

Os Algoritmos Genéticos são métodos de otimização estocásticos inspirados nos princípios da evolução biológica, como seleção natural, cruzamento e mutação. Propostos inicialmente na década de 1970 e amplamente difundidos por Goldberg (1989), esses foram concebidos como alternativa a métodos determinísticos, com o objetivo de explorar grandes espaços de busca, mesmo em problemas com múltiplos ótimos locais, restrições não lineares ou funções objetivo de difícil modelagem analítica.

Nessas abordagens, cada solução candidata é representada como um “cromossomo”, que evolui ao longo das gerações por meio de operadores genéticos. A seleção promove a sobrevivência das soluções mais aptas; o cruzamento gera novas combinações e a mutação garante diversidade genética, evitando a convergência prematura. Essa lógica torna os Algoritmos Genéticos particularmente eficazes para problemas de engenharia nos quais o conhecimento prévio sobre a forma da solução ótima é limitado ou inexistente.

Na engenharia acústica, o GA vêm sendo aplicados com sucesso ao projeto de silenciadores, permitindo a otimização simultânea de múltiplos parâmetros geométricos, como o comprimento das câmaras, diâmetro e posição de furos, e localização de defletores. Diferentemente dos métodos tradicionais, que geralmente assumem geometrias simétricas ou idealizadas, esses possibilitam a avaliação de topologias mais complexas, com entrada lateral, escoamento cruzado ou reversão de fluxo (NAKAI; GEN; MIZUYAMA, 2017).

A integração dos Algoritmos Genéticos e simulação, especialmente o MEF, tem ampliado as possibilidades de projeto. Trabalhos recentes demonstram que, ao associar GA com simulações acústicas em domínios tridimensionais, é possível obter geometrias otimizadas com desempenho superior mesmo sob restrições (SHEN; HOU, 2017).

De acordo Nakai, Gen e Mizuyama (2017), seu funcionamento está baseado em operadores biologicamente inspirados que atuam sobre representações codificadas de soluções candidatas os chamados cromossomos segue-se a abstração matemática do método:

- Codificação Genética

A solução de um problema de otimização é representada por um vetor pertencente aos números reais, que pode ser codificado em forma binária, inteira ou real. Para aplicações em engenharia, é comum a codificação direta, em que cada gene representa um parâmetro físico:

$$\dot{\mathbf{x}} = x, y, \dots z_{\infty} \quad (2.7)$$

Cada vetor representa um indivíduo da população. A população inicial  $P_i$  é composta por  $n$  desses vetores a cada  $n$ , vezes (gerações) produzidos aleatoriamente:

$$P_i = \mathbf{x}_1^a, \mathbf{x}_1^b, \dots, \mathbf{x}_n^m \quad (2.8)$$

- Avaliação de aptidão

Cada indivíduo  $\mathbf{x}_m^n$  é avaliado por uma função objetivo  $F_{obj\ max}$ . Em problemas de maximização, a aptidão é diretamente

$$F_{obj\ max} = f(\mathbf{x}_m^n) \quad (2.9)$$

para minimização  $F_{i\ min}$ , utiliza-se:

$$F_{obj\ min} = \frac{1}{1+f(\mathbf{x}_m^n)} \quad (2.10)$$

A aptidão determina a probabilidade de o indivíduo ser selecionado para reprodução.

- Operador de Seleção

A seleção tem por objetivo preservar os melhores indivíduos e permitir a combinação de suas características. O método clássico é o Roleta Viciada, no qual a probabilidade  $\omega$  de seleção é à função aptidão  $F_{obj\ n}$  do indivíduo dividido pela soma das aptidões de todos os  $n$  indivíduos da geração  $m$ :

$$\omega = \frac{F_{obj\ n}}{\sum_m F_{obj\ n}} \quad (2.11)$$

Alternativamente, o método de Torneio sorteia aleatoriamente  $k$  indivíduos e seleciona o mais apto. Este método é mais robusto contra desvios causados por valores extremos.

- Operador de cruzamento

No cruzamento, dois indivíduos  $\mathbf{x}_1^a$  e  $\mathbf{x}_1^b$  são combinados para gerar novos descendentes. No caso de codificação real, o cruzamento aritmético é amplamente utilizado:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_2^{filho\ c} = \alpha \mathbf{x}_1^a + (1 - \theta) \mathbf{x}_1^b \\ \mathbf{x}_2^{filho\ d} = (1 - \theta) \mathbf{x}_1^a + \alpha \mathbf{x}_1^b \end{cases} \quad (2.12)$$

Considerando  $\theta \in [0,1]$ .

- Operador de mutação

A mutação evita a convergência prematura ao explorar novas regiões do espaço de busca. Para variáveis reais, a mutação  $\delta$  é a mais comum:

$$\hat{x}_m^n \text{ com mutação} = \hat{x}_m^n + \delta, \quad \delta \sim \varphi(0, \sigma^2) \quad (2.13)$$

Sendo  $\varphi$  uma distribuição gaussiana com o desvio padrão  $\sigma$  fixo ou adaptativo e  $\mu$  uma média nula.

- Elitismo e estratégia de sobrevivência

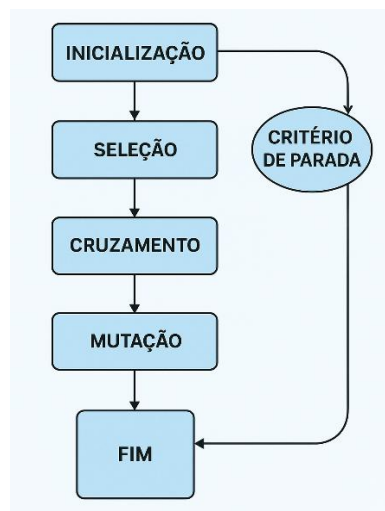
O elitismo garante que o melhor indivíduo da população atual seja mantido na próxima geração, impedindo a perda de boas soluções. A nova população  $P_j$  é formada por:

$$P_j = \text{elite} \cup \text{filhos}_{\text{gerados por crossover e mutação}} \quad (2.14)$$

- Critérios de parada

O algoritmo é executado até que se atinja um dos critérios de parada: número máximo de gerações, convergência da solução, estagnação sem melhora após  $m$  gerações consecutivas ou, ainda, extrapolação do tempo computacional disponível. Assim, permite uma busca exploratória eficiente por soluções ótimas em espaços complexos e multidimensionais. A aplicação adequada de seus operadores e parâmetros é essencial para alcançar o equilíbrio entre diversidade e convergência (SHEN; HOU, 2017). A Figura 2.15 a seguir resume o ciclo.

Figura 2.15: Etapas principais do GA.



FONTE: Autoria própria (2025).

Estudos recentes reforçam a eficácia de abordagens avançadas na otimização de silenciadores. Chiu et al. (2023) investigaram o uso de algoritmos genéticos acoplados ao MEF na otimização tridimensional de geometrias com entrada lateral, tendo como função objetivo a TL média em bandas críticas. Os resultados indicaram que modelos com entrada e saída excêntricas superaram as configurações axiais tradicionais.

Além disso, Segundo Colherinhas (2026), GA carecem de validação comparativa devido ao seu caráter holístico e estocástico. Por isso, é fundamental aplicar procedimentos de benchmarking, nos quais o desempenho é confrontado com soluções conhecidas em problemas clássicos. Exemplos incluem casos básicos como funções matemáticas com ótimo global definido, o problema do caixeiro-viajante e soluções triviais que permitem verificar se o algoritmo converge de forma consistente e eficiente.

## 2.3 Certificação e validação em silenciadores

### 2.3.1 Técnicas experimentais

A validação experimental de silenciadores é etapa essencial para assegurar que os resultados das simulações representem adequadamente o desempenho real em operação. A literatura destaca a importância de correlacionar dados experimentais com modelos computacionais, não apenas para validar os resultados, mas também para investigar fenômenos de difícil modelagem, como dissipações, interferências e efeitos de contorno.

Entre os métodos mais utilizados, destaca-se o método da dupla carga, amplamente empregado na medição da TL em componentes acústicos acoplados a dutos rígidos. A técnica utiliza tubos de impedância, nos quais dois microfones são posicionados antes e depois do silenciador, submetido a duas condições distintas de carga acústica, conforme ilustrado na Figura 2.16. Estudos como os de Arslan et al. (2020) e Suryawanshi et al. (2021) demonstram sua confiabilidade, especialmente em ambientes laboratoriais controlados.

Figura 2.16: Esquema aparato experimental método das duas cargas.



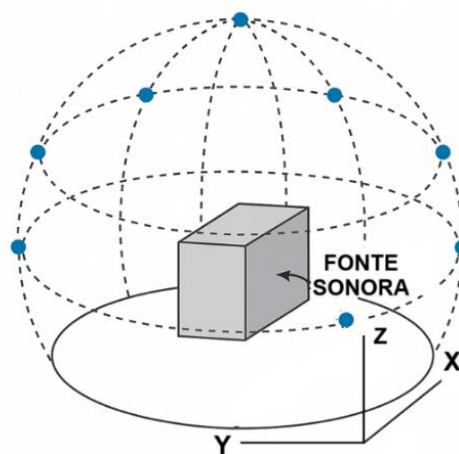
FONTE: Adaptado de Garkauskas (2019).

Além de validar, os testes experimentais contribuem para a definição de faixas de frequência relevantes, seleção de parâmetros realistas de entrada e identificação de efeitos operacionais específicos. Tais ensaios devem considerar variabilidades como vazamentos, perdas e imperfeições construtivas, o que exige um planejamento experimental cuidadoso e fundamentado em normas técnicas consolidadas (KUMAR; MUNJAL, 2018).

### 2.3.2 Certificação *in situ*

A norma ABNT ISO 8528-10:2021 descrita no anexo A define os procedimentos para medição do nível de pressão sonora emitido por geradores em operação. O método se baseia na criação de uma superfície ao redor do equipamento, onde são distribuídos microfones a distâncias padronizadas e orientados para o centro acústico da máquina. Essa superfície pode ser configurada de forma hemisférica ou paralelepípedica. A Figura 2.17 apresenta a malha hemisférica padronizada e a distribuição típica de medição.

Figura 2.17: Superfície de medição ao redor do gerador.



FONTE: Autoria própria (2025).

A aplicação dessa norma é especialmente importante para verificar a conformidade com os limites de emissão sonora. Ela também estabelece diretrizes para a caracterização do ruído global do sistema, considerando a contribuição conjunta do motor, exaustão, arrefecimento e estrutura envolvente. O procedimento requer ainda o controle de variáveis ambientais, como velocidade do vento, temperatura e refletividade do solo.

### 2.3.3 Base normativa

A pesquisa está fundamentada em duas normas principais, aplicadas a diferentes momentos da validação acústica:

- ABNT ISO 8528-10:2021 – estabelece os procedimentos para medir o ruído aéreo de grupos geradores *in situ*, por meio de uma malha de microfones ao redor. Permite calcular o Nível de Pressão Sonora contínuo equivalente ponderado em A.
- ASTM E2611-09 – padroniza o método da carga dupla medição TL experimental, com tubos de impedância e utilizando dois microfones sob diferentes condições de terminação. Essa norma é utilizada na validação em laboratório.

## 2.4 Hipóteses de pesquisa

A pesquisa parte do pressuposto de que é possível aprimorar significativamente o desempenho acústico de silenciadores reativos por meio da aplicação de otimização computacional. A formulação das hipóteses visa orientar a investigação, em torno de um objetivo central: desenvolver uma solução de controle de ruído com eficiência comparável à do estudo de caso, porém com estrutura mais simples e menor custo.

As hipóteses a seguir justificam a abordagem metodológica adotada neste estudo:

- Um silenciador reativo otimizado, com geometria assimétrica e entrada lateral, pode apresentar desempenho equivalente ou superior ao de silenciadores combinados, com menor custo de fabricação e maior simplicidade.
- A otimização orientada a uma faixa de frequência — em vez de toda a faixa— pode resultar em maior redução global do ruído irradiado, ao concentrar a eficiência acústica nas frequências de maior contribuição energética.
- Embora reativos apresentem, desempenho limitado em altas frequências, é possível reverter esse comportamento por meio de otimização geométrica, ajustando dimensões, posições de furos para maximizar a TL.
- A revisão bibliográfica evidenciou que a escolha do silenciador depende da geometria, do princípio de funcionamento e das condições operacionais. Em grupos geradores, restrições construtivas exigem soluções customizadas.
- O projeto deve equilibrar desempenho, viabilidade e integração ao sistema. Destacam-se o uso do MEF e GA na otimização, pela robustez e compatibilidade.

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Visão geral da metodologia**

#### **3.1.1 Caracterização e diretrizes**

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa, descrevendo o caminho percorrido desde a definição do problema até a validação final dos resultados. Trata-se de uma pesquisa numérica, aplicada e exploratória, fundamentada em simulações computacionais integradas a um GA.

A escolha dessa abordagem justifica-se pela natureza do problema a otimização geométrica de silenciadores reativos para grupos geradores, que envolve alto custo experimental e complexidade de variáveis de projeto. Assim, o emprego de modelagem paramétrica, MEF e GA possibilita explorar o espaço de soluções de forma eficiente, garantindo reprodutibilidade e viabilidade de aplicação.

#### **3.1.2 Escopo e etapas**

A sistemática da metodologia desenvolvida neste trabalho tem início com a definição do modelo de referência simplificado, estabelecido a partir do estudo de caso. Esse modelo constitui o suporte para as etapas subsequentes e escolhas técnicas. Portanto, em função do estudo de caso, o método de otimização paramétrica foi escolhido e essa geometria simplificada não aprimorada servirá como amostra inicial. Além disso, a função objetivo, as variáveis, o algoritmo e as ferramentas serão definidos nos próximos itens.

De forma sintética, a metodologia percorre as seguintes etapas: definição do modelo simplificado de referência SRSNO, modelagem paramétrica do domínio acústico, simulação via MEF, otimização geométrica por GA, validação experimental em tubo de impedância de acordo com ASTM E2611-09, validação normativa conforme a ABNT ISO 8528-10, por fim, avaliação econômica da solução otimizada. Esse fluxo metodológico, ilustrado posteriormente em fluxograma, garante uma abordagem integrada, combinando rigor científico, realismo físico e aplicabilidade industrial.

## 3.2 Ferramentas e materiais

A metodologia proposta integra três ferramentas computacionais, cada uma com função específica no ciclo de otimização. O MATLAB atua como núcleo da rotina, sendo responsável pela implementação matemática e lógica do GA. Enquanto, SOLIDWORKS, por sua vez, oferece suporte à visualização das geometrias, análise construtiva e a documentação para a etapa de prototipagem, embora não participe do processo.

O ANSYS MAPDL é empregado para as simulações acústicas harmônicas. Por meio de scripts em linguagem APDL paramétrica, gera os modelos tridimensionais, realiza a malha, aplica as condições de contorno e calcula a TL na faixa de frequências de interesse. Sua escolha justifica-se pela robustez numérica, pela ampla utilização em análises acústicas e pela capacidade de automação (SNAGOWSKA; JURKIEWICZ, 2021).

A integração dessas ferramentas garante a automação do processo, permitindo que modelagem, simulação e avaliação de desempenho sejam realizadas de forma sequencial e sem intervenção manual. Por fim, os materiais experimentais e os procedimentos normativos aplicados em campo não são detalhados neste tópico. Para fins de clareza didática, esses aspectos são apresentados no item “Critérios de Análise”, onde se descrevem a certificação experimental, a validação normativa e a análise de viabilidade econômica.

## 3.3 Definição do problema

### 3.3.1 Hipóteses de aplicação

A definição das condições físicas do meio acústico é essencial para garantir que os resultados numéricos sejam coerentes com a realidade operacional. Em sistemas de exaustão, propriedades como densidade e velocidade do som influenciam diretamente o comportamento das soluções e a impedância característica do meio (ZHAO et al., 2025).

Considerando que este trabalho propõe a otimização personalizada do silenciador em função do grupo gerador a diesel, tornou-se necessário adotar condições que representem a operação real do motor de estudo de caso. Assim, foram definidas duas abordagens para caracterizar as propriedades do ar:

- Condições padrão, representando um experimento (fluxo em temperatura ambiente);
- Condições ajustadas às temperaturas do escoamento, baseadas nas especificações do motor SCANIA DC9 (1800 rpm), obtidas conforme Figura 3.1.

Figura 3.1: Dados de exaustão de referência motor grupo gerador.

| 6/ EXHAUST SYSTEM             |            | 1500 rpm | 1800 rpm |
|-------------------------------|------------|----------|----------|
| Gas flow at stand-by Power    | kg/h       | 580      | 680      |
| Max temperature at PRP (25°C) | °C         | 660      | 700      |
| Max allowable back pressure   | kPa (mbar) | 5 (50)   |          |
| Energy to exhaust             | kcal/kWh   | 750      | 800      |

FONTE: Adaptado SCANIA (2025).

A partir disso, tem-se o equacionamento termodinâmico a massa específica e velocidade do som em termos dos conceitos de gases ideais, respectivamente:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (3.1)$$

$$c_0 = \sqrt{\gamma RT} \quad (3.2)$$

- $\rho$  é a massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $c_0$  é a velocidade do som ( $\text{m/s}$ );
- $P$  é a pressão ( $\text{N/m}^2$ );
- $R$  é a constante universal dos gases =  $8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ;
- $T$  é a temperatura absoluta do gás ( $\text{K}$ );
- $\gamma$  é razão entre os calores específicos = 1,4 (adimensional).

A primeira hipótese considera o ar a  $25^\circ\text{C}$  com pressão atmosférica, que representa o ambiente de laboratório, como no método das duas cargas. Nessas condições, a densidade e a velocidade do som são calculadas utilizando a equações 3.2 e 3.3:

$$\rho_{ar} = 1,2041 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{0 ar} = 343,24 \text{ m/s}$$

A segunda hipótese busca representar as condições reais de operação do silenciador, considerando os dados do motor SCANIA D9 PDE 178 kW, operando a 1800 rpm com gases de exaustão a  $700^\circ\text{C}$ . Nesse caso, o meio de propagação acústica não é mais ar atmosférico, mas sim o próprio gás de escape oriundo da combustão.

Contudo, por se tratar de uma mistura complexa e de composição variável (dependente do tipo de combustível e do regime do motor), assume-se uma aproximação simplificadora, tratando o gás ideal aquecido — hipótese amplamente adotada em simulações acústicas.

Com essa aproximação, os parâmetros corrigidos para 973,15 K ( $700^\circ\text{C}$ ) tornam-se:

$$\rho_{gás de escape} = 0,3627 \text{ kg/m}^3$$

$$c_0 \text{ gás de escape} = 625,36 \text{ m/s}$$

A partir disso, tem-se o equacionamento fluidodinâmico com a massa específica e para calcular a partir da vazão o número de Mach  $M_a$  em termos dos conceitos de gases ideais:

$$M_a = \frac{v}{c_0} \quad (3.3)$$

- $v$  é a velocidade média do escoamento (m/s);
- $c_0$  é a velocidade do som (m/s);

Assumindo uma vazão mássica  $m(t)$  de 680 kg/h (valor informado pelo fabricante para o regime de 1800 rpm), e um diâmetro interno do silenciador de (76,2 mm), obtém-se a área  $A_{st}$  como:  $0,00456 \text{ m}^2$ . Convertendo a vazão mássica em 0,1889 kg/s também informado pelo fabricante, e adotando uma densidade média entre as duas hipóteses (ambiente e gás quente) de  $0,7733 \text{ kg/m}^3$  assim calcula-se pela equação da continuidade para cada caso:

$$v_{ar} = \frac{m(t)}{A_{st} \rho_{ar}} \quad (3.4)$$

$$v_{\text{gás de escape}} = \frac{m(t)}{A_{st} \rho_{\text{gás de escape}}} \quad (3.5)$$

Assim, com os valores de velocidade e aplicando na equação 3.4: tem-se os números de Mach para as duas considerações:

$$Ma_{ar(25^\circ C)} = 0,100$$

$$Ma_{\text{gás escape}(700^\circ C)} = 0,183$$

Ambos os valores estão bem abaixo de 0,3, indicando que o escoamento pode ser tratado como incompressível para efeitos acústicos lineares, o que justifica a modelagem harmônica sem considerar efeitos de fluxo convectivo. Esses ajustes termodinâmicos são necessários em função da ligação acústica, conforme He, Ji e Huang (2024).

### 3.3.2 Hipóteses de simplificadoras

Considerando a complexidade envolvida em sistemas de exaustão, que incluem interação fluido-acústica, este trabalho adota um conjunto de simplificações fundamentadas na literatura. Primeiramente, restringe-se a modelagem à propagação sonora em meio fluido estático, concentrando a análise na variável principal: a Transmission Loss. A otimização será conduzida com função objetivo única, voltada exclusivamente à maximização da TL na faixa crítica, caracterizando uma abordagem sem multicritério.

Em segundo lugar, com base na Seção 3.5, o número de Mach no interior do silenciador varia entre 0,100 e 0,183. Para valores inferiores a 0,3, o escoamento pode ser considerado subsônico não convectivo, permitindo a desconsideração de seus efeitos sobre a propagação em análises harmônicas e desconsiderando o ruído de fluxo (TERASHIMA et al., 2022).

Nas interligações entre câmaras, reconhece-se, por suposição, o Mach pode atingir valores extremos, impactando os coeficientes de transmissão sonora. No entanto, tais efeitos serão desconsiderados, devido à complexidade e ao caráter exploratório desta abordagem. Esses fenômenos exigem estudos com acoplamento acústico-aerodinâmico, especialmente para geometrias com furos estreitos (YAMAMOTO; AKIMOTO; HOSOMI, 2024).

Além disso, assumem-se condições estacionárias de regime permanente de operação do motor: temperatura de exaustão constante, rotação estabilizada em 1800 rpm e regime contínuo — cenário crítico compatível com carga nominal. Finalmente, apesar da contrapressão não compor o objetivo, espera-se que a geometria do SRSNO reduza consequentemente as perdas de carga e turbulência. Essa hipótese será verificada por meio de inspeções e medições de pressão complementar. Tais simplificações asseguram uma compatibilidade com os objetivos, permitindo focar na otimização acústica.

### 3.3.3 Função objetivo

Neste trabalho, definiu-se, conforme, Ju et al. (2004), a maximização da TL como função objetivo, na faixa de frequência do ruído operacional dominante do GMG. As estratégias baseadas na variação dimensional têm se mostrado eficazes para maximizar o desempenho de dispositivos reativos. Nesses casos, os parâmetros são vetores de decisão que correspondem a medidas e posições internas do silenciador (LIMA; LENZI; BARBIERI, 2011).

Assim, a função objetivo:

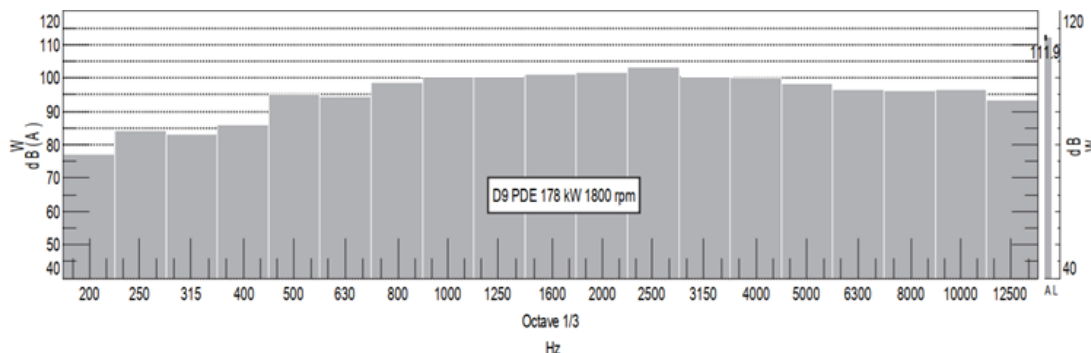
$$FO(f_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N TL(f_i) \quad (3.6)$$

Onde  $TL(f_i)$  são uma função da frequência  $f_i$ , e  $N$  é o número total de frequências avaliadas na faixa. assim, adota-se uma faixa de 1500 a 2500 Hz, subdividida em 10 pontos discretos com espaço uniforme de 100 Hz, ou seja: 1500, 1600, 1700, ..., 2500 Hz.

Na verdade, o objetivo definido corresponde à média dos valores de TL na faixa de frequências considerada. Essa abordagem permite avaliar o desempenho global do silenciador, reduz o custo computacional em relação a análises contínuas e assegura maior robustez da solução frente às variações dentro do intervalo crítico de operação.

Justifica-se, assim, a escolha pela análise espectral de um motor SCANIA D9 PDE (177 kW a 1800 rpm), utilizado no gerador objeto do estudo de caso. A Figura 3.2 apresenta o gráfico do nível de potência sonora ponderada em A, distribuída por bandas de 1/3 de oitava. Observa-se um platô de emissão entre 1600 e 2500 Hz, seguido de uma queda acentuada em 3150 Hz, indicando a faixa de maior concentração de energia acústica.

Figura 3.2: Nível potência sonora do motor SCANIA DC9.



FONTE: Adaptado SCANIA (2025).

Essa escolha permite abranger tanto o platô quanto a região de transição ao pico, mantendo um número de pontos gerenciável. A otimização busca maximizar a atenuação média nessa faixa crítica, presumindo-se que somente essa seja capaz de promover eficácia na atenuação do ruído global e compatibilidade com a emissão de ruído.

Conseqüentemente, adota-se a lógica de personalização acústica do silenciador em função da principal fonte sonora do gerador, o seu MCI, evitando abordagens genéricas de atenuação ampla. Essa estratégia permite desenvolver soluções direcionadas que conciliam desempenho acústico e racionalidade de projeto.

## 3.4 Proposta e modelagem paramétrica

### 3.4.1 Descrição da simplificação

O modelo, denominado SRSNO, sua concepção a partir do SCNO seguiu princípios de similitude em engenharia e diretrizes de racionalização, visando manter a função acústica com redução de custos, e pode ser detalhada como:

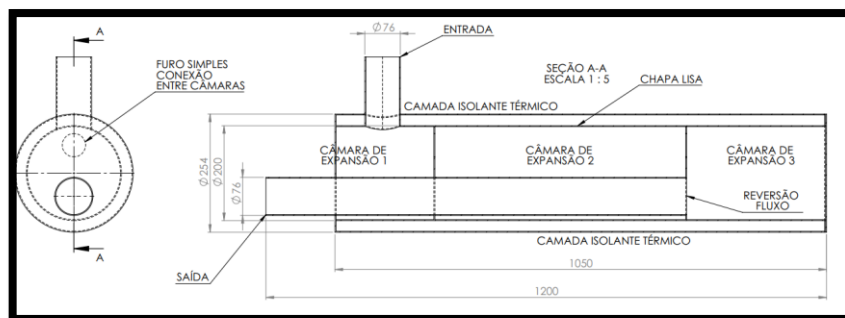
- Redução de complexidade geométrica interna, com eliminação de tubos e chapas perfuradas, que demandam maior precisão de fabricação.
- Manutenção da lã de vidro somente para isolamento térmico, mantido apenas com função isotérmica, sem elementos de acoplamento acústico.

- Preservação dimensional e topológica do silenciador de referência, garantindo compatibilidade com a instalação, suporte e fixação.

Apesar do material absorvente na região periférica, a ausência de chapas perfuradas impede a interação, descaracterizando o efeito resistivo que, composto com o reativo, típico dos silenciadores combinados. Assim, o SRSNO é reduzido a um silenciador reativo puro. Quanto ao escoamento, apresenta configuração análoga ao SCNO. O fluxo de gases entra por uma conexão lateral (76,2 mm), passa pela primeira câmara de expansão e, por meio de furos sucessivos, é conduzido às câmaras seguintes, sofrendo variações de impedância.

Ao final, uma reversão de fluxo o direciona à saída axial (76,2 mm). Essa topologia reproduz, com menor complexidade, os efeitos de escoamento do modelo combinado. A Figura 3.3 e Figura 3.4 ilustram o desenho técnico e o modelo tridimensional do SRSNO.

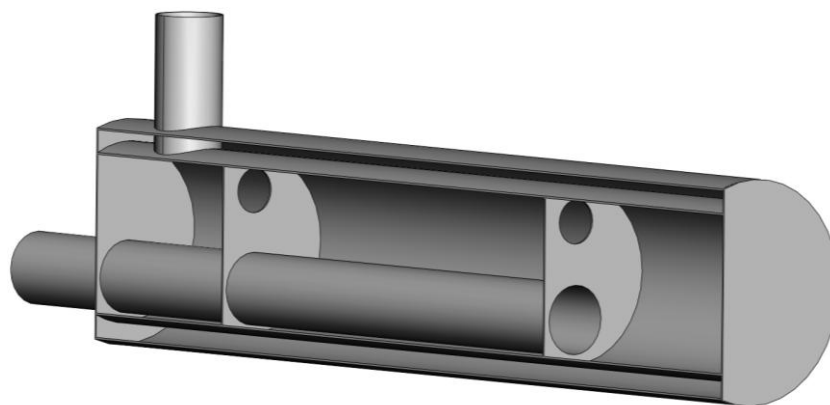
Figura 3.3: Desenho técnico SRSNO proposto.



FONTE: Autoria própria (2025).

Nota-se que as três câmaras de expansão foram preservadas, e a quantidade de furos de conexão foi modificada estrategicamente, respeitando os limites construtivos da aplicação.

Figura 3.4: Modelo tridimensional SRSNO proposto.

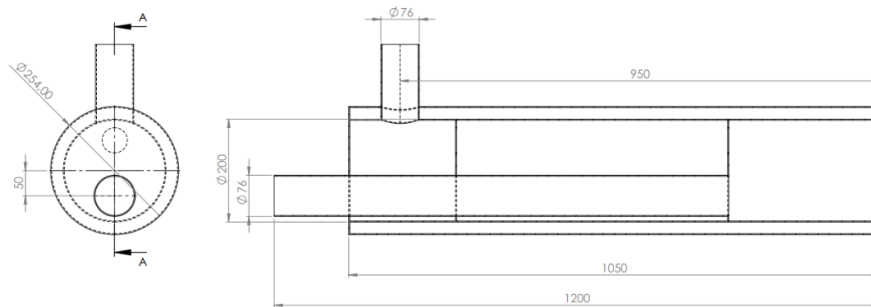


FONTE: Autoria própria (2025).

### 3.4.2 Descrição silenciador

Essa configuração representa uma versão racionalizada do silenciador original. A Figura 3.5 apresenta o modelo tridimensional do SRSNO, no qual algumas dimensões foram fixadas para preservar a aplicabilidade. As medidas constantes: comprimento total do conjunto (1200 mm), comprimento do corpo (1050 mm), posição da entrada lateral no eixo Z (950 mm), diâmetro da entrada lateral e saída axial (76,4 mm), diâmetro interno do corpo principal (200 mm) e diâmetro externo (254 mm), entrada lateral com altura fixa de 50 mm.

Figura 3.5: Geometria com medidas contantes SRSNO.



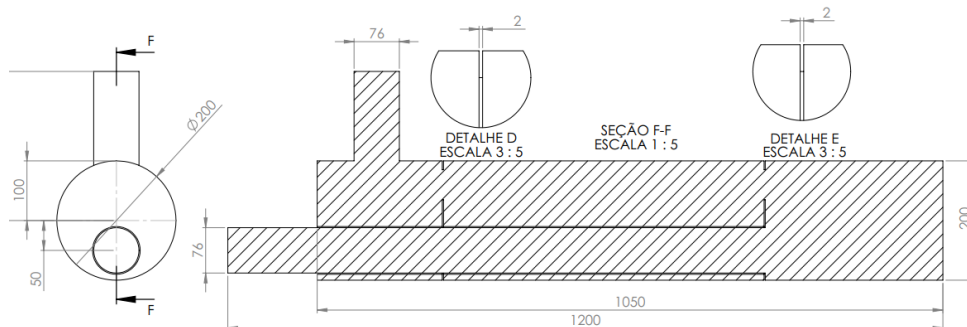
FONTE: Adaptado SOLIDWORKS (2025).

Essas dimensões não compõem o vetor de variáveis otimizáveis e foram fixadas para garantir a repetibilidade, robustez da malha e aderência à aplicação prática. A estrutura representada corresponde a superfície de controle do volume fixo do fluido, sobre o qual serão aplicadas as análises acústicas harmônicas.

### 3.4.3 Descrição modelo

A Figura 3.6 apresenta o volume interno de ar com as medidas fixas delimitado pela fronteira do SRSNO, denominado MRSNO – Modelo Reativo Simplificado Não Otimizado.

Figura 3.6: Geometria com medidas contantes MRSNO.



FONTE: Adaptado SOLIDWORKS (2025).

Esse modelo segue todas as dimensões fixas variáveis, servindo como base para a simulação e otimização. Segundo Lima, Lenzi e Barbieri (2011), em análises harmônicas o domínio físico considerado deve ser o volume de ar, pois é nele que ocorre a propagação das ondas sonoras. A estrutura não é modelada, pois não é objeto deste estudo. Como os modos acústicos dependem unicamente da geometria e condições de contorno. Para fins de clareza, a distinção entre modelo e silenciador nas siglas será formalizada:

- Letra M: indica "modelo", associado ao volume interno simulado;
- Letra S: indica "silenciador", referindo-se ao componente estrutural real.

#### 3.4.4 Parametrização do modelo

Modelagem paramétrica é a representação geométrica em que a forma e as dimensões de um corpo são controladas por variáveis. Essas são manipuladas pelo Algoritmo foram definidas estrategicamente, com foco na viabilidade construtiva, no impacto acústico e na facilidade de implementação, mantendo constantes aquelas que não influenciam significativamente a propagação sonora ou que já atendem aos requisitos funcionais.

Os parâmetros de otimização correspondem às dimensões internas do modelo reativo, incluindo o comprimento das câmaras, a posição (ou distância de centro a centro) dos furos de conexão e os diâmetros absolutos dessas conexões entre câmaras. Todas são compatíveis com a estrutura do SRSNO e serão manipuladas dentro de intervalos previamente definidos. Essas variáveis são apresentadas por meio da notação adotada e descritas na Tabela 3.1.:

Tabela 3.1: Planilha de variáveis do GA.

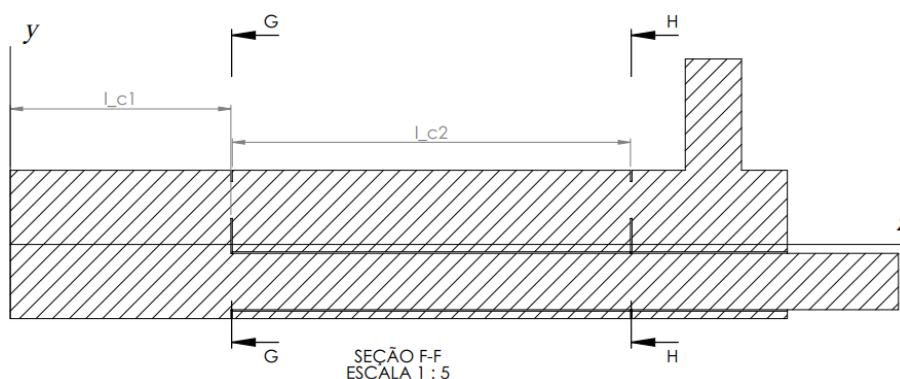
| NOTAÇÃO       | DEFINIÇÃO FÍSICA                     |
|---------------|--------------------------------------|
| $l_{c1}$      | Comprimento da primeira câmara       |
| $l_{c2}$      | Comprimento da segunda câmara        |
| $d_{f1}$      | Diâmetro do furo entre a primeira    |
| $d_{f2}$      | Diâmetro do furo entre a segunda     |
| $offset_{f1}$ | Posição (offset) do furo da primeira |
| $offset_{f2}$ | Posição (offset) do furo da segunda  |

FONTE: Autoria própria (2025).

A Figura 3.7 e Figura 3.8 apresentam a distribuição das variáveis nos eixos principais de um desenho técnico com vista em corte e vista lateral:

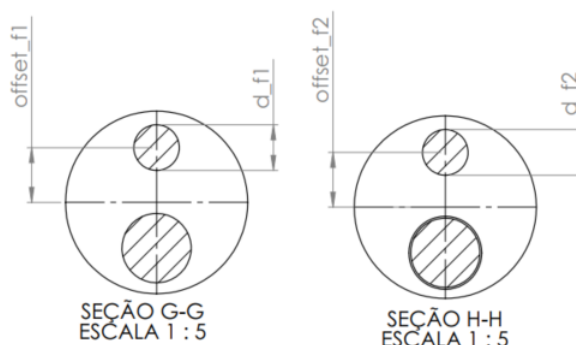
- Eixo Z: define os comprimentos das câmaras ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) e posições dos furos ( $b$ ,  $c$ );
- Eixo Y: define os diâmetros das conexões ( $\gamma$ ,  $a$ ).

Figura 3.7: Geometria com medidas variáveis em z MRSNO.



FONTE: Adaptada SOLIDWORKS (2025).

Figura 3.8: Geometria com medidas variáveis em y MRSNO.



FONTE: Adaptada SOLIDWORKS (2025).

Essas definições geométricas são essenciais para a produção automática de indivíduos múltiplos de GA escritos com códigos de programação.

### 3.5 Procedimento integrado de otimização

O processo de otimização constitui o núcleo metodológico deste trabalho, sendo responsável por conduzir o GA na evolução geométrica do SRSNO até uma configuração de desempenho acústico superior SRSO. Para alcançar tal objetivo, foi adotada uma abordagem baseada em evolução natural, amplamente reconhecida por sua eficácia em problemas com múltiplos mínimos locais.

Inicialmente, foram realizadas tentativas de uso do módulo nativo de GA do MATLAB *Global Optimization Toolbox*; contudo, a baixa flexibilidade, dificuldade de integração inviabilizaram sua aplicação. Além disso, o conhecimento ainda restrito do autor sobre a ferramenta contribuiu para essa limitação, reforçando a opção pelo desenvolvimento de um código próprio, mais adaptável e integrado ao fluxo de simulação.

Dessa forma, a implementação prática foi realizada por meio de seis scripts criados exclusivamente para este trabalho em MATLAB (.m), organizados de forma modular e integrados ao ANSYS MAPDL, em linguagem APDL, para simulações acústicas.

Em cada ciclo evolutivo, é gerada uma população de indivíduos (conjuntos de variáveis geométricas), avaliada pelo cálculo da TL no domínio da frequência em harmônicos. Em seguida, aplicam-se os operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação para formar a nova geração. O SOLIDWORKS é utilizado de forma complementar para visualização das geometrias e apoio na documentação técnica.

As funções de cada script são resumidas na Tabela 3.2 e serão detalhadas nos tópicos seguintes. O fluxo automatizado assegura a integração entre modelagem, simulação e avaliação de desempenho, reduzindo o tempo de iteração e viabilizando soluções otimizadas.

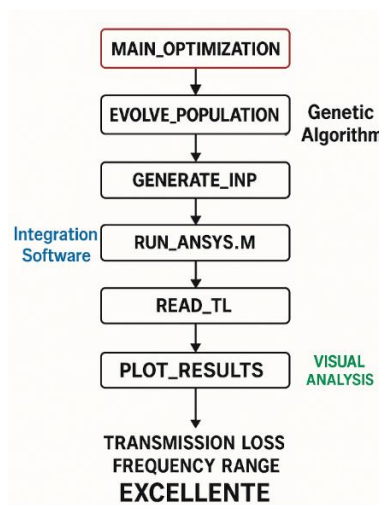
Tabela 3.2: Planilha de variáveis do GA.

| NOTAÇÃO                  | FUNÇÃO  |
|--------------------------|---|
| <b>MAIN_OPTIMIZATION</b> | Inicia GA, controlar as gerações                |
| <b>EVOLVE_POPULATION</b> | Aplica os operadores genéticos                  |
| <b>GENERATE_INP</b>      | Gera arquivo de entrada (.inp), em APDL         |
| <b>RUN_ANSYS</b>         | Executa simulação no ANSYS MAPDL                |
| <b>READ_TL</b>           | Lê os resultados e extrai a média na faixa alvo |
| <b>PLOT_RESULTS</b>      | Organiza e plota os gráficos                    |

FONTE: Autoria própria (2025).

Essa lógica é representada na Figura 3.9 e complementada pelos códigos originais apresentados na íntegra no Apêndice E.

Figura 3.9: Fluxograma de otimização.



FONTE: Autoria própria (2025).

### 3.5.1 Otimizador principal

O script constitui o núcleo central da rotina de otimização, sendo responsável por configurar os parâmetros globais, gerar a população inicial, coordenar a evolução geracional do GA, armazenar os históricos e acionar a simulação. Sua função é essencial para garantir o controle e a rastreabilidade do processo de busca da solução acústica ideal, por meio da maximização da média da TL na faixa crítica.

No início, o script gera automaticamente um relatório no formato *(.txt)*, com carimbo de data e hora, permitindo acompanhar em tempo real o desempenho. Em seguida, define as constantes físicas utilizadas nas simulações, considerando as duas hipóteses de aplicação, de modo a refletir uma condição baseada na operação do motor Scania em regime nominal.

O controle do processo evolutivo é realizado por três parâmetros principais. O primeiro é o número de gerações, fixado em cem, que corresponde ao total máximo de ciclos de otimização. O segundo é o tamanho da população, estabelecido em dez indivíduos por geração, cada um representando uma configuração do silenciador. O terceiro é o máximo de gerações sem melhoria, definido em dez, que atua como critério de parada antecipada.

Esse script também gerencia o fluxo das variáveis de projeto e seus limites, de modo a impedir que o vetor genético assuma valores inviáveis do ponto de vista construtivo ou operacional. Por exemplo, dimensões muito reduzidas nos furos de interconexão entre câmaras poderiam induzir ruído de fluxo indesejado. A matriz de limites adotada restringe o espaço de busca a valores fisicamente possíveis e fabricáveis, conforme apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Planilha de limites de variáveis do GA.

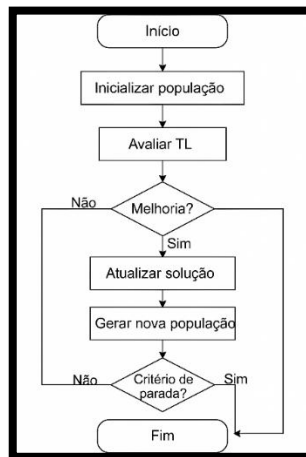
| NOTAÇÃO      | DEFINIÇÃO                          | LIMITES (mm) |
|--------------|------------------------------------|--------------|
| $l_{c_1}$    | Comprimento da 1ª câmara (C1)      | [200, 350]   |
| $l_{c_2}$    | Comprimento da 2ª câmara (C2)      | [200, 500]   |
| $d_{f_1}$    | Diâmetro do furo 1 (C1 - C2)       | [25, 60]     |
| $d_{f_2}$    | Diâmetro do furo 2 (C2 - C3)       | [25, 60]     |
| offset $f_1$ | Offset do furo 1 (posição lateral) | [30, 60]     |
| offset $f_2$ | Offset do furo 2 (posição lateral) | [30, 60]     |

FONTE: Autoria própria (2025).

A população inicial é gerada de forma aleatória, com distribuição uniforme dentro desses limites. A cada iteração, o módulo responsável pela evolução da população aplica os operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação, originando uma nova geração. O desempenho de cada indivíduo é avaliado pela função fitness, calculada a partir da simulação. Em cada geração, registram-se o indivíduo de melhor desempenho, o desvio padrão da população como indicador de diversidade.

Ao final do processo, é realizada uma simulação adicional de verificação para o melhor indivíduo global encontrado, confirmando o valor da TL média. A lógica do processo é sintetizada no fluxograma da Figura 3.10.

Figura 3.10: Fluxo lógico do GA.



FONTE: Autoria própria (2025)

Esse módulo ainda apresenta mensagens explicativas no terminal, incluindo lembretes sobre parâmetros, incrementos, quantidade de pontos e alterações na probabilidade e na intensidade da mutação, o que evidencia o cuidado adotado na calibração do algoritmo. Vale ressaltar que, por se tratar de um método de natureza holística, no qual as soluções são avaliadas de forma global e interdependente, é necessário aplicar um conjunto de réplicas.

### 3.5.2 Evoluir população

O script implementa os principais mecanismos evolutivos do GA, sendo responsável por calcular o valor de fitness de cada indivíduo da geração atual, selecionar os pais, gerar a nova população por cruzamento e mutação e manter o melhor indivíduo encontrado até então. Ele representa o coração adaptativo da otimização, pois é nesse ponto que a combinação entre busca exploratória e refinamento local é realizada a cada ciclo geracional.

A lógica do script pode ser descrita em quatro etapas fundamentais. Cada indivíduo, representado por um vetor com seis variáveis de projeto, tem sua geometria automaticamente convertida em um modelo (*.inp*) via código e submetido à simulação por meio de. O valor da TL é então extraído, que analisa dez pontos de frequência entre 1500 e 2500 Hz. Esse valor é utilizado como a função  $fitness(i)$ .

$$fitness(i) = mean TL(i) \quad (3.7)$$

Assim, quanto maior a média, melhor o indivíduo. Essa abordagem permite que o algoritmo busque configurações geométricas que maximizem a atenuação sonora global na faixa crítica. Após calcular o fitness de toda a população, os indivíduos são classificados em ordem decrescente de desempenho. Os superiores são selecionados como pais da próxima geração. Essa técnica não depende diretamente do fitness, mas apenas da ordem relativa de desempenho, o que evita a convergência prematura e mantém a diversidade genotípica.

A geração de novos indivíduos ocorre por meio de combinação linear aleatória entre dois pais selecionados. Para cada novo indivíduo (exceto o primeiro, que é o melhor da geração anterior mantido por elitismo), é escolhido aleatoriamente um par de pais  $p1$  e  $p2$ , por um  $\theta$  fator de hereditariedade e então o novo vetor é calculado como:

$$filho = \theta \cdot p1 + (1 - \alpha) \cdot p2 \quad [\theta \in (0,1)] \quad (3.8)$$

Essa forma de cruzamento contínuo promove exploração suave do espaço de busca, ao contrário do tradicional cruzamento por ponto fixo, sendo especialmente adequado para variáveis contínuas como dimensões geométricas.

A mutação com probabilidade definida, de trinta ou cinquenta por cento, o indivíduo recém-gerado pode ser submetido a um produto aditivo gaussiano ou não conforme sintaxe:

$$if_{cond}[rand] < 0.3 \text{ ou } if_{cond}[rand] < 0.5 \quad (3.9)$$

Nesse procedimento, a função randômica gera valores aleatórios de distribuição normal, com média zero e desvio padrão unitário, que são multiplicados por fatores distintos para cada

vetor genético. As duas primeiras variáveis recebem perturbações de maior intensidade, escaladas por dez, enquanto as quatro restantes sofrem variações menores, escaladas por cinco. O novo cromossomo é obtido pela soma do vetor original com esse ruído, conforme:

$$filho_{mutado} = filho + [randn(6)] * [10\alpha, 10\beta, 5\gamma, 5a, 5b, 5c] \quad (3.10)$$

Essa abordagem não adaptativa permite a introdução de novas soluções potenciais no espaço de busca, evitando estagnação. A intensidade da mutação foi empiricamente aumentada no script para favorecer uma maior variabilidade entre os indivíduos.

Após o cruzamento e mutação, cada variável do novo indivíduo é verificada para garantir que esteja dentro dos limites estabelecidos:

$$filho(j) = \min(\max(filho(j), lim\_inf), lim\_sup) \quad (3.10)$$

Isso impede que a mutação ultrapasse os limites físicos ou inviáveis do ponto de vista de fabricação. O primeiro indivíduo da nova geração é automaticamente mantido como o melhor da geração anterior, assegurando que a solução de maior desempenho não seja perdida. Esse recurso, conhecido como elitismo, embora opcional em muitos Algoritmos Genéticos, mostra-se eficaz para acelerar a convergência.

O script não interrompe a execução diretamente, mas retorna ao módulo principal de otimização, que encerra o ciclo caso o melhor valor de fitness permaneça inalterado por dez gerações consecutivas ou se seja atingido o número máximo de gerações.

### 3.5.3 Gerar executável

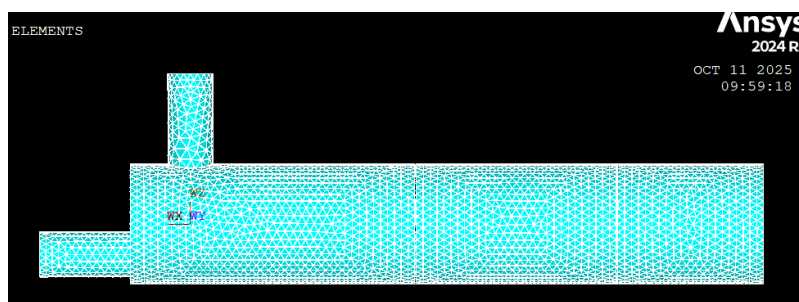
Esse código tem como função construir um arquivo com extensão (.inp), que será lido diretamente pelo ANSYS MAPDL. Esse reúne todos os comandos necessários para definir e simular um modelo tridimensional de silenciador. A escrita é realizada por meio do comando impressão formatada, utilizado para registrar instruções. O conteúdo é organizado em três blocos principais: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

Na primeira etapa, o script inicializa o ambiente de modelagem por meio das bibliotecas internas do software de simulação. O diretório de trabalho é configurado para que os arquivos sejam salvos em um padrão. Em seguida, são definidas as propriedades físicas do meio fluido, neste caso o ar ou os gases de escape tratados como ar equivalente, incluindo densidade, velocidade do som e impedância acústica característica.

Essas grandezas são fundamentais para simulação da propagação sonora. O tamanho da malha é estabelecido com base na maior frequência de interesse, adotando-se elementos

equivalentes a um décimo do comprimento de onda, conforme Barbieri e Barbieri (2013). Esse critério garante a precisão do campo sonoro. A Figura 3.11 apresenta o modelo MRSNO utilizado como objeto de estudo, já com a malha aplicada.

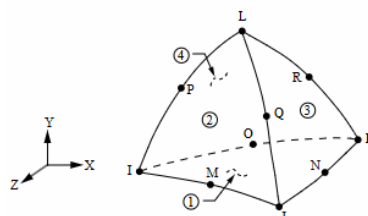
Figura 3.11: Geometria MSRNO com malha aplicada.



FONTE: Adaptado de ANSYS MAPDL (2025).

O elemento finito utilizado na malha é o FLUID221, um elemento tridimensional de dez nós de ordem superior, com comportamento de pressão quadrática. Ele é recomendado para modelar fenômenos acústicos em meios fluidos, sendo adequado para análises harmônica em domínios de fluido compressível. Esse permite a simulação de efeitos de compressibilidade, impedância. A Figura 3.12 apresenta a topologia do FLUID221 (ANSYS INC, 2024).

Figura 3.12: Geometria FLUID 221.



FONTE: Adaptado de ANSYS MAPDL (2025).

Na etapa seguinte, a geometria é construída por meio de comandos de criação de cilindros, sendo que cada um representa uma câmara, furo, tubo ou outro elemento da estrutura. O modelo inclui três câmaras interligadas por furos, um tubo de entrada lateral, um tubo de saída axial e defletores internos obtidos por operações de subtração. As posições axiais, deslocamentos e diâmetro dos furos são parametrizados a partir dos cromossomos do GA.

Na sequência, são realizadas operações booleanas de subtração para a retirada de volumes internos, e os volumes resultantes são somados pelo comando (*vadd*), formando um único corpo acústico contínuo. Essa geometria é posteriormente mesclada pelo comando (*nummrg*) e preparada para a geração da malha com os elementos previamente definidos.

O segundo bloco inicia-se com a entrada no ambiente de solução. Nessa etapa, define-se o tipo de análise, com o objetivo de calcular a resposta do sistema em regime permanente de excitação sonora. As condições de contorno acústicas são aplicadas: na entrada do sistema, é imposta uma fonte de velocidade normal de intensidade unitária, estabelecida em função da pressão, da impedância característica e da excitação harmônica associada a entrada.

Na saída do silenciador, localizada na posição de porta de saída, é aplicada a condição de radiação livre, que simula a continuidade com o ambiente externo. Essa modelagem estabelece a necessidade de uma saída não refletiva. Em seguida, a análise harmônica é configurada para calcular a resposta do modelo nas frequências de interesse.

Após a finalização da simulação, o script acessa o ambiente de pós-processamento para extrair os resultados. Nessa etapa, solicita-se o cálculo do vetor de potência acústica em todas as portas, de entrada e de saída, e esses valores são impressos e redirecionados para um arquivo em formato de texto. Cada arquivo é individualizado por geração e por indivíduo, seguindo a nomenclatura (TL\_GXX\_IYYY), e contém os valores de potência incidente e transmitida.

#### **3.5.4 Rodar ANSYS MAPDL**

A execução da simulação ocorre de forma automatizada a partir do MATLAB, que chama o ANSYS MAPDL em modo batch para executar o arquivo de entrada (*.inp*) gerado para cada indivíduo da população. O comando de sistema é montado e enviado dinamicamente, especificando o caminho fixo do executável, a execução e o nome do arquivo de entrada. O processamento gera um arquivo de saída, que contém todos os registros da simulação.

O modo batch consiste na execução não interativa a partir de arquivos de entrada previamente configurados, sem necessidade de comandos manuais na interface gráfica. Essa abordagem é essencial para a metodologia, pois permite repetir simulações de forma automática, reduz o tempo de processamento, elimina erros de operação e viabiliza a integração com o GA, que exige a avaliação sucessiva de centenas de indivíduos.

#### **3.5.5 Ler TL**

A função ler TL realiza a leitura dos arquivos (*.txt*) gerados, interpretando a Transmission Loss calculada ponto a ponto na faixa de frequências definida. A varredura identifica as linhas da faixa e extrai o valor da sexta coluna, correspondente em decibéis. O vetor resultante é usado para calcular a média, que é devolvida ao otimizador principal como valor de fitness do indivíduo em cada ciclo. Essa função conecta ao domínio físico do ANSYS ao domínio computacional do MATLAB, garantindo a consistência dos resultados.

### 3.5.6 Plotar resultados

Finalmente, a etapa de plotagem de resultados é executada ao término do ciclo de otimização, seja por estagnação ou pelo alcance do número máximo de gerações, com o objetivo de consolidar o processo por meio de representações gráficas geradas a partir do histórico da função objetivo e dos parâmetros dos indivíduos. As visualizações incluem a evolução da TL média ao longo das gerações, a distribuição dos resultados por geração e as curvas de diversidade genética, permitindo avaliar a convergência do algoritmo, identificar estagnações e analisar a robustez do processo evolutivo.

### 3.5.7 Resumo dos parâmetros de GA

Os critérios utilizados na GA estão resumidos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Estratégias implementadas da GA.

| COMPONENTE         | IMPLEMENTAÇÃO  |
|--------------------|--|
| Número de gerações | 100 gerações   |
| Tamanho população  | 10 indivíduos  |
| Seleção            | Rankeado entre os melhores   |
|                    | Classificação truncada em 50% Indivíduos com a maior média de TL de forma decrescente. |
| Cruzamento         | Combinação linear aleatória  |
|                    | $filho = \theta \cdot p1 + (1 - \alpha) \cdot p2$ [ $\theta \in (0,1)$ ]               |
| Mutação            | Ruído gaussiano 30% ou 50 % $if_c[rand] < Rg$  |
|                    | $filho_m = filho + [randn] * [cromossomo]$   |
| Fitness            | Média da Transmissão sonora na faixa.  |
|                    | TL <sub>máx.</sub> Média (1500 – 2500) Hz  |
| Elitismo           | Ativado melhor indivíduo preservado.   |
| Critério de parada | Estagnação com limite de 10 gerações.  |
|                    | Número máximo de 100 gerações.   |

FONTE: Autoria própria (2025).

## 3.6 Consolidação e investigação da otimização

Esse item consiste na demonstração dos resultados e avaliação de performance da otimização. O objetivo é analisar a influência de fatores internos no algoritmo, como custo computacional, parâmetros genéticos, evolução e diversidade genética, além da consolidação e divulgação dos resultados e na apresentação dos gráficos gerados.

Para viabilizar a consolidação de análises experimentais futuras, torna-se necessário esclarecer a distinção entre as condições de operação do silenciador e as condições de ensaio adotadas neste trabalho. O protótipo físico SRSO<sub>(GE)</sub> foi desenvolvido para aplicação em grupos

geradores, nos quais o silenciador opera sob condições reais de gás, caracterizadas por temperaturas elevadas e vazão dos gases. Entretanto, os ensaios experimentais realizados pelo método das duas cargas são conduzidos em temperatura ambiente, conforme norma, em função das limitações do aparato experimental disponível.

Essa diferença nas propriedades impõe uma restrição à comparação direta entre os resultados numéricos e experimentais, uma vez que a resposta acústica do sistema é dependente de propagação. Para contornar essa limitação, foi realizada uma simulação complementar empregando a mesma geometria do  $MRSO_{(GE)}$ , porém considerando propriedades acústicas correspondentes ao ar em temperatura ambiente, configuração definida como  $MRSO_{(GE)-(AR)}$ . Dessa forma, estabelece-se uma base comum de comparação, garantindo maior compatibilidade entre os resultados e permitindo análises consistentes da TL sob as mesmas condições.

Além disso, faz-se necessária uma distinção entre os resultados associados às hipóteses de aplicação, com a complementação das siglas por meio de subscritos que diferenciem as condições de gás de escape e de ar. Essa distinção é indispensável tanto para os modelos quanto para os silenciadores, conforme já mencionado na etapa de parametrização. Para fins de clareza e uniformidade, a Tabela 3.5 é retomada de forma resumida.

Tabela 3.5: Resultados experimentais esperados.

| <b>SIGLA</b>       | <b>DESIGNAÇÃO</b>  |
|--------------------|--|
| SCNO               | Silenciador combinado não otimizado  |
| SRSNO              | Silenciador reativo simplificado não otimizado   |
| MRSNO              | Modelo reativo simplificado não otimizado  |
| $MRSO_{(GE)}$      | Modelo reativo simplificado otimizado (propriedades gás de escape)   |
| $MRSO_{(GE)-(AR)}$ | Modelo reativo simplificado otimizado (propriedades gás de escape) corrigido com nova simulação para propriedade de ar atmosférico |
| $SRSO_{(GE)}$      | Silenciador reativo simplificado otimizado (propriedades gás de escape)  |
| $MRSO_{(AR)}$      | Modelo reativo simplificado otimizado (propriedades ar atmosférico)  |
| $SRSO_{(AR)}$      | Silenciador reativo simplificado otimizado (propriedades ar atmosférico)   |

FONTE: Autoria própria (2025).

Adicionalmente, será realizada uma avaliação da capacidade de convergência do algoritmo, a fim de verificar sua robustez antes da aplicação ao problema real, conforme a abordagem de validação proposta pela revisão bibliográfica.

Essa etapa incluirá uma análise qualitativa de *benchmarking*, comparando os resultados obtidos com o código de Colherinhas (2025) que utiliza um algoritmo similar, em seguida, com soluções triviais observadas nas réplicas independentes previstas nessa metodologia. Essa comparação tem como objetivo verificar a consistência dos resultados e a confiabilidade do processo de otimização.

### 3.7 Comparação numérica

Esse item consiste na avaliação dos resultados de simulação. O objetivo é analisar a influência da temperatura nas respostas acústicas por meio da comparação entre o modelo  $MRSO_{(GE)}$  e o mesmo modelo simulado com propriedades do ar, denominado  $MRSO_{(AR)}$ .

Os recursos utilizados serão os softwares integrados na metodologia, e o processo consistirá em aplicar a geometria resultante da otimização em uma nova simulação exclusiva, em uma faixa ampliada de frequências, com possibilidade de inclusão de pontos. A análise será conduzida a partir da comparação das curvas e observação do domínio simulado conforme Tabela 3.6, e interpretação dos resultados.

Tabela 3.6: Resultados analíticos esperados.

| COMPARAÇÃO                 |                            | ANÁLISE                                  | ESPERADO                               |
|----------------------------|----------------------------|--|--|
| $MRSO_{(GE)}$<br>(Virtual) | $MRSO_{(AR)}$<br>(Virtual) | Avaliar influência da temperatura        | Diferença efetiva ao longo do espectro |
| $MRSO_{(GE)}$<br>(Virtual) |                            | Avaliar distribuição de pressão acústica | Diferença visual ao longo da geometria |

FONTE: Autoria própria (2025).

### 3.8 Validação experimental

No contexto deste trabalho, a validação envolverá necessariamente experimentos de bancada. O objetivo é verificar a consistência entre os resultados por meio do método das duas cargas, conforme ASTM E2611-09, que permite determinar a TL com tubo de impedância.

Essa etapa será dividida em duas: a primeira busca validar a otimização, confirmando se o resultado do processo computacional gerou uma solução protótipo com desempenho superior ao do silenciador de referência, e a segunda corresponde à validação da simulação verificando a coerência dos resultados numéricos em relação aos medidos em protótipo físico.

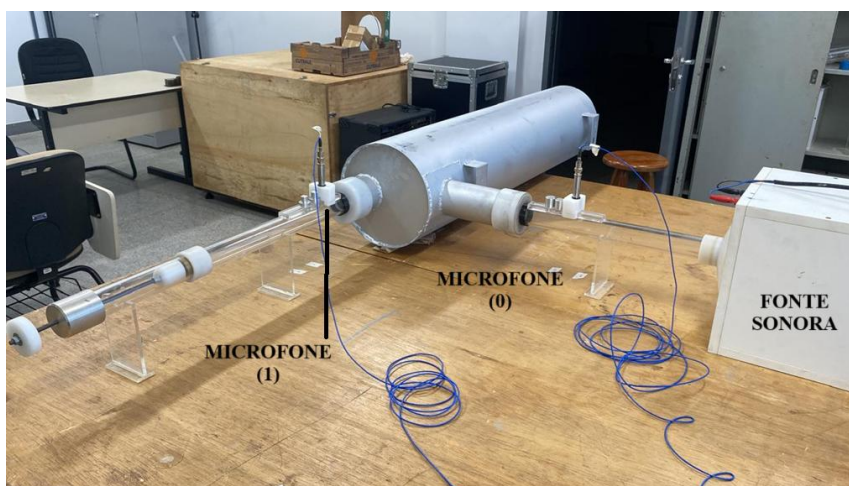
### 3.8.1 Material experimental

O material compreende tanto os equipamentos que compõem o aparato de medição quanto o objeto de medição, representado pelo  $SRSO_{(GE)}$ . Esse protótipo físico foi projetado a partir do  $MRSO_{(GE)}$ . Embora o modelo tenha sido otimizado em duas configurações ar, optou-se por realizar a prototipagem apenas para a de gás de escape, em razão dos custos.

O protótipo foi construído integralmente em aço carbono SAE 1010, utilizando chapas de 1 mm e 2 mm, de modo a garantir rigidez estrutural. Sua geometria seguiu rigorosamente as dimensões definidas no modelo ótimo, assegurando fidelidade entre a simulação e a peça.

Uma camada de lã de vidro foi aplicada para isolamento térmico conforme simplificação já estabelecida, sem interação, de forma a preservar o caráter puramente reativo do dispositivo. A Figura 3.13 apresenta o aparato experimental e o objeto de medição, evidenciando o tubo de impedância acoplado ao protótipo do silenciador.

Figura 3.13: Aparato experimental com protótipo  $SRSO_{(GE)}$ .



FONTE: Autoria própria (2025).

São visíveis dois microfones de medição posicionados em série e a fonte sonora localizada à direita, responsável pela excitação acústica. O silenciador está centralmente instalado entre os trechos do tubo transparente, em uma configuração baseada no padrão de tubo de impedância, com acoplamento axial. O sistema foi composto pelos seguintes itens:

- Gerador de sinais *Brüel & Kjaer Power Amplifier Type 2734*;
- Amplificador de potência *Leacs CA500*.
- Dois microfones de condensador *PCB 377A21*, posicionados em diferentes pontos;
- Carga reflexiva: tarugo de cobre com 25 mm de espessura;
- Carga absorvente: espuma *SONEX*, de alta capacidade de absorção.
- Placa de aquisição de dados *National Instruments NI USB-9162*, conectada a um computador com *MATLAB* conforme a imagem Figura 3.14:

Figura 3.14: Placa de aquisição.



FONTE: Autoria própria (2025).

### 3.8.2 Processo experimental

O processo refere-se à forma de execução dos ensaios, que serão conduzidos em cinco repetições independentes calculando posteriormente média e desvio padrão criando uma banda de incerteza, com o objetivo de avaliar a repetibilidade e garantir robustez metrológica. Em cada execução, serão coletadas seis funções de transferência em formato (.txt), em configuração vetorial matriz, entre dois microfones posicionados em pontos distintos ao longo do tubo, com duas configurações de carga agrupadas em muito e pouco reflexiva pela quantidade de espuma e lã conforme a imagem Figura 3.15. Além disso, de forma complementar foi feita uma análise das configurações experimentais descrita em Apêndice D.

A coleta de dados será feita no ambiente *MATLAB*, conforme software de Silva e Fagundes Neto (2024). Durante os testes, a coerência do sinal entre os microfones será monitorada em toda a faixa de frequência. Esse parâmetro é essencial para assegurar a qualidade das medições, pois garante correlação adequada entre os sinais de entrada e saída.

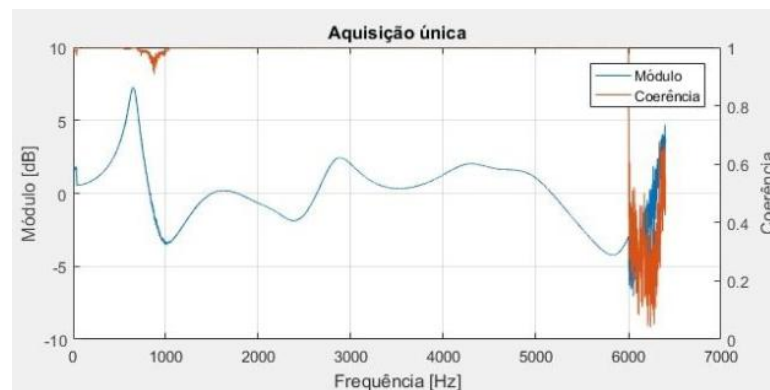
Figura 3.16: Interface de aquisição com coerência do sinal.



FONTE: Autoria própria (2025).

Apenas os dados que apresentarem níveis adequados de coerência serão considerados. Adicionalmente, será obtido e apresentado nos resultados um gráfico de coerência, em conformidade com as boas práticas estabelecidas pela norma. A Figura 3.17 ilustra a interface de aquisição de dados, destacando a visualização da coerência durante o processo.

Figura 3.17: Interface de aquisição com coerência do sinal.



FONTE: Adaptado Silva e Fagundes Neto (2024).

O sistema registra as funções coletadas entre os microfones sob cada uma das cargas, possibilitando a estimativa da TL em função da frequência. O tratamento matemático subsequente é realizado mediante a inserção dessas funções de transferência em um segundo software, também em MATLAB. As medições do espectro foram conduzidas até 3,4 kHz, em conformidade com as limitações do aparato. Ademais, essa faixa abrange a região crítica de 1,5 a 2,5 kHz, que corresponde à mesma faixa utilizada no processo de otimização.

Como parte do processo de validação da simulação, cabe ressaltar que, conforme discutido anteriormente, os ensaios experimentais foram realizados em temperatura ambiente, enquanto o protótipo foi concebido para operação com gás de escape, o que limita a comparação direta dos resultados. Para garantir a compatibilidade das análises, foi realizada uma simulação

complementar considerando a mesma geometria, porém com propriedades acústicas correspondentes ao ar, permitindo comparações consistentes entre simulação e experimento.

Finalmente, dentro do processo de validação da otimização a comparação experimental entre o protótipo  $SRSO_{(GE)}$  e o silenciador de referência SCNO, cujo projeto apresenta condições desconhecidas. Ambos serão avaliados pelo método das duas cargas em temperatura ambiente, em função da mesma limitação já mencionada.

Ainda assim, essa comparação se justifica porque permite verificar, em condições equivalentes de ensaio, se o processo de otimização foi capaz de gerar um modelo simplificado com desempenho acústico superior ao de um silenciador comercial.

### 3.8.3 Análise experimental

A análise refere-se à etapa de interpretação dos resultados após a execução do processo o termo comparado nesta etapa TL em função da frequência. A Tabela 3.7 apresenta uma síntese dos itens e critérios definidos para cada comparação, assim como resultados esperados.

Tabela 3.7: Resultados experimentais esperados.

| COMPARAÇÃO                      |                                 | VALIDAÇÃO                         | ESPERADO  |
|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---|
| SCNO<br>(Experimental)          | $SRSO_{(GE)}$<br>(Experimental) | Avaliar eficácia<br>da otimização | Ótimo > referência ao longo<br>da faixa crítica e média |
|                                 |                                 |                                   | Ótimo equivalente a<br>referência no espectro           |
| $SRSO_{(GE)}$<br>(Experimental) | $MRSO_{(GE)-(AR)}$<br>(Virtual) | Medir eficiência<br>da simulação  | Diferença pequena ao longo<br>da faixa crítica          |

FONTE: Autoria própria (2025).

## 3.9 Certificação normativa

No âmbito deste trabalho, a certificação envolverá necessariamente testes práticos operacionais normatizados. O objetivo é verificar a consistência dos resultados por meio do método da superfície envolvente, conforme a ABNT NBR 8528-10, que permite determinar o nível de potência e pressão sonora no filtro de ponderação (A) de grupos geradores em funcionamento pleno. Essa etapa será conduzida visando certificar a otimização, confirmando, por meio de procedimento padronizado, se o resultado do processo computacional gerou um protótipo com desempenho superior ao silenciador de referência.

### 3.9.1 Material normativo

O material normativo abrange tanto os equipamentos que compõem o aparato de medição quanto o objeto de estudo  $SRSO_{(GE)}$ , instalado em um grupo gerador com carenagem metálica, condição que facilita a execução do ensaio e está prevista na norma. O objeto de estudo está instalado em uma carenagem da linha FIT 100 kVA de baixo custo, conforme o estudo de caso. Esse protótipo físico foi projetado a partir do  $MRSO_{(GE)}$ .

Embora o modelo tenha duas configurações já mencionadas, optou-se por realizar a prototipagem apenas para a condição de gás de escape, em função dos custos associados ao funcionamento de geradores a diesel. Esse conjunto se torna objeto de medição macro em um grupo gerador a diesel carenado com silenciador interno, com dimensões industriais aproximadas de 3,6 metros de comprimento, um metro de largura e 2,2 metros de altura. A Figura 3.18 ilustra o equipamento, no qual se observa o gerador na carenagem.

Figura 3.18: Gerador usado na medição normativa.



FONTE: Autoria própria (2025).

O equipamento principal do aparato foi um sonômetro digital integrador Classe 1, modelo *Larson Davis* 831, mostrado na Figura 3.17. Esse sonômetro foi utilizado com ponderação A, resposta lenta e montado sobre tripé nivelado. O equipamento foi previamente calibrado utilizando referência interna de 94 dB a 1 kHz, com checagem realizada antes e após cada ensaio para garantir a rastreabilidade metrológica.

Figura 3.19: Sonômetro integrador (classe 1).



FONTE: Autoria própria (2025).

Além do sonômetro, compuseram os equipamentos utilizados:

- Tripé com ajuste vertical e base rígida;
- Trena métrica e régua de medição para verificação das distâncias;
- Cronômetro digital para controle de tempo de amostragem;

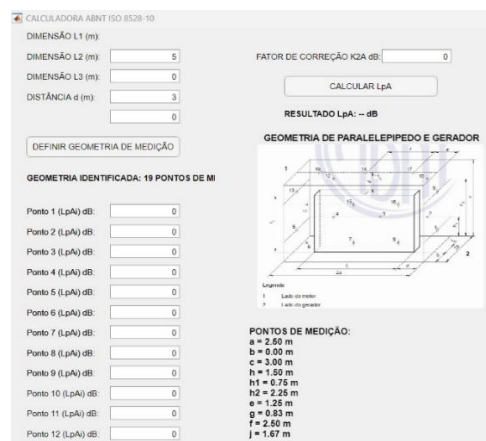
### 3.9.2 Processo normativo

Esse item refere-se à execução dos ensaios normativos, conduzidos conforme a norma descrita no Anexo A. Aspectos metrológicos, como a quantidade de repetições, as posições dos microfones em função das dimensões do objeto, a qualidade do procedimento, as medições e os fatores de correção, são considerados para garantir a confiabilidade. Basicamente, o procedimento consiste em medir o nível de pressão sonora em pontos predefinidos envolvendo o objeto de medição macro e registrar os dados obtidos.

Paralelamente, serão observados parâmetros operacionais do motor, como a contrapressão de escape e a temperatura de funcionamento, de modo a garantir que o grupo gerador opere dentro de condições especificadas pelo fabricante. Esses registros não têm caráter quantitativo formal, mas fornecem suporte qualitativo para a os resultados, assegurando que o desempenho acústico esteja associado ao regime adequado de operação do equipamento.

Além disso, os dados coletados são inseridos em um software de processamento, desenvolvido em MATLAB pelo autor especificamente para esta dissertação. Esse código organiza os níveis sonoros por ponto de medição e converte os valores de pressão em potência sonora média logarítmica, de acordo com os critérios da metodologia da superfície envolvente. A Figura 3.20 apresenta a interface gráfica do sistema.

Figura 3.20: Software de aquisição de dados.



FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

### 3.9.3 Análise normativa

A análise refere-se à etapa de interpretação dos resultados após a execução do processo o termo comparado nesta etapa nível de pressão e potência sonora. A Tabela 3.8 apresenta uma síntese dos itens e critérios definidos para comparação, assim como resultados esperados.

Tabela 3.8: Resultados normativos esperados.

| COMPARAÇÃO            |                                       | ANÁLISE                               | ESPERADO  |
|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
| SCNO<br>(ISO 8528-10) | SRSO <sub>(GE)</sub><br>(ISO 8528-10) | Confirmar eficácia da<br>otimização   | Nível global de pressão<br>sonora ótimo > referência  |
|                       |                                       |                                       | Nível global de potência<br>sonora ótimo > referência |
|                       |                                       | Checar temperatura e<br>contrapressão | Manter condições com<br>variação inferior a 5%        |

FONTE: Autoria própria (2025).

## 3.10 Análise de viabilidade

Além disso, viabilidade econômica busca verificar se a simplificação geométrica e a otimização tornaram o modelo SRSO<sub>(GE)</sub> mais competitivo em termos financeiros. Serão comparados aspectos como custo de matéria-prima, tempo de fabricação, complexidade de montagem e redução de custo de chapas perfuradas. Os dados foram obtidos por meio de cotações de mercado, registros de oficina e estimativas. A Tabela 3.9 apresenta uma síntese da análise e dos resultados esperados.

Tabela 3.9: Resultados econômicos esperados.

| COMPARAÇÃO        |                                   | ANÁLISE                             | ESPERADO  |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---|
| SCNO<br>(análise) | SRSO <sub>(GE)</sub><br>(análise) | Avaliar custos de matéria-prima     | Redução no custo e peso<br>dos componentes de aço |
|                   |                                   | Avaliar produtividade quantitativa  | Redução do tempo no<br>processo de corte          |
|                   |                                   | Avaliar a produtividade qualitativa | Redução do tempo no<br>processo de solda          |

FONTE: Autoria própria (2025).



## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos com a metodologia proposta, envolvendo modelagem, simulação e otimização. Os resultados estão organizados em seções. Em seguida, apresenta-se a consolidação dos resultados e a investigação do desempenho. Na sequência, são realizadas a comparação analítica, a validação experimental e a certificação. Além disso, no Apêndice B é apresentada a equivalência funcional entre as operações booleanas no MAPDL, validando a modelagem adotada.

### 4.1 Consolidação da otimização

Antes da apresentação, destacam-se os resultados gerais das réplicas realizadas na fase de otimização. Cada foi executada de forma independente, com populações iniciais aleatórias, permitindo observar a variabilidade do processo. A Tabela 4.2 e Tabela 4.1 resume o desempenho de cada réplica, considerando ar a 20 °C e gás de escape a 700 °C, e apresenta a geração em que surgiu o melhor indivíduo, o número total de gerações e a quantidade de indivíduos. Observa-se que, mesmo com um número reduzido de gerações, soluções de alto desempenho foram encontradas em estágios iniciais, evidenciando a eficácia do algoritmo.

Tabela 4.2: Resumo de réplicas  $MRSO_{(AR)}$ .

| <b><math>MRSO_{(AR)} (T=20^{\circ}C)</math></b> |                           |                          |                            |
|---|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| <b>ARQUIVO</b>                                  | <b>GERAÇÃO MELHOR IND</b> | <b>TOTAL DE GERAÇÕES</b> | <b>TOTAL DE INDIVÍDUOS</b> |
| Réplica 1                                       | 22                        | 31                       | 310                        |
| Réplica 2                                       | 17                        | 26                       | 260                        |
| Réplica 3                                       | 11                        | 20                       | 200                        |
| Réplica 4                                       | 11                        | 20                       | 200                        |
| Réplica 5                                       | 38                        | 47                       | 470                        |

FONTE: Autoria própria (2025).

Tabela 4.3: Resumo de réplicas  $MRSO_{(GE)}$ .

| <b><math>MRSO_{(GE)} (T=700^{\circ}C)</math></b> |                           |                          |                            |
|--|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| <b>ARQUIVO</b>                                   | <b>GERAÇÃO MELHOR IND</b> | <b>TOTAL DE GERAÇÕES</b> | <b>TOTAL DE INDIVÍDUOS</b> |
| Réplica 1  | 21                        | 30                       | 300                        |
| Réplica 2  | 25                        | 34                       | 340                        |
| Réplica 3  | 22                        | 31                       | 310                        |
| Réplica 4  | 8                         | 17                       | 170                        |
| Réplica 5  | 21                        | 30                       | 300                        |

FONTE: Autoria própria (2025).

Complementando essas informações, a Tabela 4.4 apresenta a variação dos parâmetros de mutação em cada réplica. Observa-se que réplicas com taxas de mutação moderadas, entre 30% e 50%, apresentaram bom equilíbrio entre diversidade genética e convergência, enquanto valores baixos ou altos influenciaram diretamente a dispersão da população e o tempo de convergência, inclusive de forma suplementar foi feita uma análise de tempo computacional detalhada no Apêndice C. Esses ajustes permitiram analisar o comportamento do algoritmo.

Tabela 4.5: Resumo de réplicas tipos de mutação.

| ARQUIVO   | TIPO DE MUTAÇÃO | TIPO          | CRITÉRIO DE PARADA |
|-----------|-----------------|---------------|--------------------|
| Réplica 1 | Padrão          | AR            | 10                 |
| Réplica 2 | Aumentada       |               |                    |
| Réplica 3 | Padrão          |               |                    |
| Réplica 4 | Aumentada       |               |                    |
| Réplica 5 | Padrão          |               |                    |
| Réplica 1 | Aumentada       | GÁS DE ESCAPE |                    |
| Réplica 2 | Padrão          |               |                    |
| Réplica 3 | Aumentada       |               |                    |
| Réplica 4 | Padrão          |               |                    |
| Réplica 5 | Aumentada       |               |                    |

FONTE: Autoria própria (2025).

Os resultados apresentados nesta seção referem-se à aplicação do sistema integrado no ANSYS MAPDL, simulação acústica harmônica e avaliação automática por meio de GA implementado no MATLAB. O objetivo foi maximizar a Transmission Loss média na faixa crítica entre 1500 Hz e 2500 Hz, considerada relevante para o ruído de grupos geradores a diesel. Os resultados sintetizados para cada réplica estão apresentados na Tabela 4.4.

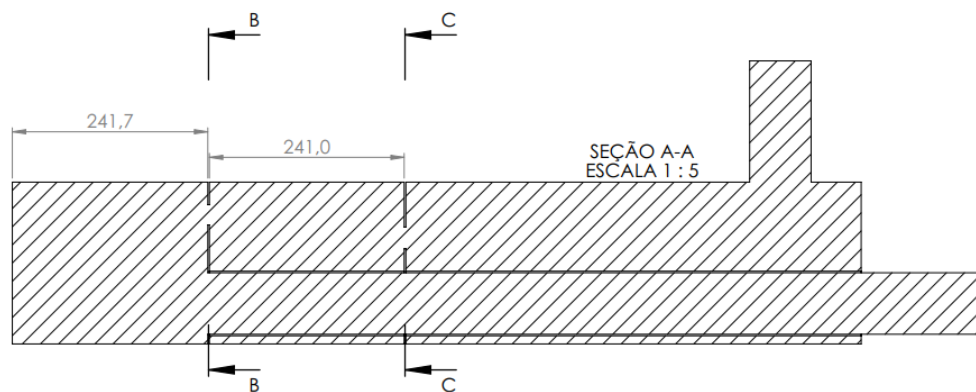
Tabela 4.6: Resultados melhores soluções.

| PROPRIEDADES | AR  | GÁS DE ESCAPE   |
|--------------|---|---|
|              | $C_o = 343 \text{ m/s}$ $\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$<br>$z_o = 413,30 \text{ Rayls}$ | $C_o = 625 \text{ m/s}$ $\rho = 0.363 \text{ kg/m}^3$<br>$z_o = 226,82 \text{ Rayls}$ |
| RÉPLICA      | TL máx. Média (1500 – 2500)   | TL máx. Média (1500 – 2500)   |
| 1            | 55,35   | 57,24   |
| 2            | 57,52   | 56,91   |
| 3            | 45,72   | 62,05   |
| 4            | 49,55   | 59,44   |
| 5            | 57,84   | 55,57   |

FONTE: Autoria própria (2025).

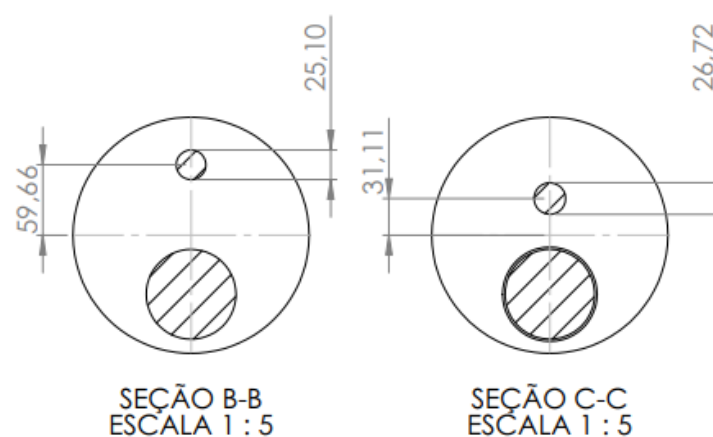
Com base nos dados da Tabela 4.6, observou-se que o modelo mais eficiente para o caso de propagação no meio com ar a 20 °C foi identificado na quinta réplica, apresentando um valor médio de TL de 57,84 dB na faixa crítica. Esse modelo, doravante denominado  $MRSO_{(AR)}$ , foi obtido na geração 37 do GA, sendo o indivíduo 6 da população. Os parâmetros geométricos ótimos correspondem a: (241,7 mm; 241 mm; 25,1 mm; 26,72 mm; 59,66 mm; 31,11 mm), representando, respectivamente, o comprimento das câmaras 1 e 2, os diâmetros dos defletores perfurados e seus deslocamentos (offsets). A Figura 4.1 e Figura 4.2 apresenta o desenho técnico final do  $MRSO_{(AR)}$  com todas as dimensões cromossômicas.

Figura 4.1: Desenho técnico vista A-A em cortes  $MRSO_{(AR)}$ .



Fonte: Adaptado SOLIDWORKS (2025).

Figura 4.2: Desenho técnico vista B-B e C-C em cortes  $MRSO_{(AR)}$ .

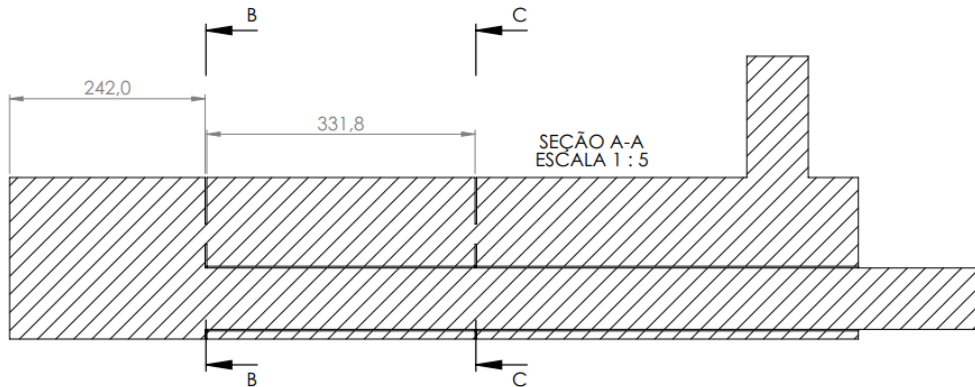


FONTE: Adaptado SOLIDWORKS (2025).

Para a condição com gás de escape a 700 °C, o melhor desempenho foi obtido na terceira réplica, com valor médio de TL de 62,05 dB. O indivíduo selecionado, nomeado Modelo Otimizado  $MRSO_{(GE)}$ , emergiu na geração 21 como o segundo indivíduo mais adaptado daquela

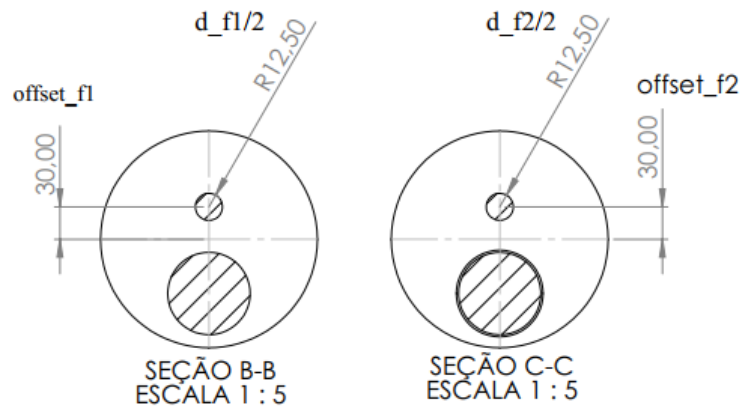
população. A configuração otimizada foi: (242 mm; 331,8 mm; 25 mm; 25 mm; 30 mm; 30 mm), apresentando câmaras de comprimento assimétrico e defletores menores e centralizados. A Figura 4.3 e Figura 4.4 apresenta o desenho técnico final do  $MRSO_{(GE)}$ , com dimensões geométricas detalhadas e exportadas em formato (.igs).

Figura 4.3: Desenho técnico vista A-A em cortes  $MRSO_{(GE)}$ .



FONTE: Adaptado SOLIDWORKS (2025).

Figura 4.4: Desenho técnico vista A-A em cortes  $MRSO_{(GE)}$ .



FONTE: Adaptado SOLIDWORKS (2025).

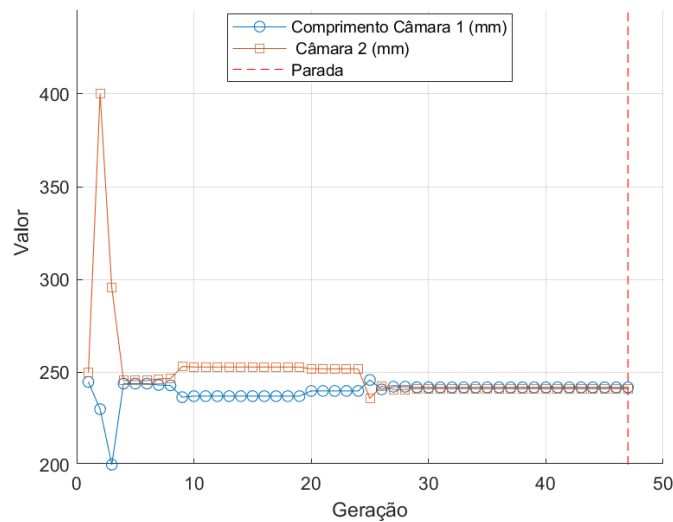
## 4.2 Investigação de desempenho da otimização

A seguir, apresenta-se uma análise gráfica detalhada dos resultados obtidos por meio do processo de otimização acústica nas duas condições de fluido: ar a 20 °C e gás de escape a 700 °C. As figuras exibidas referem-se às réplicas que atingiram os melhores desempenhos em cada condição, com destaque para a evolução dos parâmetros geométricos, convergência da função objetivo, dispersão espectral da TL e diversidade genética.

#### 4.2.1 Análise gráfica $MRSO_{(AR)}$

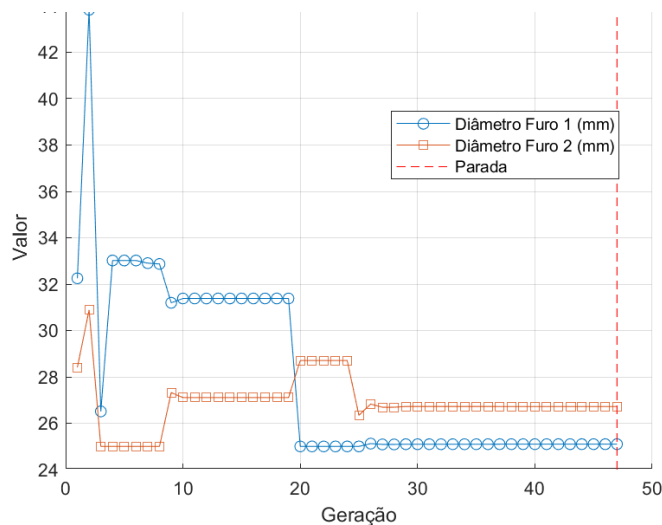
A Figura 4.5, Figura 4.6 e Figura 4.7 apresentam a evolução dos parâmetros do  $MRSO_{(AR)}$  ao longo de 48 gerações. Observa-se uma estabilização dos comprimentos das câmaras (Figura 4.7), em torno de 241 mm e 250 mm, após oscilações iniciais. Isso sugere uma região de ótimo local. Os diâmetros dos furos (Figura 4.8) também convergem precocemente para valores entre 25 mm e 27 mm, indicando pouca variação eficaz. Já os offsets (Figura 4.9) estabilizam em 60 mm e 30 mm, mostrando preferência para configuração assimétrica. A tendência é de estabilização a partir da geração 20, reforçando a capacidade de refinar soluções.

Figura 4.5: Evolução do comprimento das câmaras 1 e 2 (mm) –  $MRSO_{(AR)}$ .



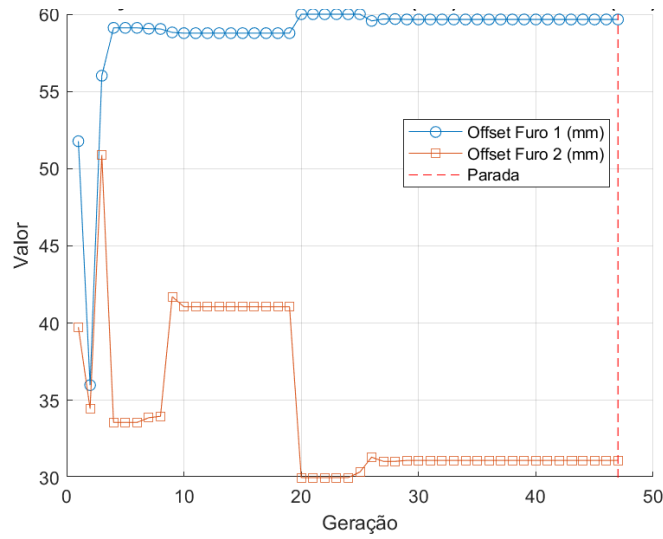
FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

Figura 4.6: Evolução dos diâmetros dos furos 1 e 2 (mm) –  $MRSO_{(AR)}$ .



FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

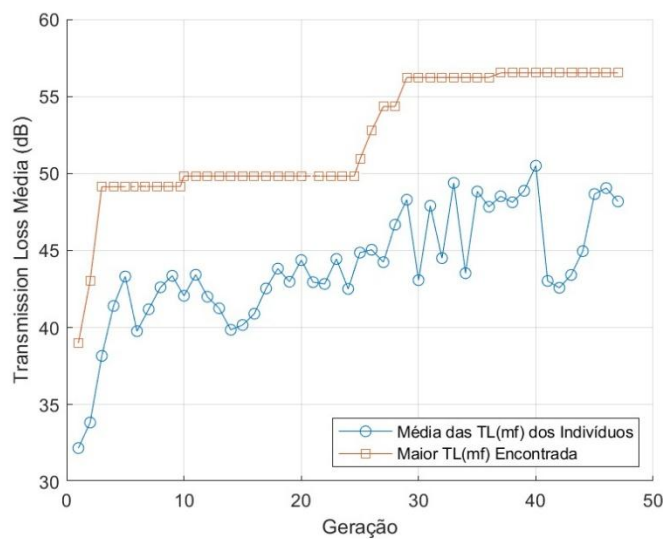
Figura 4.7: Evolução dos offsets dos furos 1 e 2 (mm) – MRSO<sub>(AR)</sub>.



FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

A Figura 4.8 exibe a convergência da função objetivo para o modelo com ar. A TL média dos indivíduos ao longo da geração cresce de 35 dB para cerca de 47 dB, enquanto a TL máxima média na faixa de otimização atinge 57,84 dB e mantém esse valor até o fim do processo. A curva mostra saltos pontuais e platôs, compatíveis com a exploração seguida de convergência. O platô final, entre as gerações 37 e 48, confirma a saturação da busca, justificando a parada por estagnação.

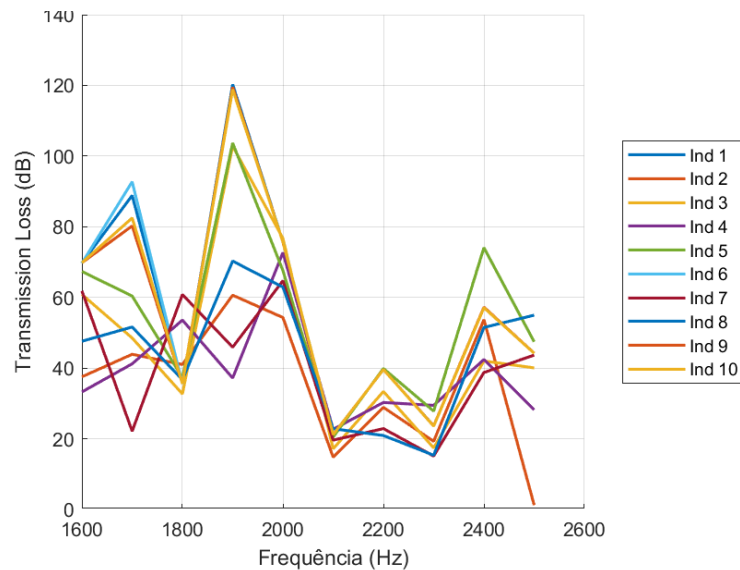
Figura 4.8: Convergência da TL média e máxima – MRSO<sub>(AR)</sub>.



FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

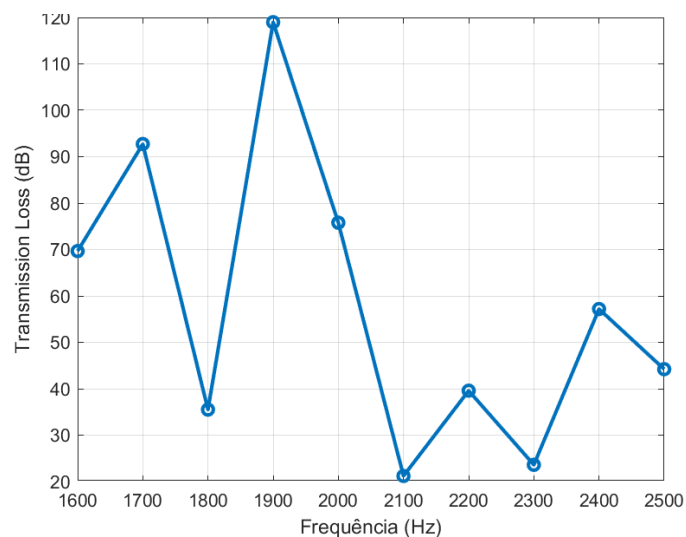
A Figura 4.9 e Figura 4.10 mostram a distribuição da TL em função da frequência para os indivíduos da geração 37 e para o melhor indivíduo. A curva TL da geração (Figura 4.11) exibe ampla dispersão, com picos localizados em diferentes faixas. Já o melhor indivíduo (Figura 4.12) mostra um perfil mais estável, com pico superior a 110 dB em 2000 Hz, confirmando que a solução final concentra atenuação justamente na frequência crítica.

Figura 4.9: TL – Geração 37 –  $MRSO_{(AR)}$ .



FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

Figura 4.10: TL – Melhor indivíduo –  $MRSO_{(AR)}$ .

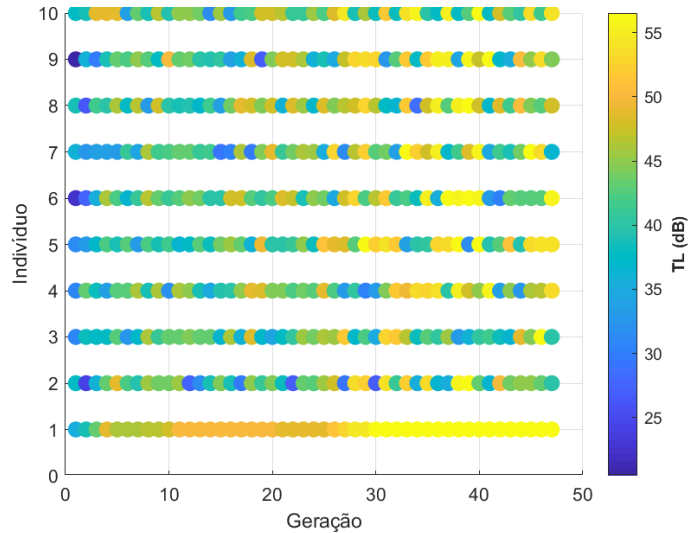


FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

A Figura 4.11 mostra a distribuição da TL média entre os indivíduos ao longo das gerações. A coloração revela elevada diversidade inicial, seguida de acúmulo de indivíduos

com TL acima de 50 dB a partir da geração 25. Isso indica melhora populacional mesmo após a convergência do melhor indivíduo, reforçando o elitismo e da mutação intensificada.

Figura 4.11: Distribuição da TL por indivíduo e geração –  $\text{MRSO}_{(\text{AR})}$ .

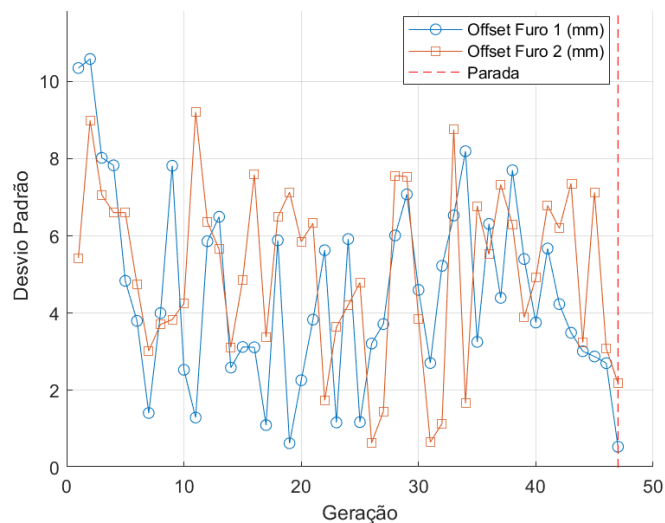


FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

A Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14 mostram a evolução do desvio padrão dos parâmetros ao longo das gerações. A diversidade dos offsets (Figura 4.12) e dos diâmetros (Figura 4.13) apresenta oscilações até a geração 35, mas tende a zero nas últimas gerações.

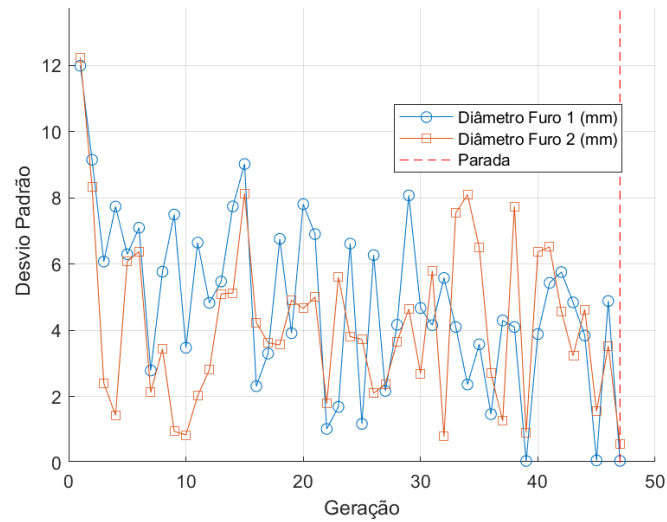
Já a diversidade dos comprimentos (Figura 4.14) estabiliza em um patamar médio, refletindo uma estagnação controlada, com leve manutenção de variabilidade útil. Isso demonstra que a mutação reforçada (50%) evitou a convergência prematura.

Figura 4.12: Diversidade genética: offset dos furos –  $\text{MRSO}_{(\text{AR})}$ .



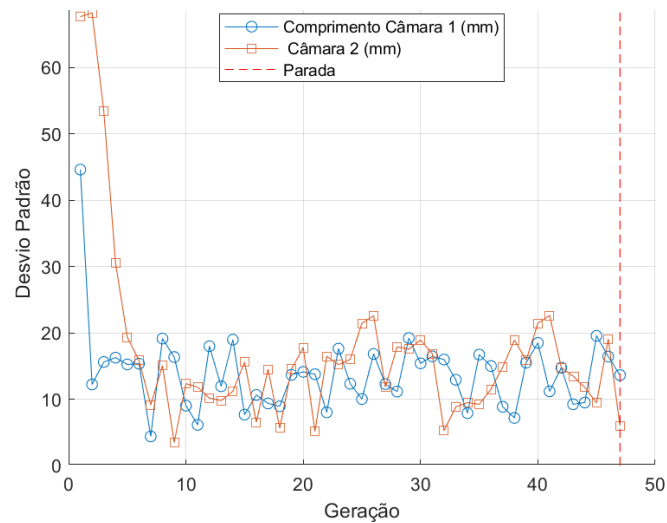
FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

Figura 4.13: Diversidade genética: diâmetro dos furos –  $MRSO_{(AR)}$ .



FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

Figura 4.14: Diversidade genética: comprimento das câmaras –  $MRSO_{(AR)}$ .

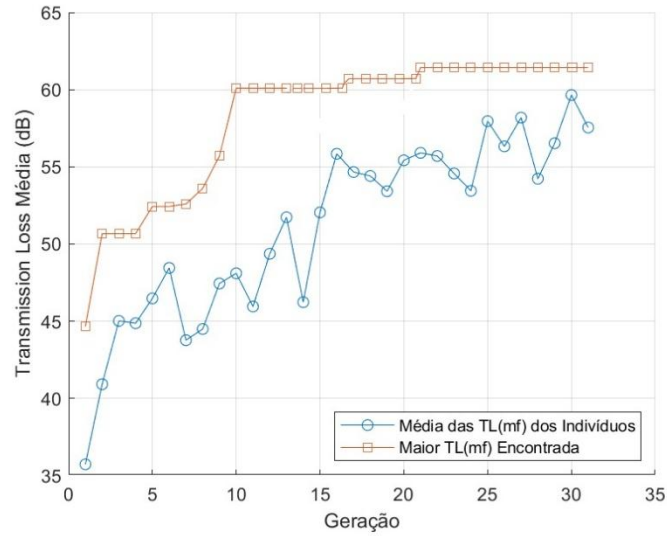


FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

#### 4.2.2 Análise gráfica $MRSO_{(GE)}$

Na Figura 4.15, observa-se que a TL média dos indivíduos ao longo da geração cresce de 35 dB para 58 dB, enquanto a TL máxima média na faixa de otimização chega a 62,05 dB já na geração 21. A curva revela um comportamento mais agressivo de convergência em relação ao ar, com melhorias rápidas até a geração 15, seguidas de estabilidade. A maior TL alcançada evidencia o potencial do algoritmo em fluidos com propriedades diferentes.

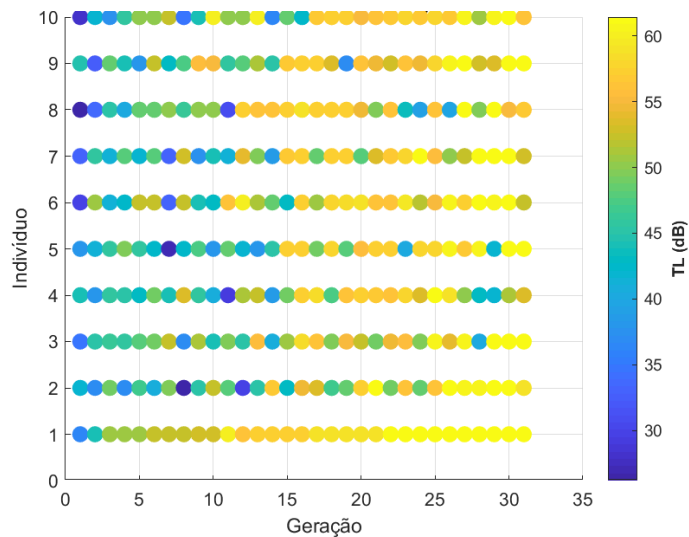
Figura 4.15: Convergência da TL média e máxima –  $\text{MRSO}_{(\text{GE})}$ .



FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

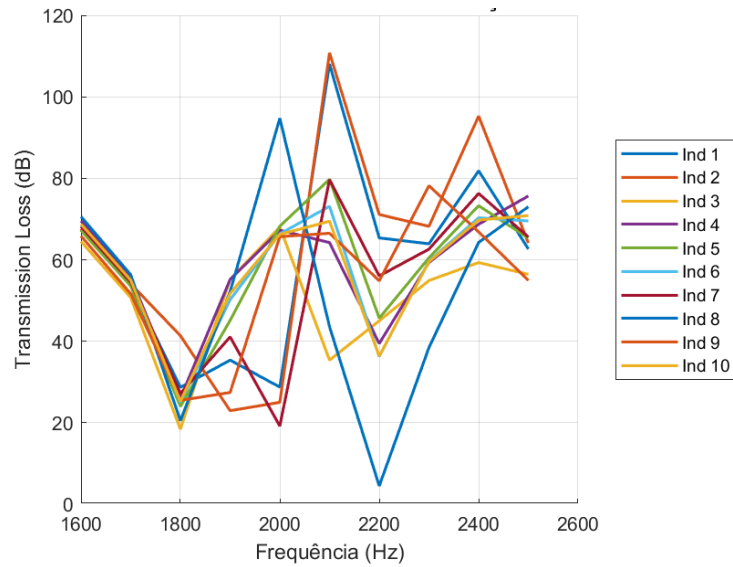
A Figura 4.16 mostra uma população com alta TL média em quase todas as gerações, com boa homogeneidade e menor dispersão em relação ao caso com ar. Os indivíduos mantêm desempenho acima de 50 dB, o que indica alto nível de qualidade da população otimizada.

Figura 4.16: Distribuição da TL por indivíduo e geração –  $\text{MRSO}_{(\text{GE})}$ .

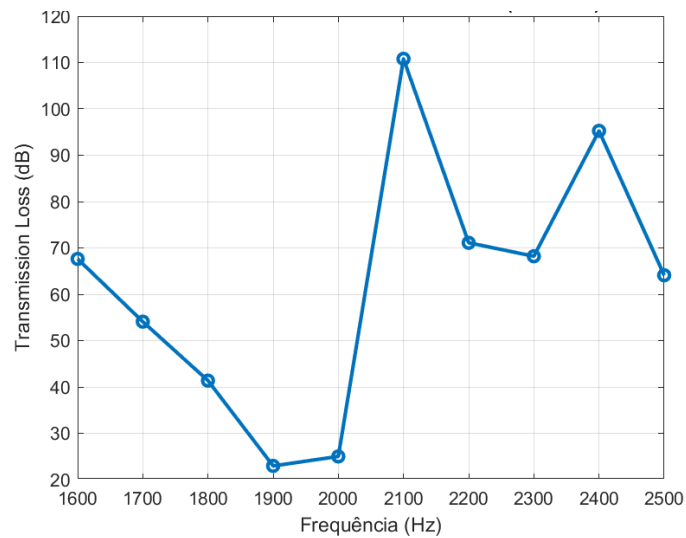


FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

O curvas de TL da geração 21 (Figura 4.17) apresenta maior densidade de TL elevada entre 1900 Hz e 2400 Hz, com múltiplos indivíduos superando os 90 dB. O melhor indivíduo (Figura 4.18) exhibe perfil altamente uniforme, com TL acima de 100 dB em várias frequências, validando sua superioridade na média geral.

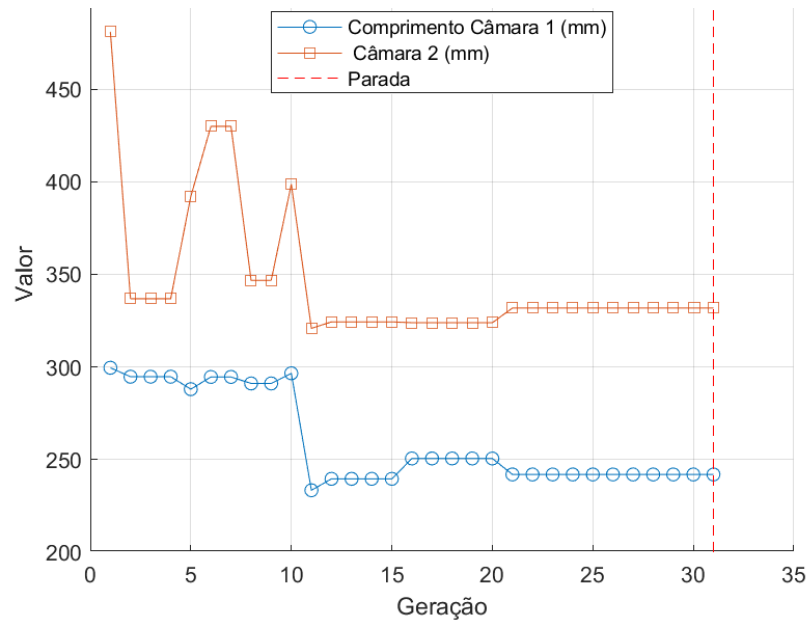
Figura 4.17: TL – Geração 21 – MRSO<sub>(GE)</sub>.

FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

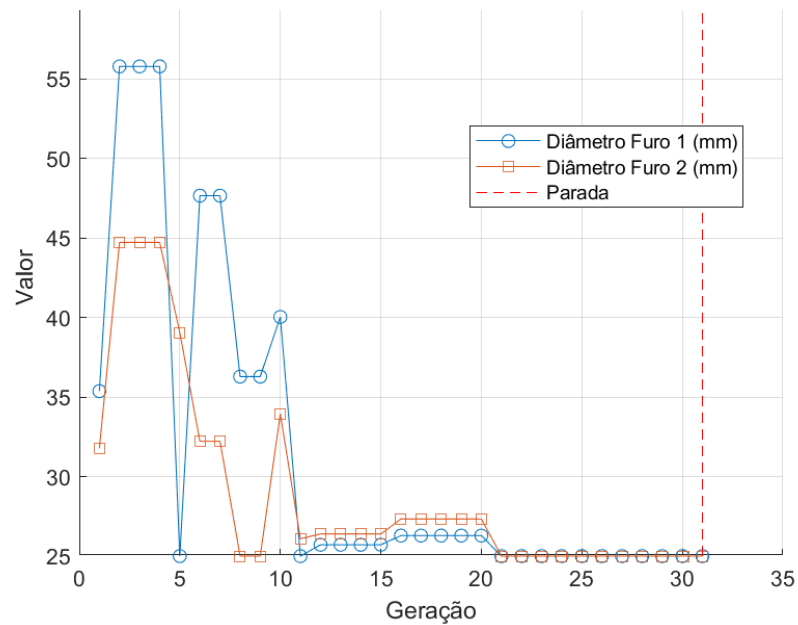
Figura 4.18: Melhor indivíduo – MRSO<sub>(GE)</sub>.

FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

A Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21 mostram a evolução dos parâmetros geométricos. A estabilização ocorre mais cedo, com convergência visível antes da geração 15. O algoritmo rapidamente concentra os valores em torno da configuração ideal: câmaras com ~240 mm e ~330 mm, furos de ~25 mm e offsets de 30 mm. Isso sugere que as propriedades do fluido influenciam positivamente a sensibilidade do modelo às variações geométricas.

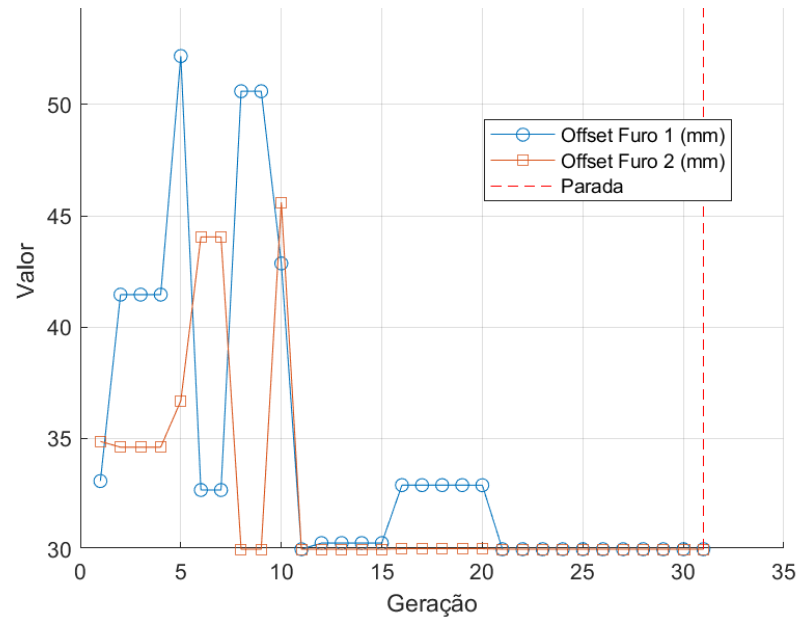
Figura 4.19: Evolução dos comprimentos das câmaras – MRSO<sub>(GE)</sub>.

FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

Figura 4.20: Evolução dos diâmetros dos furos – MRSO<sub>(GE)</sub>.

FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

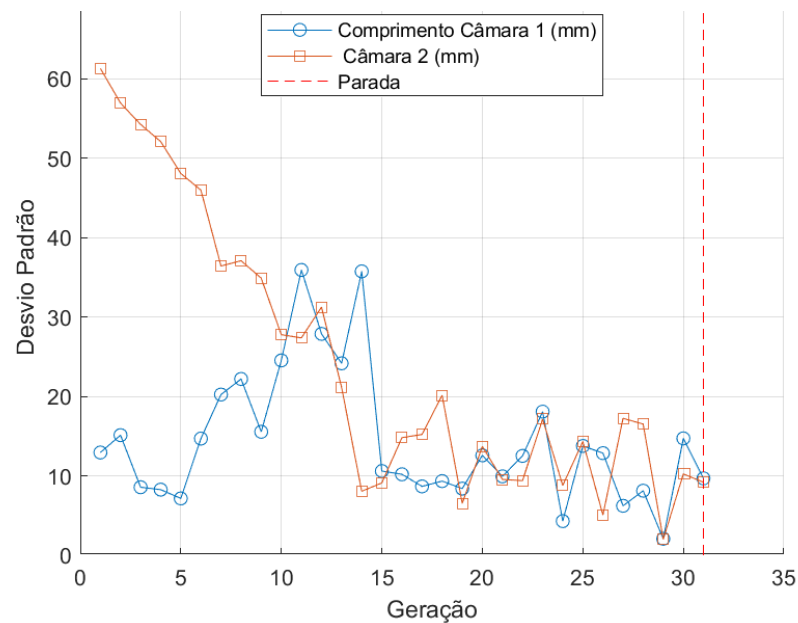
Figura 4.21: Evolução dos offsets dos furos –  $MRSO_{(GE)}$ .



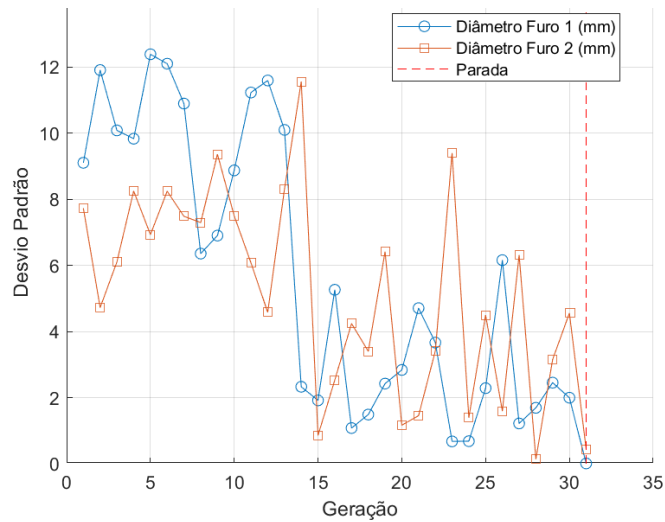
FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

A Figura 4.22, Figura 4.23 e Figura 4.24 indicam que, apesar da rápida convergência, a população manteve diversidade até a geração 25. As oscilações nos desvios padrão dos parâmetros sugerem que a mutação seguiu influente mesmo após a descoberta do ótimo, garantindo robustez e evitamento de soluções degeneradas.

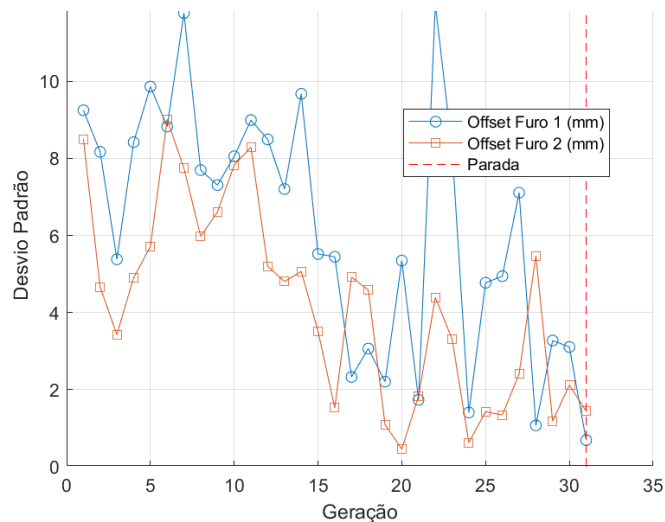
Figura 4.22: Diversidade genética: comprimento das câmaras –  $MRSO_{(GE)}$ .



FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

Figura 4.23: Diversidade genética: diâmetro dos furos –  $MRSO_{(GE)}$ .

FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

Figura 4.24: Diversidade genética: offset dos furos –  $MRSO_{(GE)}$ .

FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

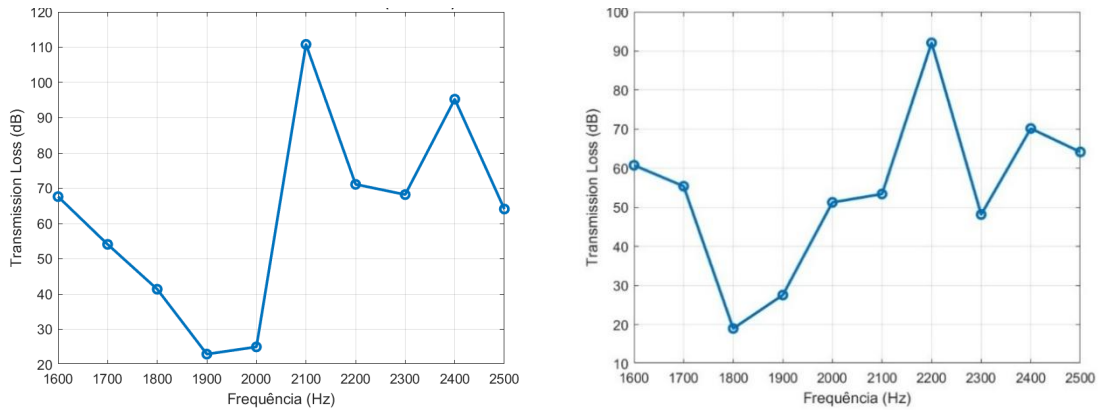
### 4.2.3 Capacidade de convergência

Como etapa, realizou-se um *benchmark* utilizando um segundo código independente, implementado em Python com PyMAPDL PYMOO, conforme Colherinhas (2025). Esse código reproduz o mesmo problema de otimização geométrica do  $MRSO_{(GE)}$ , com idêntico conjunto de variáveis, limites de projeto e faixa de frequências. O procedimento é verificar a coerência entre diferentes ambientes computacionais e confirmar a capacidade de convergência.

Para comparação, foi executada uma otimização piloto, composta por 5 indivíduos e 10 gerações, destinada exclusivamente a validar o fluxo. A curva de TL obtida para o melhor

indivíduo é apresentada na Figura 4.25, e o valor ótimo médio encontrado foi 57,19 dB. Esse resultado se encontra dentro do intervalo de valores observados na Tabela 4.6 para as réplicas do processo principal, demonstrando consistência entre as duas abordagens.

Figura 4.25 Curva TL ótima PyMAPDL PYMOO x MATLAB.



FONTE: Adaptado PyMAPDL (2025).

Além da compatibilidade numérica, observou-se que as réplicas tanto do código desta dissertação quanto o *benchmark* convergem para os valores mínimos admissíveis dos diâmetros internos (25 mm). Tal comportamento corresponde à chamada solução trivial, que é fisicamente coerente com o fenômeno analisado: diâmetros menores tendem a aumentar a impedância local, intensificando a reflexão acústica e, portanto, ampliando a TL. Essa tendência é verificada nos resultados consolidados da Tabela 4.7, reforçando que a função objetivo está alinhada ao comportamento esperado e que o algoritmo explora o maior desempenho.

Tabela 4.7: Convergência dos diâmetros internos nas réplicas.

| MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO | PERCENTUAL CONVERGÊNCIA |
|----------------------|-------------------------|
| MATLAB APDL          | 70%                     |
| PyMAPDL PYMOO        | 66,70%                  |

FONTE: Autoria própria (2025).

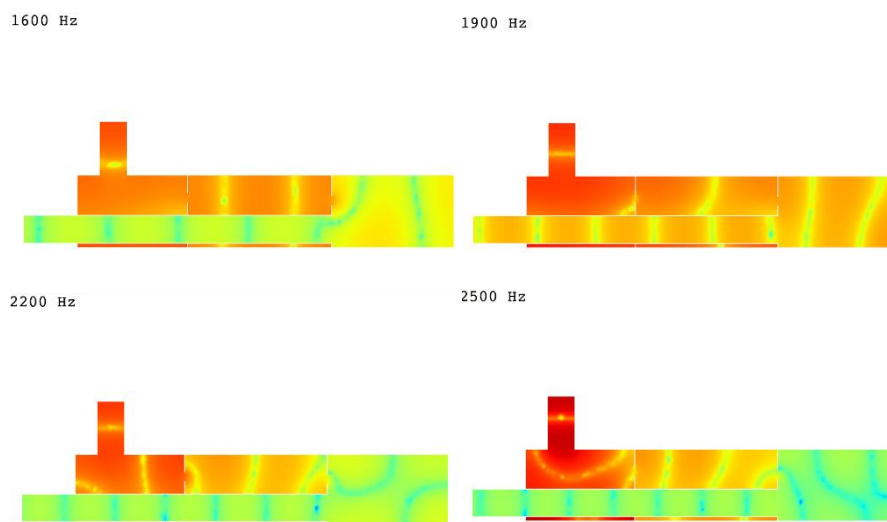
Dessa forma, o benchmark atesta a robustez do método de otimização sem uma análise profunda de performance sobre a quantidade de gerações e indivíduos, uma vez que diferentes implementações produzem resultados compatíveis.

## 4.3 Resultados numéricos

### 4.3.1 Análise pressão sonora

A geometria otimizada para a condição de gás quente foi submetida a uma análise complementar no ambiente do ANSYS MAPDL, com o objetivo de visualizar a distribuição espacial do nível de pressão sonora ao longo do domínio interno do silenciador. A apresenta o campo de nível de pressão sonora obtido a partir da solução harmônica nas frequências de 1600, 1900, 2200 e 2500 Hz, todas inseridas na faixa crítica de otimização.

Figura 4.26: Nível de pressão sonora no  $MRSO_{(GE)}$ .



FONTE: Adaptado ANSYS MAPDL (2025).

De modo geral, observa-se que as regiões associadas a níveis mais elevados de pressão sonora concentram-se principalmente nas proximidades da entrada do silenciador e nas transições entre as câmaras internas, enquanto, na longitudinal, ocorre uma atenuação progressiva do campo acústico, evidenciada pela predominância de níveis mais baixos na região de saída. Esse comportamento indica uma redistribuição eficiente da energia promovida pela geometria, com redução gradual da intensidade sonora ao longo do percurso.

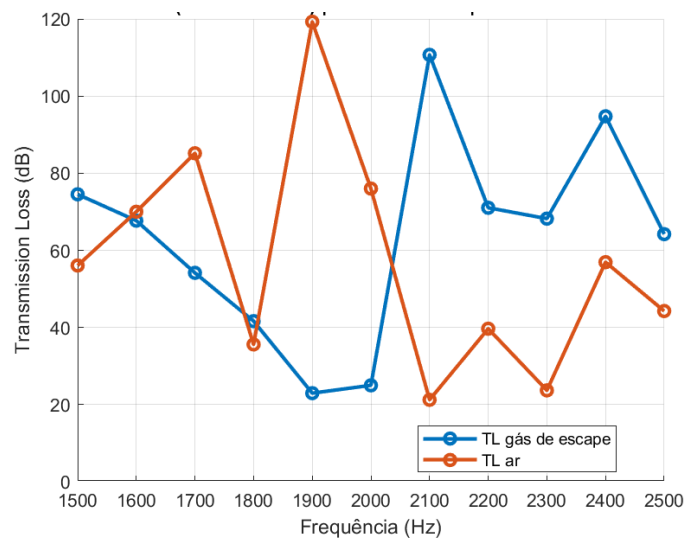
Adicionalmente, verifica-se que o padrão espacial do varia em função da frequência de excitação, apresentando distribuições mais homogêneas nas frequências mais baixas e configurações modais mais complexas nas frequências mais elevadas. A presença de regiões alternadas de máximos e mínimos locais de pressão sonora reflete os efeitos combinados de reflexão, interferência e cancelamento acústico no interior do silenciador, corroborando a coerência entre os fenômenos físicos observados localmente e o desempenho acústico global obtido por meio da análise da perda de transmissão sonora.

### 4.3.2 Influência temperatura na TL

A comparação entre os resultados do melhor indivíduo obtido nas réplicas para condições de ar ( $\rho \approx 1,20 \text{ kg/m}^3$ ;  $C_o \approx 343 \text{ m/s}$ ) e para condições de gás de escape ( $\rho \approx 0,36 \text{ kg/m}^3$ ;  $C_o \approx 625 \text{ m/s}$ ) evidencia o impacto direto da temperatura e da massa específica do meio sobre a resposta acústica do modelo otimizado.

Observa-se, a partir da Figura 4.27, A curva apresentada na mesma faixa de frequência experimental corresponde à condição de gás de escape, não havendo motivação técnica específica para essa escolha, mas apenas um critério de padronização, de modo geral, valores de TL mais elevados em grande parte da faixa analisada, com destaque para picos pronunciados em torno de 2100 Hz e 2400 Hz. Além disso, essa condição apresenta uma distribuição mais consistente dos máximos de TL ao longo do espectro, quando comparada à condição de 20 °C, cuja resposta é marcada por variações mais abruptas e picos isolados.

Figura 4.27: Curvas de TL ótimas para ar e gás de escape.



FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

Do Esse comportamento está associado às alterações das propriedades termodinâmicas do fluido em altas temperaturas, em especial ao aumento da velocidade do som e à redução da densidade, que modificam a impedância acústica e as condições de propagação e acoplamento entre as câmaras do silenciador. Como consequência, observam-se ressonâncias internas mais intensas e níveis superiores de TL para o gás de escape.

Do ponto de vista geométrico, embora ambas as otimizações tenham convergido para configurações de mesma ordem de grandeza, as soluções associadas ao gás quente apresentam ajustes distintos nos deslocamentos laterais e no posicionamento dos elementos internos,

indicando a adaptação do algoritmo às mudanças do meio acústico. De forma geral, a figura indica que, embora ambas as condições apresentem tendências globais semelhantes, a otimização com gás de escape resulta em maiores amplitudes de TL e maior sensibilidade.

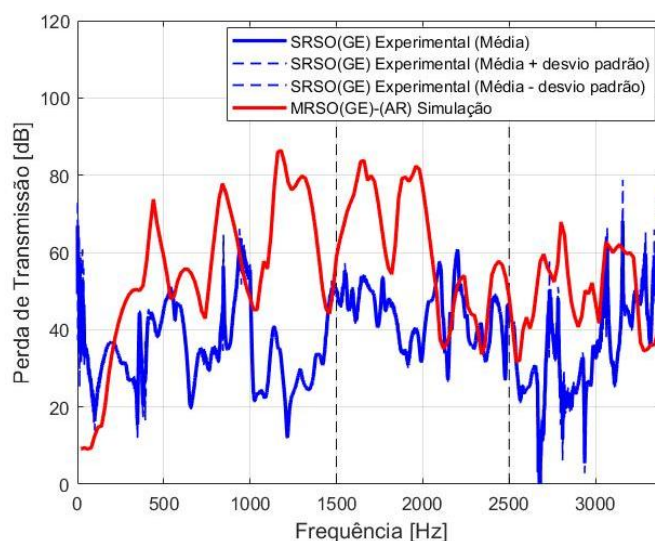
Esse comportamento evidencia a importância de considerar as propriedades do gás quente no processo de otimização, uma vez que o silenciador opera em condições próximas a esse regime. As diferenças entre as curvas confirmam, portanto, a influência direta da temperatura do fluido na eficiência acústica e nas soluções geométricas ótimas obtidas.

#### 4.4 Resultados experimentais

Os resultados obtidos com método das duas cargas permitiram avaliar, de forma integrada, tanto a compatibilidade do modelo numérico quanto a eficácia da otimização aplicada. As análises apresentadas nesta seção concentram-se nas configurações que apresentaram maior estabilidade metrológica sendo estas adotadas para as comparações.

Inicialmente, a validação da simulação foi conduzida por meio da comparação entre os resultados numéricos e os dados experimentais do SRSO<sub>(GE)</sub>. A Figura 4.28, correspondente à configuração experimental com espaçamento entre microfones de 50 mm, uso de condicionador de sinais (CS) e terminação altamente absorvente com muito material fibroso, evidencia que o modelo é capaz de reproduzir adequadamente a tendência da TL ao longo da faixa. Observa-se que os principais picos e vales da curva simulada ocorrem em regiões de frequência compatíveis com aquelas identificadas, especialmente nas de 0 a 1000 Hz e de 2000 a 3400 Hz.

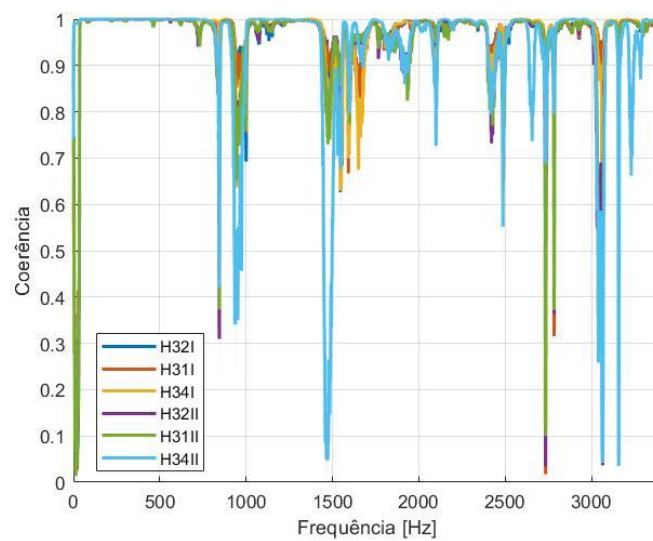
Figura 4.28: TL experimental e simulada do SRSO<sub>(GE)</sub> e MRSO<sub>(GE)</sub>.



FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

Entretanto, na faixa intermediária entre aproximadamente 1000 e 2000 Hz, verifica-se uma discrepância mais pronunciada entre os resultados simulados e experimentais. A análise do gráfico de coerência apresentado na Figura 4.29 indica que essa região é caracterizada por quedas significativas de coerência entre as funções de transferência, evidenciando limitações na qualidade dos dados experimentais nessa banda de frequência. Nessas condições, a comparação direta entre simulação e experimento torna-se menos robusta, uma vez que a baixa coerência compromete a confiabilidade das medições.

Figura 4.29: Coerência entre funções de transferência.



FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

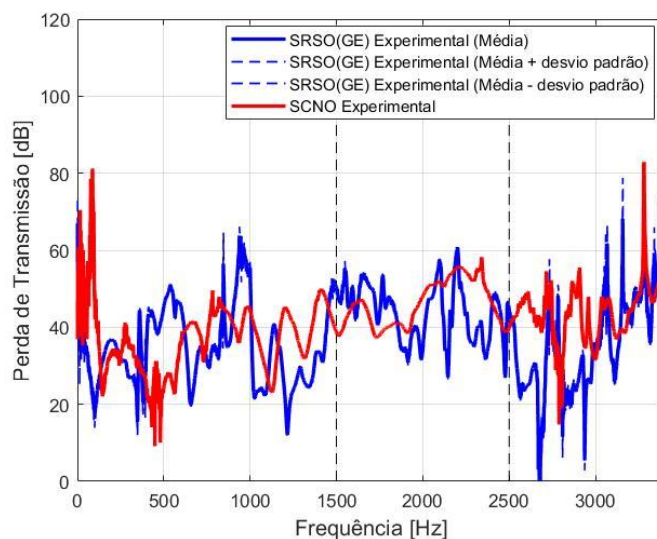
Dessa forma, as discrepâncias observadas nessa faixa não podem ser atribuídas exclusivamente às simplificações inerentes ao modelo numérico, estando fortemente associadas às limitações do método experimental, tais como sensibilidade elevada do sistema reativo, presença de ressonâncias de alto fator de qualidade, influência de perdas não controladas, imperfeições geométricas e efeitos visco-térmicos não capturados durante o ensaio.

Ainda assim, destaca-se que, à exceção da faixa compreendida aproximadamente entre 1000 e 2000 Hz, observa-se concordância qualitativa satisfatória entre os resultados simulados e experimentais ao longo da maior parte do espectro analisado, incluindo a faixa crítica de 1500 a 2500 Hz adotada no processo de otimização. Nessa banda, particularmente a partir de aproximadamente 2000 Hz, verifica-se melhoria na coerência experimental e maior consistência na correspondência entre as curvas, sobretudo quanto ao posicionamento das bandas de maior atenuação. Esse comportamento permite considerar o modelo numérico adequado e validado para os fins propostos.

Cabe ainda destacar que as regiões de menor coerência observadas coincidem, em parte, com bandas de frequência nas quais o silenciador apresenta elevados níveis de atenuação sonora. Em sistemas reativos otimizados, caracterizados por ressonâncias bem definidas e elevado fator de qualidade, pequenas variações nas condições experimentais tendem a produzir flutuações mais pronunciadas na resposta medida, afetando a coerência entre as funções de transferência. Assim, a ocorrência de incoerências pontuais nessas regiões não indica necessariamente falha do processo de otimização, mas reflete a elevada sensibilidade dinâmica do sistema acústico, associada às limitações inerentes ao método experimental.

Na sequência, procedeu-se à validação da otimização por meio da comparação experimental direta entre o  $SRSO_{(GE)}$  e o SCNO, ambos ensaiados sob condições equivalentes. A Figura 4.30 correspondente a essa comparação, obtida também com espaçamento entre microfones de 50 mm, uso de CS e terminação altamente absorvente, evidencia diferenças claras de comportamento entre os dois dispositivos.

Figura 4.30: TL entre  $SRSO_{(GE)}$  e SCNO.



FONTE: Adaptado MATLAB (2025).

Em baixas frequências, particularmente abaixo de 500 Hz, o SCNO apresenta trechos nos quais os níveis de perda de TL são inferiores aos do  $SRSO_{(GE)}$ , excetuando-se as regiões limítrofes do gráfico, nas quais não há confiabilidade experimental, bem como um ponto intermediário possivelmente associado a um erro de medição. Esse comportamento é esperado em função da característica reativa do silenciador otimizado. Ressalta-se que essa faixa de frequência não foi considerada no processo de otimização e, portanto, não constitui critério principal de avaliação do desempenho acústico.

Na faixa intermediária entre aproximadamente 500 e 1200 Hz, observa-se alternância de desempenho entre os dois silenciadores, com cruzamentos frequentes entre as curvas. O  $SRSO_{(GE)}$  apresenta resposta mais seletiva, com picos e vales mais pronunciados, enquanto o SCNO exibe comportamento mais suavizado, típico de dispositivos com maior dissipação interna. Essa diferença reflete diretamente a natureza física distinta dos dois conceitos de silenciador e não compromete a análise comparativa.

O resultado mais relevante ocorre na faixa crítica de 1600 a 2500 Hz, correspondente à banda utilizada no processo de otimização. Nessa região, o  $SRSO_{(GE)}$  apresenta, de forma consistente, níveis de TL equivalentes ou superiores aos do SCNO, com diversos trechos em que a envoltória superior da resposta do silenciador otimizado supera a do silenciador de referência. Mesmo considerando a variabilidade experimental e a presença de vales pontuais associados a ressonâncias, o desempenho médio do  $SRSO_{(GE)}$  nessa faixa confirma que o processo de otimização foi capaz de concentrar a atenuação acústica onde ela é mais relevante para a aplicação estudada.

Em frequências superiores a 2500 Hz, ambos os dispositivos passam a apresentar oscilações acentuadas e aumento do desvio padrão. Essa região é fortemente influenciada pelas limitações do aparato de medição, pela redução da coerência do sinal e pela maior sensibilidade do método experimental, não sendo considerada como faixa principal de interesse neste estudo.

Cabe destacar que outras configurações experimentais também foram investigadas, incluindo variações no espaçamento entre microfones de 20 mm e o uso de terminação com quantidade reduzida de material absorvente (lã convencional). Embora essas configurações apresentem tendências compatíveis com as observadas nas análises principais, verificou-se maior dispersão dos dados e redução da estabilidade metrológica.

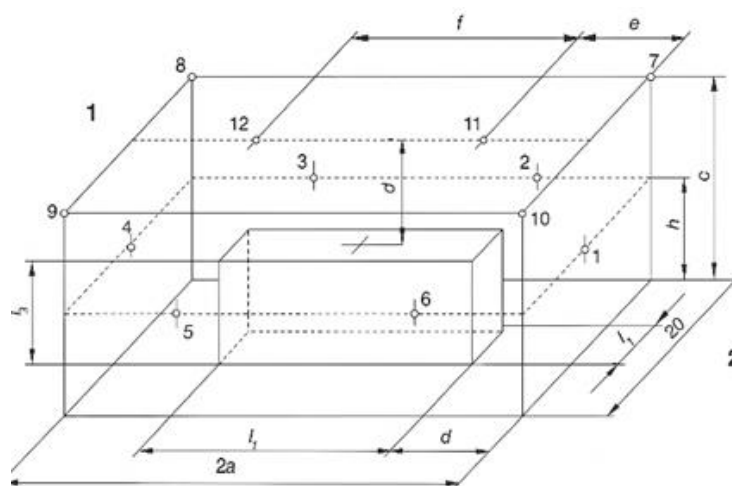
De forma geral, os resultados experimentais demonstram que a metodologia proposta foi eficaz tanto na validação do modelo numérico considerando os valores de incoerência quanto na validação do processo de otimização, evidenciando que um silenciador reativo simplificado e geometricamente menos complexo pode atingir desempenho acústico equivalente ou superior ao de um silenciador combinado comercial na faixa de frequência de maior interesse, mesmo sem o emprego de materiais absorventes.

## 4.5 Resultados normativos

Os resultados normativos apresentados neste item referem-se aos ensaios realizados conforme a ABNT NBR ISO 8528-10, utilizando o método da superfície envolvente aplicado a um grupo gerador diesel carenado equipado, alternadamente, com o SCNO e com o  $SRSO_{(GE)}$ . O objetivo dessa etapa é comparar o desempenho acústico global dos dois sistemas em condições reais de operação, validando experimentalmente a eficácia da otimização.

A Figura 4.31 ilustra o arranjo geométrico dos pontos de medição adotados no ensaio, definidos a partir das dimensões externas do conjunto gerador–carenagem, conforme prescrito pela norma. Os doze pontos distribuídos ao redor do objeto macro garantem a representatividade espacial do campo sonoro radiado e permitem o cálculo do nível médio de pressão sonora corrigido, bem como do nível de potência sonora associado.

Figura 4.31: Disposição dos microfones.



FONTE: Autoria própria (2025).

A Tabela 4.8 apresenta os valores de nível de pressão sonora ponderados em A, medidos em cada ponto da superfície envolvente, para as duas configurações avaliadas. Observa-se que os níveis individuais variam conforme a posição do microfone em relação às fontes dominantes do conjunto, como o sistema de exaustão, a carenagem e as aberturas de ventilação. Ainda assim, a distribuição dos valores mostra comportamento consistente entre os dois casos, sem a ocorrência de picos localizados que indiquem degradação acústica associada ao  $SRSO_{(GE)}$ .

Tabela 4.8: Nível de pressão sonora (A) em cada ponto.

| PONTO | GMG COM SCNO [dB(A)] | GMG COM SRSO [dB (A)] |
|-------|----------------------|-----------------------|
| 1     | 76,9                 | 78,0                  |
| 2     | 77,8                 | 88,1                  |
| 3     | 83,4                 | 86,1                  |
| 4     | 80,9                 | 75,7                  |
| 5     | 79,8                 | 75,4                  |
| 6     | 80,9                 | 73,6                  |
| 7     | 81,7                 | 77,7                  |
| 8     | 80,2                 | 78,3                  |
| 9     | 71,1                 | 80,3                  |
| 10    | 76,6                 | 78,4                  |
| 11    | 79,4                 | 86,0                  |
| 12    | 74,5                 | 83,2                  |

FONTE: Autoria própria (2025).

De forma pontual, nota-se que em alguns pontos o  $SRSO_{(GE)}$  apresenta níveis superiores aos do SCNO, enquanto em outros ocorre o inverso. Esse comportamento é esperado em medições normativas desse tipo e está associado à redistribuição do campo sonoro provocada pela alteração da impedância acústica do sistema de escape. Importante ressaltar que a norma não avalia o desempenho por pontos isolados, mas sim por meio de grandezas globais obtidas a partir da média logarítmica e das correções previstas. A consolidação dos resultados globais é apresentada na Tabela 4.9, que resume os valores médios corrigidos de nível de pressão sonora e de nível de potência sonora, bem como a respectiva classificação normativa.

Tabela 4.9: Nível de pressão sonora (A) média logarítmica.

| Gerador      | L <sub>PA</sub> médio corrigido [dB(A)] | L <sub>WA</sub> médio corrigido [dB(A)] |
|--------------|---|---|
| GMG COM SCNO | 80,59 - Grau 2                          | 94,59 - Grau 2                          |
| GMG COM SRSO | 82,66 - Grau 2                          | 96,65 - Grau 2                          |

FONTE: Autoria própria (2025).

Esses resultados demonstram que o silenciador otimizado apresenta desempenho normativo equivalente ao do silenciador comercial de referência, mantendo o enquadramento de classe acústica previsto pela ABNT NBR ISO 8528-10. A diferença entre os valores médios globais é inferior a 2,06 dB(A), magnitude considerada desprezível do ponto de vista metrológico e plenamente compatível com as incertezas inerentes da medição em campo.

Durante os ensaios, foram ainda monitoradas de forma qualitativa as condições operacionais do grupo gerador, incluindo temperatura de funcionamento e contrapressão do sistema de escape. Não foram observadas variações significativas entre as duas configurações,

permanecendo os parâmetros dentro das faixas recomendadas pelo fabricante do motor. Esse aspecto confirma que a substituição do SCNO pelo  $SRSO_{(GE)}$  não impôs penalizações operacionais ao conjunto, reforçando a validade prática da solução otimizada.

A Figura 4.32 apresentam registros fotográficos do ensaio normativo, destacando a instrumentação utilizada, o posicionamento do sonômetro e a configuração do grupo gerador durante as medições. Esses registros corroboram a conformidade do procedimento experimental com a norma e fornecem suporte visual à interpretação dos resultados apresentados.

Figura 4.32: Registros fotográficos normativo.



FONTE: Adaptado SCANIA (2025).

## 4.6 Resultados econômicos

A avaliação de viabilidade econômica foi estruturada a partir de três indicadores principais, aplicados à comparação entre o SCNO e o  $SRSO_{(GE)}$ : consumo de chapa ( $m^2$ ), massa e custo do material, e tempo de processamento nas etapas de corte. Em complemento, é apresentada uma análise qualitativa, considerando a simplificação obtida pela metodologia.

Os relatórios do  $SRSO_{(GE)}$  indicam o uso de uma chapa de aço SAE 1010 laminado a frio com espessura de 1,0 mm, a partir da qual são recortadas as chapas internas, tampas, suportes e tubos. A soma das áreas efetivamente utilizadas nas peças cortadas a laser resulta em aproximadamente  $1,76 m^2$  de chapa, ao que se acrescentam cerca de  $0,25 m^2$  provenientes das tiras preparadas na guilhotina para conformação dos tubos, totalizando cerca de  $2,00 m^2$  de material em 1,0 mm. Para o SCNO, os relatórios mostram o aproveitamento de aproximadamente  $1,70 m^2$  de chapa em 1,0 mm, associada à carcaça e aos componentes principais, além de  $0,17 m^2$  adicionais em chapa de 3,0 mm destinados a reforços internos.

Considerando densidade típica de  $7850 kg/m^3$  para o aço, obtém-se uma massa teórica de chapa de aproximadamente 15,7 kg para o  $SRSO_{(GE)}$  e 17,3 kg para o SCNO. Mantendo-se

o valor de referência de R\$ 6,00/kg para o aço 1020 laminado a frio, o custo estimado do material em chapa para o SRSO<sub>(GE)</sub> é da ordem de R\$ 94,35, enquanto o SCNO atinge cerca de R\$ 103,62 por unidade. Assim, apenas sob a ótica do consumo de chapa, o modelo otimizado proporciona uma redução direta de aproximadamente 9% no custo de matéria-prima, ainda que ambos utilizem geometrias de dimensões semelhantes. A Tabela 4.10 resume esses resultados.

Tabela 4.10: Consumo de chapa e custo estimado.

| <b>MODELO</b>        | <b>ESPESSURAS</b> | <b>ÁREA (m<sup>2</sup>)</b> | <b>MASSA (kg)</b> | <b>CUSTO</b> |
|----------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|--------------|
| SRSO <sub>(GE)</sub> | 1,0 mm            | 2,00                        | 15,7              | 94,35        |
| SCNO                 | 1,0 e 3,0 mm      | 1,87                        | 17,3              | 103,62       |

FONTE: Autoria própria (2025).

É importante destacar que a pesagem dos conjuntos montados resulta em massas finais de 16,30 kg para o SCNO e 15,03 kg para o SRSO<sub>(GE)</sub>, valores ligeiramente diferentes das estimativas teóricas de chapa devido à inclusão de outros elementos (flanges, parafusos, suportes, solda, eventuais ajustes de fabricação) que não são alvo direto desta análise. Essa diferença reforça que os cálculos acima devem ser interpretados como uma aproximação do consumo de material em chapa, adequada para comparação relativa entre os dois.

No que se refere ao tempo de processamento, os relatórios de fabricação indicam para o SCNO um tempo planejado de corte de 10 min 24 s para a primeira chapa em 1,0 mm, acrescido de 1 min 4,8 s para a chapa em 3,0 mm, totalizando aproximadamente 11,5 min de operação de máquina de corte CNC. Para o SRSO<sub>(GE)</sub>, o tempo planejado de corte a laser é de 3 min 18,2 s, ao qual se somam cerca de 2 min de operação de guilhotina para preparação das tiras tubulares, resultando em um tempo total de aproximadamente 5,3 min de processamento. A Tabela 4.11 sintetiza essa comparação.

Tabela 4.11: Comparação do tempo de processamento.

| <b>MODELO</b> | <b>PROCESSO</b>    | <b>TEMPO DE CORTE</b> | <b>TEMPO ADICIONAL</b> | <b>TEMPO TOTAL</b> |
|---------------|--------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|
| SRSO          | Laser e guilhotina | 3,3 min               | 2,0 min                | 5,3 min            |
| SCNO          | Punção e laser     | 10,4 min              | 1,1 min                | 11,5 min           |

FONTE: Autoria própria (2025).

Os resultados mostram que, além da redução de massa final do conjunto (16,30 kg para o SCNO contra 15,03 kg para o SRSO<sub>(GE)</sub>), o silenciador otimizado exige menos tempo de máquina para a etapa de corte, praticamente reduzindo pela metade o tempo de processamento

quando comparado ao modelo comercial isso se deve ao fato da retirada das chapas perfuradas. Essa economia tende a se traduzir em menor custo, maior capacidade produtiva da célula de corte e menor exposição a filas de programação, em ambientes de produção seriada.

Do ponto de vista qualitativo, a simplificação geométrica do  $SRSO_{(GE)}$  também se reflete em um processo de montagem mais ágil e menos sujeito a retrabalhos. Esse elimina o uso de chapas perfuradas internas e reduz o número de componentes com dobras e furações complexas, o que diminui a necessidade de dispositivos especiais, alinhadores e ajustes finos.

Na prática, o conjunto apresenta menos interfaces e menores tolerâncias acumuladas, o que facilita o encaixe das peças, reduz o tempo de preparação de solda e contribui para um controle dimensional mais robusto. A Figura 4.33 ilustra uma das etapas de fabricação do  $SRSO$ , evidenciando o layout simplificado das tampas durante a montagem.

Figura 4.33:  $SRSO_{(GE)}$  conjunto, montagem e componentes.



FONTE: Autoria própria (2025).

Em síntese, a análise econômica indica que o  $SRSO_{(GE)}$  apresenta vantagens consistentes em relação ao SCNO: redução do custo de chapa na ordem de 9 %, leve diminuição da massa final do conjunto, aproximadamente 50 % de redução no tempo de processamento nas etapas de corte, além de um processo de montagem qualitativamente mais simples. Quando tais ganhos são combinados ao desempenho acústico equivalente ou superior demonstrado nos itens anteriores, conclui-se que o modelo otimizado configura uma solução tecnicamente viável e economicamente atrativa para aplicação em grupos geradores a diesel.

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 Discussão de resultados

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho demonstram que a metodologia proposta foi capaz de integrar, de forma consistente, modelagem paramétrica, simulação e validação experimental aplicada ao projeto de silenciadores acústicos para grupos geradores. A comparação entre os resultados simulados e experimentais do  $SRSO_{(GE)}$  evidencia que o modelo desenvolvido reproduz adequadamente a tendência da TL ao longo do espectro analisado, com concordância qualitativa satisfatória quanto à localização das bandas de atenuação.

Observa-se que, embora ocorram discrepâncias pontuais entre os resultados experimentais e numéricos em determinadas regiões do espectro, tais diferenças são compatíveis com a natureza fortemente ressonante de sistemas reativos e com as limitações inerentes ao método experimental empregado. Nessas condições, aspectos como sensibilidade elevada do sistema, perdas não controladas, imperfeições construtivas e efeitos térmicos não plenamente capturados durante o ensaio contribuem para a maior irregularidade dos dados medidos, especialmente em faixas intermediárias de frequência. Considerando que os resultados experimentais são adotados como referência física do sistema, a coerência globalmente satisfatória observada na faixa crítica utilizada no processo de otimização permite considerar o modelo numérico adequadamente validado para os fins propostos.

No que se refere à validação da otimização, a comparação experimental direta entre o silenciador reativo simplificado otimizado (SRSO) e o silenciador combinado não otimizado de referência (SCNO) indica que o modelo otimizado foi capaz de concentrar a atenuação acústica nas faixas de maior relevância para a aplicação estudada. Enquanto o SCNO apresenta resposta mais suavizada ao longo do espectro, característica típica de dispositivos com maior dissipação interna, o SRSO exhibe comportamento mais seletivo, com picos e vales mais pronunciados, refletindo sua natureza puramente reativa.

Os resultados experimentais corroboram que, na banda de interesse definida no processo de otimização, o desempenho do SRSO é equivalente ou superior ao do silenciador de referência, confirmando que a simplificação geométrica não implicou perda de eficiência.

## 5.2 Discussão final

A discussão integrada dos resultados permite afirmar que o objetivo geral deste trabalho foi atingido. A metodologia desenvolvida demonstrou ser adequada para o projeto e otimização acústica de silenciadores reativos aplicados a geradores, conciliando desempenho acústico, simplicidade geométrica e viabilidade prática. A utilização do GA, associada à simulação por elementos finitos, mostrou-se eficaz na exploração do espaço de projeto e na identificação de soluções não triviais, capazes de maximizar a TL na faixa de relevância operacional.

Do ponto de vista físico, os resultados evidenciam a importância da consideração das propriedades do meio acústico na etapa de otimização, uma vez que variações de impedância e velocidade do som alteram significativamente a resposta do sistema. A validação experimental, mesmo realizada em condições distintas das originalmente consideradas na otimização, permitiu estabelecer comparações coerentes por meio de simulações complementares, garantindo consistência metodológica.

Adicionalmente, a análise construtiva e econômica indica que a simplificação geométrica do SRSO resulta em benefícios industriais relevantes, como redução da complexidade de fabricação e maior robustez dimensional, sem comprometer o desempenho acústico. Assim, o modelo otimizado configura uma alternativa tecnicamente viável e alinhada às demandas reais da indústria de geração de energia.

## 5.3 Sugestão trabalhos futuros

Como desdobramento da pesquisa, sugere-se a ampliação da metodologia por meio da inclusão de efeitos de escoamento, perdas visco-térmicas e da investigação do ruído dinâmico associado ao escoamento sônico, visando reduzir discrepâncias entre simulação e experimento e representar de forma mais fiel as condições reais dos grupos geradores.

Recomenda-se também a extensão do processo de otimização para abordagens multiobjetivo, incorporando simultaneamente critérios, construtivos e de contrapressão, bem como a adoção de modelos substitutos baseados em aprendizado de máquina, com o objetivo de reduzir o custo computacional. Adicionalmente, destaca-se a importância de uma análise mais aprofundada das limitações do processo experimental, incluindo efeitos das condições de contorno, posicionamento e repetibilidade dos microfones, além das incertezas associadas ao ensaio e à calibração, de modo a aprimorar a confiabilidade dos resultados e a interpretação das diferenças entre dados experimentais e numéricos.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AN, Byung Hun; LEE, Jae Wook. Deep-learning-based generative design for optimal silencers using backpropagation of artificial neural network model. *Advanced Engineering Informatics*, v. 50, p. 101503, 2024.

ANSYS MAPDL *command reference*. Release 13.0. Canonsburg, PA: em: <https://www.ansys.com>. Acesso em: 1 ago. 2025.

ANSYS INC. *Sound transmission loss – Acoustics example*. ANSYS Help, v. 2024 R2. Disponível em: [https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/ans\\_acous/acouxmpttransloss.html](https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/ans_acous/acouxmpttransloss.html). Acesso em: 1 ago. 2024.

ARSLAN, Hakan; RANJBAR, Mostafa; SECGIN, Erkan; CELIK, Veli. Theoretical and experimental investigation of acoustic performance of multi-chamber reactive silencers. *Applied Acoustics*, v. 157, p. 106987, 2020.

ABNT. *ABNT NBR ISO 8528-10: Grupos geradores de corrente alternada acionados por motores alternativos de combustão interna – Parte 10: Medição do ruído aéreo pelo método da superfície envolvente*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM E2611-09: Standard test method for measurement of normal incidence sound transmission of acoustic materials based on the transfer matrix method*. West Conshohocken: ASTM, 2009.

BARBIERI, Nilson; BARBIERI, Renato. Acoustic horns optimization using finite elements and genetic algorithm. *Applied Acoustics*, v. 74, p. 164–172, 2013.

BARBIERI, Renato; BARBIERI, Nilson; LIMA, Key Fonseca de. Some applications of the PSO for optimization of acoustic filters. *Applied Acoustics*, v. 89, p. 62–70, 2015.

BISTAFA, Sylvio R. *Acústica aplicada ao controle do ruído*. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

BRG GERADORES. *Site institucional*. Disponível em: <https://brggeradores.com.br>. Acesso em: 4 maio. 2025.

BRUNETTI, Francisco. *Motores de combustão interna*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2012.

BUGARU, Mihaela; VASILE, Ovidiu. Recent developments in using a modified transfer matrix method for exhaust muffler design. *Applied Acoustics*, v. 213, p. 109683, 2024.

COLHERINHAS, Gino B. *Código em Python: SILENCER\_PYMAPDL\_PYMOO para otimização com algoritmos genéticos de mufflers reativo de entrada lateral e reversão de fluxo*. Manuscrito inédito, 2025.

COLHERINHAS, Gino B. *Ferramenta de otimização via algoritmos genéticos com aplicações*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília DF-Distrito Federal, 2016.

- ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. *Termodinâmica*. 6. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.
- CHEN, Xin; LI, Peng; HE, Weidong, et al. Broadband and low-frequency sound absorber of sonic black holes with multi-layered micro-perforated panels. *Applied Acoustics*, v. 215, p. 109701, 2024.
- CHENG, Yu; LIU, Hao; WANG, Zhe; et al. Research on the influence of characteristics of the annular connecting pipe on muffler acoustic performance. *Applied Acoustics*, v. 214, p. 109692, 2024.
- CHIU, Ming-Chuan; CHANG, Yi-Ching. Numerical studies on venting system with multi-chamber perforated mufflers by GA optimization. *Applied Acoustics*, v. 69, p. 1017–1037, 2008.
- CHIU, Ming-Chuan; CHANG, Yi-Ching; LI, X.; et al. Numerical assessment of gun mufflers using finite element method, neural networks and a genetic algorithm. *Journal of Sound and Vibration*, v. 538, p. 117225, 2023.
- DUARTE, M. A. V.; SIMÕES, S. C. Jr. The use of time domain average as failures identification tool in internal combustion engines. *SAE Technical Papers*, Danvers, 2000.
- FAN, Zhiyong; GUO, Bing. An investigation of acoustic attenuation performance of silencers with mean flow based on FEM. *Applied Acoustics*, v. 110, p. 124–132, 2016.
- FU, Jun; ZHENG, Wei; XU, Minghui; WANG, Weisheng; HUANG, Yalan. Study on the influence of structure factors of diesel engine exhaust purification muffler on transmission loss in different frequency bands. *Applied Acoustics*, v. 180, p. 108147, 2021.
- FU, Wei; LI, Zhiqiang; et al. Modification of exhaust muffler of a diesel engine based on finite element method acoustic analysis. *Applied Acoustics*, v. 96, p. 1–7, 2015.
- GARKAUSKAS NETO, Bruno. *Metodologia de avaliação da performance acústica experimental e virtual do sistema de exaustão automotivo*. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- HE, Ji; JI, Wen; HUANG, Shizhong. Acoustic attenuation analysis of expansion chamber mufflers with non-uniform cold and hot flow. *Applied Acoustics*, v. 214, p. 109693, 2024.
- HE, Lei; et al. Design and verification of diesel generator exhaust muffler. *Applied Acoustics*, v. 195, p. 108817, 2025.
- HUANG, X.; WANG, L.; LI, M. Transmission loss characteristics of dual cavity impedance composite mufflers. *Applied Acoustics*, v. 213, p. 109684, 2024.

JU, Hyun Dae; LEE, Jong Hwan; KIM, Young Hwan; et al. Design of an acoustic enclosure with duct silencers for the heavy-duty diesel engine generator set. *Applied Acoustics*, v. 65, p. 1–15, 2004.

KUMAR, K. M.; MUNJAL, M. L. Direct estimation and experimental validation of the acoustic source characteristics of turbocharged diesel engine exhaust system. *Applied Acoustics*, v. 149, p. 171–180, 2019.

KUMAR, K. M.; MUNJAL, M. L. Direct estimation and experimental validation of the acoustic source characteristics of two-cylinder naturally aspirated diesel engine exhaust system. *Applied Acoustics*, v. 135, p. 70–84, 2018.

LEE, Jae Woo. Optimal topology of reactive muffler achieving target transmission loss values: Design and experiment. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 29, n. 4, p. 1607–1614, 2015.

LI, Rui; ZHOU, Yiqi; WEI, Chenglong; MI, Yongzhen. Analysis of coupling effect between chambers of reactive muffler. *Applied Acoustics*, v. 191, p. 108679, 2022.

LIMA, Key Fonseca de; LENZI, Alexandre; BARBIERI, Nilson. Finite element acoustic simulation-based shape optimization of a muffler. *Applied Acoustics*, v. 67, p. 295–307, 2006.

LIMA, Key Fonseca de; LENZI, Alexandre; BARBIERI, Nilson. The study of reactive silencers by shape and parametric optimization techniques. *Applied Acoustics*, v. 72, p. 512–520, 2011.

MASCARELLO, Maiqui Anselmo Daltoé. *Supervisão remota de grupos geradores de energia elétrica: com ênfase nos geradores movidos a combustão*. Beau Bassin: Novas Edições Acadêmicas, 2021.

MATHWORKS, INC. *MATLAB R2023b – Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/global-optimization.html>. Acesso em: 10 maio 2025.

MEHDIZADEH, Omid; PARASCHIVOIU, Marius. A three-dimensional finite element approach for predicting the transmission loss in mufflers and silencers with no mean flow. *Applied Acoustics*, v. 66, p. 902–918, 2005.

NAKAI, Y.; GEN, M.; MIZUYAMA, H. *Introduction to evolutionary algorithms*. Cham: Springer, 2017.

OH, Seungjae; LEE, Jae Woo. Partition layout inside a muffler integrated with a thermoelectric generator: Multi-physics analysis and optimal design. *Energy Conversion and Management*, v. 251, p. 114942, 2022.

RAFQIUE, Faisal; WU, Jiu Hui; LIU, Chong Rui; MA, Fuyin. Transmission Loss analysis of a simple expansion chamber muffler with extended inlet and outlet combined with inhomogeneous micro-perforated panel (iMPP). *Applied Acoustics*, v. 194, p. 108808, 2022.

SCANIA ENGINES. *Data handbook: Power generation engines*. Edition 2015:1. Södertälje: Scania CV AB, 2015.

SILVA, Bruno Cordeiro; FAGUNDES NETO, Marlipe Gomes. *Análise da influência dos parâmetros geométricos de um metamaterial acústico na perda de transmissão sonora*. In: ENCONTRO SOBRAC – SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 30., 2024, Goiânia. *Anais...* Goiânia: SOBRAC, 2024.

SILVA RODRIGUES, M. V.; FAGUNDES NETO, M. G.; SILVA, B. C. *Análise experimental com método de duas cargas e numérica com método de elementos finitos da perda de transmissão em filtro acústico gerador*. In: FIA 2024 – Fórum Internacional de Acústica, 2024.

SHAABAN, Ahmed Mostafa; ANITESCU, Cosmin; ATROSCHENKO, Elena; RABCZUK, Timon. An isogeometric Burton-Miller method for the transmission loss optimization with application to mufflers with internal extended tubes. *Applied Acoustics*, v. 185, p. 108410, 2022.

SHEN, Chao; HOU, Liang. Comparison of algorithms for improving acoustic attenuation performance and flow of reactive mufflers. *Applied Acoustics*, v. 116, p. 291–296, 2017.

SHI, Xiaowei; MAK, Cheuk Ming. Sound attenuation of a periodic array of micro-perforated tube mufflers. *Journal of Sound and Vibration*, v. 400, p. 187–202, 2017.

SNAGOWSKA, Anna; JURKIEWICZ, Jerzy. A new approach to the theory of acoustic multi-port networks with multimode waves. *Applied Acoustics*, v. 170, p. 107513, 2021.

SURYAWANSHI, Rohit; KASHIKAR, Ajay; SONONE, Naynish; THORAT, Ravikant; SAVANT, Shubham. Development of muffler design and its validation. *Applied Acoustics*, v. 180, p. 108132, 2021.

TERASHIMA, Felipe; LIMA, Key Fonseca de; BARBIERI, Nilson; LEGAT FILHO, Benjamim. A two-dimensional finite element approach to evaluate the sound transmission loss in perforated silencers. *Applied Acoustics*, v. 194, p. 108523, 2022.

XUE, Yaqiang; JIN, Guoyong; YE, Tianguai; SHI, Kangkang; ZHONG, Saifeng; YANG, Chuanmeng. Isogeometric analysis for geometric modelling and acoustic attenuation performances of reactive mufflers. *Computers and Mathematics with Applications*, v. 79, p. 3447–3461, 2020.

YAMAMOTO, Takashi; AKIMOTO, Yusuke; HOSOMI, Naoki. Multiscale simulation for sound transmission loss of a particulate filter in an exhaust system using a homogenization method. *Applied Acoustics*, v. 219, p. 109742, 2024.

YIMER, Mesfin; NALLAMOTHU, Rajesh. Reduction of the noise from the engine, modification of reactive muffler and analysis. *Applied Acoustics*, v. 195, p. 108818, 2025.

ZHANG, Peng; WU, T. W.; CHENG, C. Y. R. Acoustical optimization of mufflers hybridized with spiral perforated tubes using finite element. *Applied Acoustics*, v. 185, p. 108406, 2022.

ZHAO, Liang; et al. Research on optimization of exhaust structure and exhaust noise reduction for an aviation piston two-stroke engine. *Applied Acoustics*, v. 195, p. 108819, 2025.

## APÊNDICE A – ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

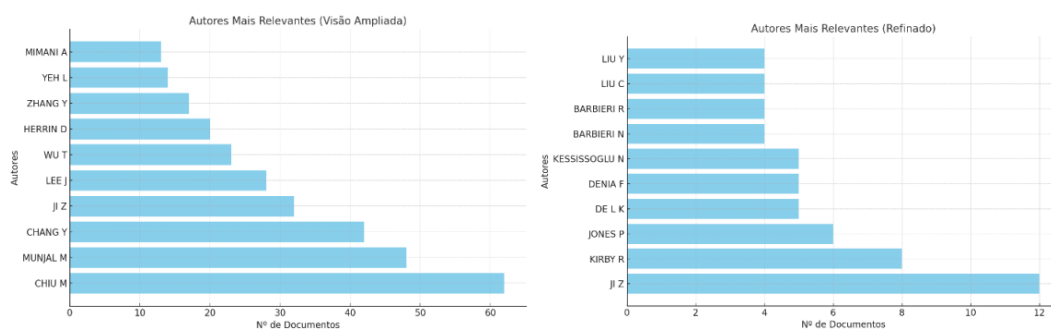
Com o objetivo de compreender o panorama atual da pesquisa sobre silenciadores acústicos, especialmente no contexto de otimização e análise por elementos finitos, foi realizada uma análise bibliométrica abrangente com base em dados extraídos das principais bases científicas internacionais. *A Scopus e a Web of Science* foram escolhidas por sua ampla cobertura nas áreas de engenharia, física aplicada e acústica, permitindo identificar as principais tendências e contribuições relevantes no campo.

Inicialmente, foi realizada uma busca ampla com os termos *mufflers*, *Transmission Loss*, a fim de mapear o volume global de publicações associadas ao tema. Essa primeira etapa resultou em aproximadamente 3.000 artigos, demonstrando o elevado interesse da comunidade científica pela temática da atenuação sonora em dutos e sistemas de escape.

Em seguida, a pesquisa foi refinada com a inclusão de termos mais específicos — como (*muffler OR silencer*) *AND* *acoustics AND (transmission AND loss) AND (finite AND element) AND (experimental)* — restringindo para 270 artigos diretamente relacionados à modelagem acústica, validação experimental e uso de métodos numéricos na análise de silenciadores.

A partir dessa base, foi possível identificar os principais autores e grupos de pesquisa que atuam na área, bem como as revistas mais relevantes e os temas de maior recorrência. Como mostrado na Figura A.1, além de palavras-chave fortemente relacionadas a tópicos como *finite element analysis*, *acoustic performance* e *Transmission Loss*.

Figura A.1: Histograma de autores mais relevantes.

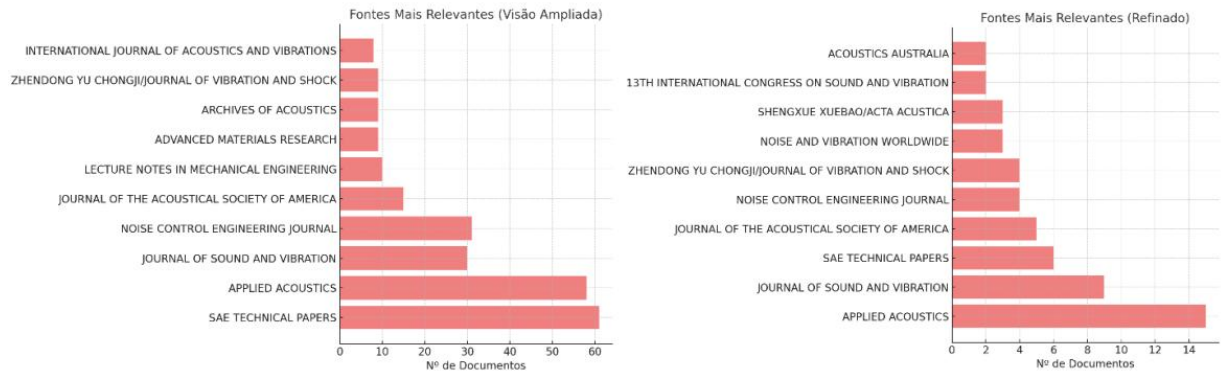


FONTE: Adaptado BIBLIOMETRIX (2025).

Além disso, a análise das revistas científicas mais relevantes, representada na Figura A.2, evidencia os periódicos com maior volume de publicações correlatas ao tema desta pesquisa. As visualizações foram geradas a partir dos dois conjuntos de palavras-chave

utilizados na etapa anterior, abrangendo tanto estudos gerais sobre atenuação sonora em silenciadores quanto investigações envolvendo simulações e validação experimental.

Figura A.2: Histograma de revistas mais relevantes.



FONTE: Adaptado BIBLIOMETRIX (2025).

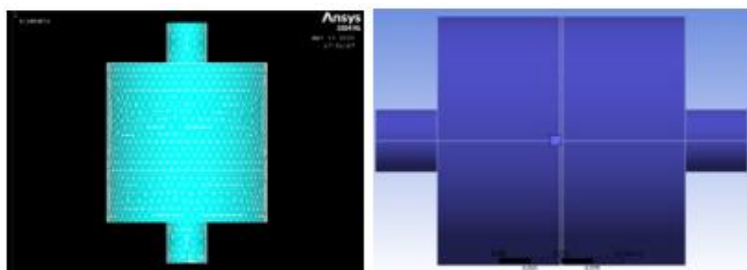
Na etapa seguinte, por meio da interface do BIBLIOSHINY, foi realizada uma seleção preliminar com base no critério de número total de citações dos artigos. Essa abordagem visou a construção de uma base teórica robusta, priorizando publicações amplamente reconhecidas pela comunidade científica. A escolha dos trabalhos mais citados permitiu consolidar referências clássicas e conceituais, cuja relevância permanece consistente no tempo.

## APÊNDICE B – EQUIVALÊNCIA VADD VGLUE

Com o objetivo de verificar a confiabilidade e consistência dos comandos booleanos disponíveis no ANSYS MAPDL para construção de geometrias compostas, foi realizada uma análise comparativa entre os comandos VGLUE e VADD, ambos aplicados à modelagem de um silenciador reativo teórico. Essa verificação se tornou necessária em virtude da ocorrência de falhas na geração de malha em geometrias complexas quando se utilizava o VGLUE, conforme identificado durante o desenvolvimento do presente trabalho.

O modelo adotado para esse teste corresponde a uma geometria canônica de silenciador reativo, com câmaras cilíndricas conectadas por tubos internos, conforme apresentado na Figura B.1. As condições físicas da simulação (propriedades do fluido, frequência de excitação, elementos utilizados, critérios de malha e condições de contorno) foram mantidas idênticas nos dois casos e conforme exemplo ANSYS INC, 2024. Garantindo que qualquer variação nos resultados fosse exclusivamente atribuída à operação geométrica utilizada.

Figura B.1: Silencioso reativo teórico modelado e com malha.

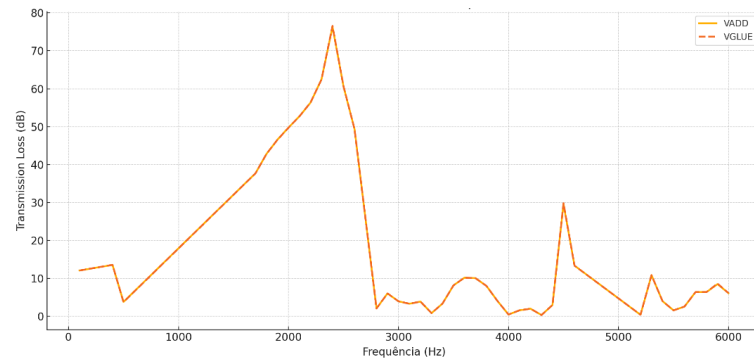


FONTE: Adaptado ANSYS MAPDL (2025).

A escolha dos comandos em análise baseou-se na documentação oficial do ANSYS MAPDL e em tutoriais técnicos amplamente utilizados na literatura acadêmica e em ambientes industriais (ANSYS INC, 2024). Embora o comando VGLUE seja comumente adotado para fusão de volumes coincidentes preservando entidades compartilhadas, o VADD realiza a união dos volumes em uma única entidade sólida, o que pode resultar em topologias mais simples e robustas para malhação em casos de sobreposição.

A Figura B.2 apresenta o gráfico de comparação entre os resultados de TL obtidos com os dois comandos, em função da frequência no intervalo de 0 a 6000 Hz. Observa-se que ambas as curvas apresentam sobreposição quase total em toda a faixa de análise, com desvios inferiores a 0,5 dB, o que confirma a equivalência funcional dos dois métodos para o tipo de geometria em questão.

Figura B.2: Curva TL comparação VADD VGLUE.



FONTE: Autoria própria (2025).

Com base nesses resultados, optou-se pelo uso do comando VADD nas etapas seguintes do projeto, dado seu comportamento mais estável durante a geração de malha e a ausência de erros topológicos em modelos com múltiplos volumes. Essa decisão garantiu a integridade geométrica e a repetibilidade das simulações em larga escala exigidas pelo processo.

## APÊNDICE C – TEMPO COMPUTACIONAL

A Tabela C.1 consolida os dados de custo computacional para cada réplica, indicando o tempo de processamento, o tempo médio por simulação e o tempo médio por geração. Os resultados evidenciam que a aplicação do sistema integrado, mesmo exigindo processamento de centenas de indivíduos, apresenta um desempenho computacional compatível.

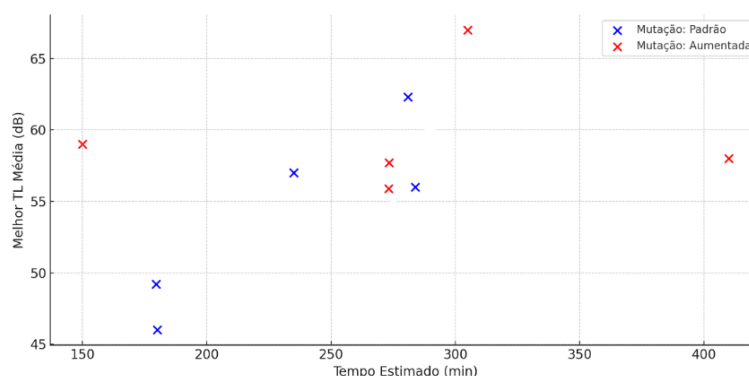
Tabela C.1: Resumo de réplicas tempo computacional.

| Arquivo   | Data de Início      | Total de Gerações | Total de Indivíduos | Tempo Estimado (min) |
|-----------|---------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| Réplica 1 | 11/07/2025 18:56:22 | 31                | 310                 | 279                  |
| Réplica 2 | 12/07/2025 18:24:03 | 26                | 260                 | 234                  |
| Réplica 3 | 13/07/2025 10:33:57 | 20                | 200                 | 180                  |
| Réplica 4 | 13/07/2025 16:47:05 | 20                | 200                 | 180                  |
| Réplica 5 | 13/07/2025 21:34:01 | 47                | 470                 | 423                  |
| Réplica 1 | 14/07/2025 20:43:05 | 30                | 300                 | 270                  |
| Réplica 2 | 15/07/2025 19:19:49 | 34                | 340                 | 306                  |
| Réplica 3 | 16/07/2025 21:06:16 | 31                | 310                 | 279                  |
| Réplica 4 | 17/07/2025 18:49:07 | 17                | 170                 | 153                  |
| Réplica 5 | 17/07/2025 22:52:46 | 30                | 300                 | 270                  |

FONTE: Autoria própria (2025).

Além disso, Figura C.1 apresenta a relação entre o melhor valor de TL média obtido em cada réplica e o tempo total de execução estimado, expresso em minutos. O gráfico diferencia as réplicas conforme mutação aplicada: mutação padrão e mutação aumentada. Observa-se que a melhoria na TL, em alguns casos, ao uso de taxas de mutação elevadas, que favoreceram uma exploração mais ampla. Embora haja uma tendência de aumento do tempo de simulação com a complexidade dos indivíduos, a dispersão dos dados sugere que o ganho pode ser obtido sem penalidades computacionais, desde que os parâmetros genéticos sejam ajustados.

Figura C.1: TL média obtido por réplica x tempo computacional.



FONTE: Autoria própria (2025).

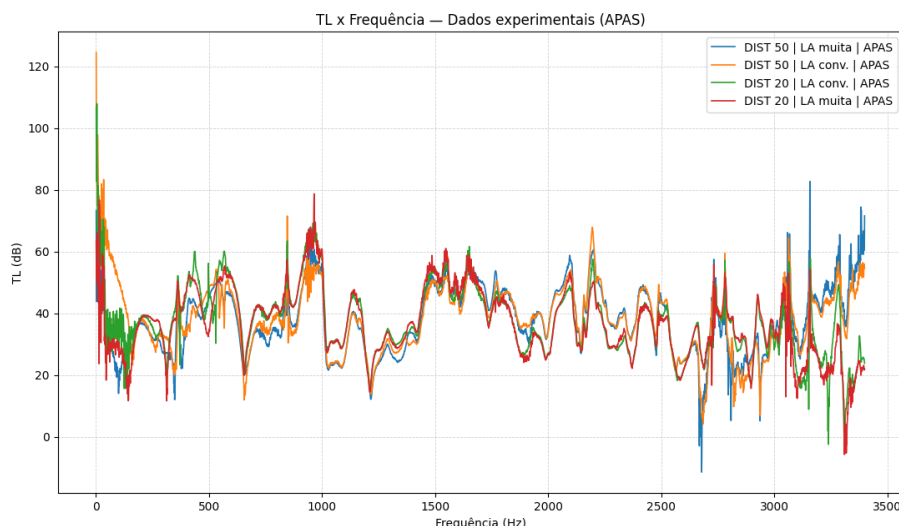
## APÊNDICE D – CONFIGURAÇÕES EXPERIMENTAIS

Este item apresenta uma análise complementar das diferentes configurações experimentais adotadas durante os ensaios de bancada para determinação da TL pelo método das duas cargas. O objetivo desta seção é fornecer uma visualização paralela do comportamento do SRSO sob variações do arranjo experimental, sem que tais resultados interfiram diretamente nas conclusões principais discutidas no trabalho.

Para cada configuração experimental investigada, foram realizadas cinco repetições independentes. Em seguida, foi calculada a média espectral da TL para cada repetição, e, posteriormente, a média global correspondente a cada modo experimental. Esses dados médios foram organizados em arquivos no formato texto, permitindo tratamento uniforme e visualização conjunta.

A Figura D.1 apresentada neste tópico reúne, em um único gráfico, as curvas médias de TL obtidas para as quatro principais configurações experimentais com uso condicionador de sinal, considerando as seguintes combinações: espaçamento entre microfones de 50 mm com terminação altamente absorvente (lã em maior quantidade), espaçamento de 50 mm com terminação de lã convencional, espaçamento de 20 mm com terminação de lã convencional e espaçamento de 20 mm com terminação altamente absorvente.

Figura D.1: As curvas médias de TL obtidas para as quatro principais configurações.



FONTE: Autoria própria (2025).

A visualização simultânea dessas curvas permite observar que, apesar das diferenças locais e do aumento da irregularidade espectral em determinadas faixas, especialmente em altas frequências, todas as configurações apresentam tendências globais semelhantes ao longo da

banda analisada. Nota-se que as configurações com espaçamento entre microfones de 50 mm tendem a apresentar respostas mais estáveis e menos dispersas, sobretudo na faixa intermediária de frequências, enquanto as configurações com espaçamento de 20 mm mostram maior sensibilidade a variações locais, refletindo limitações conhecidas do método experimental associadas à menor diferença de fase entre os sinais captados.

Em relação à terminação, observa-se que o uso de maior quantidade de material absorvente contribui para a redução de reflexões na extremidade do tubo, resultando em curvas mais suaves e com menor influência de artefatos experimentais. Por outro lado, a terminação com lã convencional apresenta maior irregularidade em determinadas regiões do espectro, ainda que preserve a tendência geral da resposta acústica.

Ressalta-se que esta análise tem caráter exclusivamente comparativo e ilustrativo, sendo empregada para demonstrar a influência das escolhas experimentais na qualidade dos dados obtidos. As conclusões principais do trabalho, tanto para validação da simulação quanto para validação da otimização, foram fundamentadas exclusivamente nas configurações experimentais que apresentaram maior estabilidade metrológica, conforme Capítulo 4.

Dessa forma, o presente texto complementa o estudo ao evidenciar que, embora diferentes arranjos experimentais possam ser utilizados para a estimativa da TL, a adoção criteriosa de parâmetros como espaçamento entre microfones, tipo de terminação e uso de amplificação adequada é fundamental para garantir maior confiabilidade e clareza na interpretação dos resultados.

## APÊNDICE E – CÓDIGO SCRIPT EM MATLAB

```

function main_otimizacao()

    % === INÍCIO DO LOG COM HORA ===
    hora_atual = datetime('now', 'Format',
'yyyyMMdd_HHmm');
    nome_diario = sprintf('relatorio_execucao_%s.txt',
string(hora_atual));
    diary(nome_diario);
    diary on;

    fprintf('Início da otimização em %s\n', datestr(now,
'dd/mm/yyyy HH:MM:SS'));

    % === PARÂMETROS GLOBAIS ===
    rho = 0.3627;          % kg/m³
    c0 = 625.36;          % m/s
    z0 = rho * c0;        % Impedância acústica
    num_geracoes = 100;
    tam_pop = 10;
    max_sem_melhora = 20;

    % === LIMITE DOS PARÂMETROS ===
    limites = [
        200, 350;    % l_c1
        200, 500;    % l_c2
        25, 60;      % d_f1
        25, 60;      % d_f2
        30, 60;      % offset_f1
        30, 60       % offset_f2
    ];

    disp('=== Iniciando Otimização com Algoritmo Genético
===');

    fprintf('Tamanho da população: %d\n', tam_pop);
    fprintf('Número máximo de gerações: %d\n',
num_geracoes);
    fprintf('Critério de parada: %d gerações sem
melhoria\n', max_sem_melhora);
    fprintf('Constantes físicas: rho = %.4f kg/m³, c0 =
%.2f m/s, z0 = %.2f Rayls\n', rho, c0, z0);
    disp('Parâmetros de malha: Tamanho (h = wave/13.2):
0.0135 m / Tipo: FLUID221 ');
    fprintf('Legenda parâmetros (1-6): [lc1, lc2, d1, d2,
ofs1, ofs2]\n');

```

```

disp('Delta: 1000 hz Subdivididos em 10 Pontos /
Incremento 100 hz');
disp('OBS: AUMENTEI A CHANCE DE MUTAÇÃO DE 0,2 ');
disp('OBS: INTENSIDADE VETORES DE MUTAÇÃO DE [10 10 5
5 5 5] PARA [20 20 5 5 5 5] ');
fprintf('Limites das variáveis:\n');

for i = 1:size(limites,1)
    fprintf(' - Parâmetro %d: [%.2f, %.2f] mm\n', i,
limites(i,1), limites(i,2));
end

% === Geração inicial ===
populacao = zeros(tam_pop, 6);
for i = 1:6
    populacao(:, i) = rand(tam_pop, 1) *
diff(limites(i,:)) + limites(i,1);
end

melhor_TL = -inf;
melhor_individuo = [];
g_melhor = 1;
idx_melhor_global = NaN;
g_parou = num_geracoes;
cont_sem_melhora = 0;cont_sem_melhora = 0;

historico = zeros(num_geracoes, 6);
diversidade = zeros(num_geracoes, 6);

for g = 1:num_geracoes
    fprintf('\n Geração %d\n', g);
    gerar_igs = false;

    [populacao, fitness, melhor_atual,
idx_melhor_local] = evoluir_populacao(populacao, limites,
gerar_igs, g);

    [TL_max, idx_max] = max(fitness);
    fprintf('? Melhor TL média = %.2f dB | Média da
população = %.2f dB\n', TL_max, mean(fitness));

    diversidade(g, :) = std(populacao);

    if TL_max > melhor_TL
        melhor_TL = TL_max;
        melhor_individuo = melhor_atual;
        g_melhor = g;
        idx_melhor_global = idx_melhor_local;
    end
end

```

```

        cont_sem_melhora = 0;
        historico(g, :) = melhor_individuo;
    else
        cont_sem_melhora = cont_sem_melhora + 1;
        if g > 1
            historico(g, :) = historico(g-1, :);
        end
    end

    if cont_sem_melhora >= max_sem_melhora
        g_parou = g;
        fprintf('\n Critério de parada por estagnação
atingido (%d gerações sem melhoria).\n', max_sem_melhora);
        break;
    end
end

% === RESULTADOS FINAIS ===
fprintf('\n? Melhor solução encontrada:\n');
fprintf('    Geração: %d\n', g_melhor);
fprintf('    Indivíduo: %d\n', idx_melhor_global);
fprintf('    Parâmetros: %s\n',
mat2str(melhor_individuo, 4));
fprintf('    Transmission Loss média (OTIMIZADA): %.2f
dB\n', melhor_TL);

    save('historico_otimizacao.mat', 'historico',
'diversidade', 'g_parou', 'melhor_TL',
'melhor_individuo');

    fprintf('Exportando IGES do melhor indivíduo
encontrado...\n');
    nome_final_inp = 'modelo_final_IGS.inp';

    gerar_inp(melhor_individuo, nome_final_inp, 999, true,
g_melhor);
    rodar_ansys(nome_final_inp, 999);

    TL_confirmada = ler_TL(g_melhor, 999);
    fprintf(' TL confirmada com rerun: %.2f dB\n',
TL_confirmada);

    fprintf('>> Fim da execução: %s\n', datestr(now, 'dd-
mmm-yyyy HH:MM:SS'));
    diary off;
end

```

```

function gerar_inp(vars, caminho_arquivo, indice,
exportar_igs, geracao)
% Legenda dos parâmetros: [l_c1, l_c2, d_f1, d_f2,
offset_f1, offset_f2]
% Desempacotar variáveis
l_c1 = vars(1) / 1000; % m
l_c2 = vars(2) / 1000; % m
d_f1 = vars(3) / 1000; % m
d_f2 = vars(4) / 1000; % m
offset_f1 = vars(5) / 1000; % m
offset_f2 = vars(6) / 1000; % m

% Constantes geométricas
d_camaras = 0.200;
d_subtracao = 0.080;
pos_subtracao = 0.05;
d_saida = 0.076;
pos_saida = 0.05;
d_entrada = 0.076;
pos_entrada_z = 0.95;
l_entrada = 0.250;
l_furo = 0.002;

% Cálculos derivados
l_c3 = 1.050 - l_c1 - l_furo - l_c2 - l_furo;
l_saida = 1.200 - l_c1;

% Frequência e malha
rho = 0.3627; % kg/m³
c0 = 625.36; % m/s

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
MUDAR FREQ

freq_min = 2500;
freq_max = 3500;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
MUDAR FREQ

wave = c0 / freq_max;
h = wave / 13.2;

if indice == 1
    fprintf('\n [G%02d] \n', geracao);
end

```

```

fid = fopen(caminho_arquivo, 'w');

% === Cabeçalho ===
fprintf(fid, '/prep7\n');
fprintf(fid,
'/CWD,"C:/Users/marco/Downloads/Otimizador ansys
malb"\n');
    fprintf(fid, 'rho=%.4f\nc0=%.2f\nz0=rho*c0\n', rho,
c0);
    fprintf(fid,
'freq=%.0f\nwave=c0/freq\nh=wave/18.3\nesize,h\n',
freq_max);
    fprintf(fid, 'et,1,221,,1\n');
    fprintf(fid,
'mp,dens,1,rho\nmp,sonc,1,c0\nnumcmp,all\n');

% === Geometria ===
z = 0;
    fprintf(fid, 'cylind,0,%.5f,%.5f,%.5f,0,360\n',
d_camaras/2, z, z + l_c1); z = z + l_c1;
    fprintf(fid, 'wpoffset,-%.5f,0,0\n', offset_f1);
    fprintf(fid, 'cylind,0,%.5f,%.5f,%.5f,0,360\n',
d_f1/2, z, z + l_furo);
    fprintf(fid, 'wpoffset,%.5f,0,0\n', offset_f1); z = z
+ l_furo;
    fprintf(fid, 'cylind,0,%.5f,%.5f,%.5f,0,360\n',
d_camaras/2, z, z + l_c2);
    fprintf(fid, 'wpoffset,%.5f,0,0\n', pos_subtracao);
    fprintf(fid, 'cylind,0,%.5f,%.5f,%.5f,0,360\n',
d_subtracao/2, z, z + l_c2);
    fprintf(fid, 'wpoffset,-%.5f,0,0\n', pos_subtracao); z
= z + l_c2;
    fprintf(fid, 'wpoffset,-%.5f,0,0\n', offset_f2);
    fprintf(fid, 'cylind,0,%.5f,%.5f,%.5f,0,360\n',
d_f2/2, z, z + l_furo);
    fprintf(fid, 'wpoffset,%.5f,0,0\n', offset_f2); z = z
+ l_furo;
    fprintf(fid, 'cylind,0,%.5f,%.5f,%.5f,0,360\n',
d_camaras/2, z, z + l_c3);
    fprintf(fid, 'wpoffset,%.5f,0,0\n', pos_subtracao);
    fprintf(fid, 'cylind,0,%.5f,%.5f,%.5f,0,360\n',
d_subtracao/2, z, z + l_c3);
    fprintf(fid, 'wpoffset,-%.5f,0,0\n', pos_subtracao);
    fprintf(fid, 'wpoffset,%.5f,0,0\n', pos_saida);
    fprintf(fid, 'cylind,0,%.5f,%.5f,%.5f,0,360\n',
d_saida/2, l_c1, l_c1 + l_saida);
    fprintf(fid, 'wpoffset,-%.5f,0,0\n', pos_saida);

```

```

    fprintf(fid, 'wpoffset,0,0,%.5f\n', pos_entrada_z);
    fprintf(fid, 'wprota,0,0,-90\n');
    fprintf(fid, 'cylind,0,%.5f,0,%.5f,0,360\n',
d_entrada/2, l_entrada);
    fprintf(fid, 'wpoffset,0,0,0\nwprota,0,0,0\n');

    % Subtrações e malha
    fprintf(fid,
'vsel,none\nvsel,s,,,3\nvsel,a,,,4\nvsbv,3,4\n');
    fprintf(fid,
'vsel,none\nvsel,s,,,6\nvsel,a,,,7\nvsbv,6,7\n');
    fprintf(fid,
'vsel,all\nvadd,all\nnummrg,all\ntype,1\nmat,1\nvmesh,all\n');

    % IGES (opcional)
    if exportar_igs
        fprintf(fid,
'/view,1,1,1,1\n/vup,1,Z\n/eshape,1\n/shrink,1\n/replot\n'
);
        fprintf(fid,
'IGESOUT,"C:/Users/marco/Downloads/Otimizador ansys
malb/silencioso_otimo.elitizado.igs"\n');
    end

    % Solução
    fprintf(fid,
'finish\n/solu\nantype,harmic\nhropt,auto\nkbc,1\n');
    fprintf(fid, 'p=1\nvn=-p/(rho*c0)\n');
    fprintf(fid, 'nsel,s,loc,x,-
0.25000\nsf,all,port,1\nsf,all,shld,vn\nsf,all,impd,z0\n')
;
    fprintf(fid,
'nsel,s,loc,z,1.20000\nsf,all,port,2\nsf,all,inf\nalls\n')
;
    fprintf(fid,
'harfrq,%d,freq\nnsub,10\nsolve\nfinish\n', freq_min);

    % Pós-processamento
    fprintf(fid, '/post1\nset,last\n');
    nome_saida_txt = sprintf('TL_G%02d_I%03d', geracao,
indice);
    fprintf(fid,
'/output,"C:/Users/marco/Downloads/Otimizador ansys
malb/%s","txt"\n', nome_saida_txt);

```

```

fprintf(fid,
'pras,pall,1,all,,,,,1,2\n*status,power\n/output\nfinish\n
');

fclose(fid);
end

function rodar_ansys(nome_inp, indice)
    ansys_path = '"C:\Program Files\ANSYS
Inc\v241\ansys\bin\winx64\ansys241.exe"';

    % Diretório de saída consistente com os demais
arquivos
    out_path =
sprintf('C:/Users/marco/Downloads/Otimizador ansys
malb/modelo_Gxx_I%03d.out', indice);

    % Comando para execução em modo batch
    comando = sprintf('%s -b -i "%s" -o "%s"', ansys_path,
nome_inp, out_path);

    % Execução e verificação
    fprintf('%s...\n', nome_inp);
    status = system(comando);

    if status ~= 0
        error(' Erro ao executar ANSYS com o arquivo %s',
nome_inp);
    else
        fprintf('(Indivíduo %d).\n', indice);
    end
end

function TL = ler_TL(geracao, indice)
    % Torna os argumentos opcionais para facilitar reruns
    if nargin < 2
        if nargin == 1
            indice = geracao;
            geracao = 999;
        else
            geracao = 999;
            indice = 999;
        end
    end

    % Garante formato Gxx_Ixxx
    arquivo = sprintf('C:/Users/marco/Downloads/Otimizador
ansys malb/TL_G%02d_I%03d.txt', geracao, indice);

```

```

    if ~isfile(arquivo)
        warning('Arquivo %s não encontrado.', arquivo);
        TL = 0;
        return;
    end
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
MUDAR FREQ

    % Frequências esperadas (em Hz)
    freq_target = 2600:100:3500;

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
MUDAR FREQ

    TL_valores = zeros(1, length(freq_target));
    encontrados = false(1, length(freq_target));

    fid = fopen(arquivo, 'r');
    while ~feof(fid)
        linha = fgetl(fid);
        for i = 1:length(freq_target)
            fstr = sprintf('%.3f', freq_target(i));
            if contains(linha, fstr)
                dados = sscanf(linha, '%f');
                if numel(dados) >= 6
                    TL_valores(i) = dados(6);
                    encontrados(i) = true;
                end
            end
        end
    end
    fclose(fid);

    if all(encontrados)
        TL = mean(TL_valores);
    else
        warning('Nem todas as frequências foram
encontradas no arquivo %s.', arquivo);
        TL = mean(TL_valores(encontrados)); % média
apenas dos encontrados
    end
end

function [nova_populacao, fitness_atual, melhor_individuo,
idx_melhor] = evoluir_populacao(populacao_atual, limites,
gerar_igs, geracao)
    N = size(populacao_atual, 1);

```



```

        for j = 1:6
            filho(j) = min(max(filho(j), limites(j,1)),
limites(j,2));
        end

        nova_populacao(i,:) = filho;
    end

    melhor_individuo = populacao_atual(idx(1), :);
    idx_melhor = idx(1);
end

function plotar_convergencia(mostrar_media,
mostrar_maxima)
    if nargin < 2
        mostrar_media = true;
        mostrar_maxima = true;
    end

    % Caminho onde os arquivos TL estão salvos
    pasta = 'C:/Users/marco/Downloads/Otimizador ansys
malb';

    % Procurar arquivos TL_G##_I##.txt
    arquivos = dir(fullfile(pasta, 'TL_G*_I*.txt'));
    dados = [];

    for k = 1:length(arquivos)
        nome = arquivos(k).name;
        tokens = regexp(nome, 'TL_G(\d+)_I(\d+)\.txt',
'tokens');
        if ~isempty(tokens)
            g = str2double(tokens{1}{1});
            i = str2double(tokens{1}{2});
            caminho = fullfile(pasta, nome);
            TL = extrair_TL_media(caminho);
            if ~isnan(TL)
                dados = [dados; g, i, TL];
            end
        end
    end

    % Converter para tabela
    T = array2table(dados, 'VariableNames', {'Geracao',
'Individuo', 'TL'});

    % Timestamp único para salvar gráficos

```

```

timestamp = datestr(now, 'yyyymmdd_HHMMSS');

% ===== PLOT 1: Convergência (média e máximo por
geração) =====
agrupado = groupsummary(T, 'Geracao', {'mean', 'max'},
'TL');

f1 = figure;
hold on;
legend_labels = {};

if mostrar_media
    plot(agrupado.Geracao, agrupado.mean_TL, '-o',
'DisplayName', 'TL Média (10 indivíduos)');
    legend_labels{end+1} = 'Média das TL(mf) dos
Indivíduos';
end
if mostrar_maxima
    plot(agrupado.Geracao, agrupado.max_TL, '-s',
'DisplayName', 'Maior TL Média Encontrada');
    legend_labels{end+1} = 'Maior TL(mf) Encontrada';
end

xlabel('Geração');
ylabel('Transmission Loss Média (dB)');
title('Convergência da Otimização');
% legend(legend_labels, 'Location', 'best');
% legend(legend_labels, 'Location', 'southoutside',
'Orientation', 'horizontal');
legend(legend_labels, 'Location', 'southeast');
grid on;
hold off;

% Salvar imagem do primeiro gráfico
saveas(f1, fullfile(pasta, ['convergencia_TL_'
timestamp '.png']));

% ===== PLOT 2: TL por indivíduo e geração =====
f2 = figure;
scatter(T.Geracao, T.Individuo, 80, T.TL, 'filled');
cb = colorbar;
ylabel(cb, 'TL (dB)', 'FontWeight', 'bold'); %
Adiciona texto abaixo da escala
colormap parula;
title('Distribuição da Função Objetivo');
xlabel('Geração');
ylabel('Indivíduo');
ylim([0 10]);

```

```

grid on;

% Salvar imagem do segundo gráfico
saveas(f2, fullfile(pasta, ['distribuicao_TL_'
timestamp '.png']));
end

function TL = extrair_TL_media(caminho)
    TL = NaN;
    fid = fopen(caminho, 'r');
    if fid == -1, return; end

    linhas = textscan(fid, '%s', 'Delimiter', '\n');
    fclose(fid);
    linhas = linhas{1};

    %%%%%%%%%%%
MUDAR FREQ

    % Frequências esperadas
    freq_target = 1700:100:3200;
    TL_valores = zeros(1, length(freq_target));
    encontrados = false(1, length(freq_target));

    %%%%%%%%%%%
MUDAR FREQ

    for i = 1:length(freq_target)
        fstr = sprintf('%.3f', freq_target(i));
        linha = find(contains(linhas, fstr), 1);
        if ~isempty(linha)
            valores = sscanf(linhas{linha}, '%f');
            if numel(valores) >= 6
                TL_valores(i) = valores(6);
                encontrados(i) = true;
            end
        end
    end

    if any(encontrados)
        TL = mean(TL_valores(encontrados));
    end
end

function plot_heatmap()

```

```

clc;

% Diretório dos arquivos
pasta = 'C:\Users\marco\Downloads\Otimizador ansys
malb\';

% Buscar o arquivo do melhor indivíduo
(TL_GXX_I999.txt)
arquivos = dir(fullfile(pasta, 'TL_G*_I999.txt'));
if isempty(arquivos)
    error('Nenhum arquivo TL_GXX_I999.txt encontrado
na pasta.');
```

```

end

% Pegar o último modificado
[~, idx] = max([arquivos.datenum]);
nome_arquivo = arquivos(idx).name;

% Extrair G e I
tokens = regexp(nome_arquivo, 'TL_G(\d+)_I(\d+)\.txt',
'tokens');
```

```

Gmelhor = str2double(tokens{1}{1});
Imelhor = str2double(tokens{1}{2});

% === Parte 1: Heatmap do melhor indivíduo ===
TL = ler_TL_vetor(fullfile(pasta, nome_arquivo));
if isempty(TL)
    error('Arquivo encontrado, mas vetor TL está
vazio.');
```

```

end

freq = linspace(1700, 2500, length(TL)); %
Frequências típicas

figure;
imagesc(freq, 1, TL);
colormap(jet);
colorbar;
xlabel('Frequência (Hz)');
ylabel('Transmission Loss (dB)');
title(sprintf('Heatmap TL - Melhor Indivíduo: G%d I%d
(%.2f dB)', Gmelhor, Imelhor, mean(TL)));
set(gca, 'YTick', 1);
caxis([min(TL) max(TL)]);

timestamp = datestr(now, 'yyyymmdd_HHMMSS');
```

```

    saveas(gcf, fullfile(pasta,
sprintf('heatmap_melhor_G%d_I%d_%s.png', Gmelhor, Imelhor,
timestamp)));

    % === Parte 2: Heatmap da geração do melhor indivíduo
    ===
    arquivos_geracao = dir(fullfile(pasta,
sprintf('TL_G%02d_I*.txt', Gmelhor)));
    todos_TL = [];

    for k = 1:length(arquivos_geracao)
        nome = arquivos_geracao(k).name;
        tokens2 = regexp(nome, 'TL_G\d+_I(\d+)\.txt',
'tokens');
        if isempty(tokens2), continue; end
        idx_ind = str2double(tokens2{1}{1});
        if idx_ind == 999, continue; end % Pular o
elitizado duplicado
        TL_k = ler_TL_vetor(fullfile(pasta, nome));
        if isempty(TL_k), continue; end
        todos_TL(idx_ind, :) = TL_k;
    end

    if isempty(todos_TL)
        warning('Nenhum dado encontrado para geração %d
além do indivíduo 999.', Gmelhor);
        return;
    end

    figure;
    imagesc(freq, 1:size(todos_TL,1), todos_TL);
    colormap(jet);
    colorbar;
    xlabel('Frequência (Hz)');
    ylabel('Indivíduo da Geração');
    title(sprintf('Heatmap TL - Todos Indivíduos da
Geração %d', Gmelhor));
    caxis([min(todos_TL(:)) max(todos_TL(:))]);

    saveas(gcf, fullfile(pasta,
sprintf('heatmap_geracao_G%d_%s.png', Gmelhor,
timestamp)));

    fprintf('>> Heatmaps salvos com sucesso na pasta.\n');
end

function TL = ler_TL_vetor(caminho)
    TL = [];

```

```

fid = fopen(caminho, 'r');
if fid == -1, return; end

linhas = textscan(fid, '%s', 'Delimiter', '\n');
fclose(fid);
linhas = linhas{1};

freq_target = 1600:100:2500;
TL = NaN(1, length(freq_target));

for i = 1:length(freq_target)
    fstr = sprintf('%.3f', freq_target(i));
    linha = find(contains(linhas, fstr), 1);
    if ~isempty(linha)
        valores = sscanf(linhas{linha}, '%f');
        if numel(valores) >= 6
            TL(i) = valores(6);
        end
    end
end

function plotar_avancado()

% === Carregar dados ===
dados = load('historico_otimizacao.mat');
historico = dados.historico;
diversidade = dados.diversidade;
g_parou = dados.g_parou;

% Recorte até a geração de parada
geracoes = 1:g_parou;
historico = historico(1:g_parou, :);
diversidade = diversidade(1:g_parou, :);
pasta = 'C:/Users/marco/Downloads/Otimizador ansys
malb';
timestamp = datestr(now, 'yyyymmdd_HHMMSS');

% === Grupos de variáveis ===
grupos = {
    [1, 2], {'Comprimento Câmara 1 (mm)', 'Câmara 2
(mm)'}, 'camara';
    [3, 4], {'Diâmetro Furo 1 (mm)', 'Diâmetro Furo 2
(mm)'}, 'furo';
    [5, 6], {'Offset Furo 1 (mm)', 'Offset Furo 2
(mm)'}, 'offset';
};
% === Evolução dos Parâmetros ===
for g = 1:size(grupos,1)
    idx = grupos{g,1};

```

```

labels = grupos{g,2};
tag = grupos{g,3};

f = figure;
hold on;
plot(geracoes, historico(:,idx(1)), '-o',
'DisplayName', labels{1});
plot(geracoes, historico(:,idx(2)), '-s',
'DisplayName', labels{2});
yl = ylim;
plot([g_parou g_parou], yl, 'r--', 'DisplayName',
'Parada');
xlabel('Geração');
ylabel('Valor');
title(sprintf('Evolução Paramétrica: %s e %s',
labels{1}, labels{2}));
legend('Location', 'best');
grid on;
saveas(f, fullfile(pasta,
sprintf('evolucao_%s_%s.png', tag, timestamp)));
end

% === Diversidade Genética ===
for g = 1:size(grupos,1)
idx = grupos{g,1};
labels = grupos{g,2};
tag = grupos{g,3};

f = figure;
hold on;
plot(geracoes, diversidade(:,idx(1)), '-o',
'DisplayName', labels{1});
plot(geracoes, diversidade(:,idx(2)), '-s',
'DisplayName', labels{2});
yl = ylim;
plot([g_parou g_parou], yl, 'r--', 'DisplayName',
'Parada');
xlabel('Geração');
ylabel('Desvio Padrão');
title(sprintf('Diversidade Genética: %s e %s',
labels{1}, labels{2}));
legend('Location', 'best');
grid on;
saveas(f, fullfile(pasta,
sprintf('diversidade_%s_%s.png', tag, timestamp)));
end

```

## ANEXO A – ABNT NBR ISO 8528-10

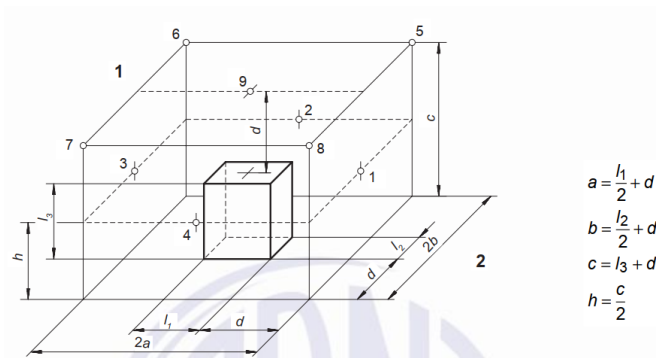
Este item apresenta o procedimento normativo adotado para a medição dos níveis de potência sonora em grupos geradores, conforme os critérios estabelecidos pela ABNT ISO 8528-10. São descritas as etapas necessárias para garantir a rastreabilidade metrológica e a confiabilidade dos resultados, incluindo a preparação do grupo gerador, a definição da superfície de medição, as condições ambientais exigidas, os procedimentos de medição, os cálculos de correção e a determinação final dos níveis de pressão e potência sonora.

Inicialmente, o grupo gerador deve estar instalado em um piso refletivo (concreto ou asfalto não poroso), livre de barreiras próximas que possam provocar reflexões indesejadas. A instalação deve seguir as recomendações do fabricante e garantir acesso seguro aos pontos de medição. O equipamento é operado sob carga constante de 75% da potência nominal (em kW), e são registrados parâmetros operacionais como rotação, temperatura ambiente, tipo de combustível e torque (com tolerância de  $\pm 10\%$ ).

A norma define dois tipos principais de geometrias para a superfície de medição: o hemisfério acústico e o paralelepípedo envolvente, que é o método principal descrito para ensaios em campo. Nesse último, constrói-se uma malha hipotética ao redor do grupo gerador com distância de 1 metro em todas as direções.

A quantidade de pontos de medição depende das dimensões do gerador que nesse caso foi de ( $l_1 = 1$  m;  $l_2 = 2$  m;  $l_3 = 1,8$ ) a disposição de nove pontos para grupos geradores com as medições do retângulo de referência:  $l_1 < 2$  m;  $l_2 < 2$  m;  $l_3 < 2,5$  m de acordo com a Figura D.1:

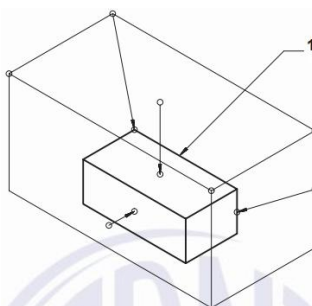
Figura X.1: Disposição do paralelepípedo hipotético envolto do gerador.



FONTE: Adaptado ABNT NBR ISO 8528-10 (2014).

Além disso, A direção dos microfones deve ser perpendicular às superfícies planas e voltada para as arestas nos cantos, conforme Figura D.2 da norma:

Figura X.2: Direção recomendada pela norma.



FONTE: Adaptado ABNT NBR ISO 8528-10 (2014).

O ambiente de medição deve atender a critérios rigorosos. Para ensaios de grau 2 (alta precisão), a correção ambiental  $K_{2A}$  deve ser  $\leq 2$  dB(A), e o ruído de fundo  $K_{1A}$  deve ser  $\leq 1,3$  dB(A). Para grau 3 (menor precisão), admite-se  $K_{2A}$  deve ser  $\leq 2$  dB(A)  $\leq 7$  dB e  $K_{1A} \leq 3$  dB. Recomenda-se realizar as medições com vento inferior a 6 m/s e com uso de protetores contra os ventos nos microfones. A medição é feita com o grupo gerador operando sob condição estável. Em cada ponto de medição, registra-se o nível de pressão sonora ponderado em A  $L_{pa}$ , além dos níveis por banda de oitava ou terço de oitava, caso exigido. O tempo mínimo de medição por ponto é de 10 segundos. Se a variação durante a leitura for menor que  $\pm 1$  dB, a média entre os valores mínimo e máximo é considerada confiável.

Caso contrário, deve-se utilizar um medidor integrador (IEC 60804), com tempo de integração compatível com o tempo de medição. Com o gerador desligado, repete-se a medição nos mesmos pontos para registrar o ruído de fundo. Esses serão utilizados para a correção  $K_{1A}$ :

$$K_{1A} = 10 \cdot \log_{10} \left( 1 - \frac{1}{10^{\Delta L/10}} \right) \quad (D.1)$$

Onde  $\Delta L$  é a diferença entre o nível com o gerador ligado e o ruído de fundo. A Figura D.3 apresenta os valores de  $K_{1A}$  para faixas de  $\Delta L$  assim  $K_{2A}$  é correção ambiental é conforme norma e quando as condições de ambientes estão conforme pode ser delimitado com nulo.

Figura X.3: Valores do fator de correção ruído de fundo.

| $\Delta L$<br>dB | $K_{1A}$ <sup>a</sup><br>dB | Grau |
|------------------|-----------------------------|------|
| 3                | 3,0                         | 3    |
| 4                | 2,2                         |      |
| 5                | 1,7                         |      |
| 6                | 1,3                         | 2    |
| 7                | 1,0                         |      |
| 8                | 0,7                         |      |
| 9                | 0,6                         |      |
| 10               | 0,5                         |      |
| > 10             | 0,0                         |      |

<sup>a</sup> Deve ser subtraído do nível de pressão sonora medido com o grupo gerador funcionando.

FONTE: Adaptado ABNT NBR ISO 8528-10 (2014).

Corrige-se o valor medido de cada ponto subtraindo-se os fatores  $K_{1A}$  (relativos ao ruído de fundo) e  $K_{2A}$  (relativos à influência ambiental), conforme orientado pela norma ABNT NBR ISO 8528-10, que adota os critérios estabelecidos nas normas ISO 3744 e ISO 3746. Essa etapa é essencial para assegurar que os níveis de pressão sonora obtidos reflitam exclusivamente a emissão do grupo gerador em operação, eliminando interferências externas.

A correção  $K_{1A}$  é determinada com base na diferença entre o nível de ruído com o gerador em funcionamento e o nível médio de ruído de fundo, sendo consultada por meio de tabelas e finalmente calculada conforme a equação logarítmica padrão de nível de pressão sonora média logarítmica  $L_{pa}$  :

$$L_{pa} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n 10^{0.1(L_{pAi} - K_{1A} - K_{2A})} \quad (D.2)$$

Já o fator  $K_{2A}$  considera as reflexões sonoras provenientes do ambiente de ensaio e depende da geometria da superfície, da presença de paredes e do tipo de piso. Somente após a aplicação desses dois fatores de correção é que se pode considerar o valor ajustado de pressão sonora como representativo do desempenho acústico do equipamento ensaiado em sequência calcula-se a área total da superfície envolvente  $S_a$  conforme a fórmula abaixo com as variáveis geométricas do paralelepípedo envolvente do gerador (para piso refletivo):

$$S_a = 2 \cdot 2ac + 2 \cdot 2bc + 2a \cdot 2b \quad (D.3)$$

Ou para um reflexivo  $S_r$ :

$$S_r = 2 \cdot 2a \cdot (c + d) + 2 \cdot 2b \cdot (c + d) + 2 \cdot 2a \cdot 2b \quad (D.4)$$

Com esses dados, determina-se finalmente o nível de potência sonora ponderado médio logarítmico a partir nível de pressão sonora ( $L_{WA}$ ):

$$L_{wa} = L_{pa} + 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{S_r/a}{S_0} \right) \quad (D.5)$$

Onde  $S_0 = 1 \text{ m}^2$  é a superfície de referência.

O relatório de medição deve conter todos os dados operacionais, ambientais e geométricos do ensaio, além dos resultados individuais e médios. Caso os resultados apresentem alta variabilidade entre pontos ( $>5 \text{ dB}$ ), recomenda-se repetir a medição.