

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

JÚLIA ONORA DA SILVA

**SIMULAÇÃO ACÚSTICA TRIDIMENSIONAL PARA O CÁLCULO DE TEMPO DE
REVERBERAÇÃO**

UBERLÂNDIA, MG

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

JÚLIA ONORA DA SILVA

**SIMULAÇÃO ACÚSTICA TRIDIMENSIONAL PARA O CÁLCULO DE TEMPO DE
REVERBERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecatrônica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecatrônica**.

Área de Concentração: Simulação numérica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Pio Rosa Nishida.

UBERLÂNDIA - MG

2025

JÚLIA ONORA DA SILVA

**SIMULAÇÃO ACÚSTICA TRIDIMENSIONAL PARA O CÁLCULO DE TEMPO DE
REVERBERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia
Mecatrônica pela Faculdade de Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Uberlândia.

Prof. Dr. Pedro Pio Rosa Nishida – Orientador
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Arthur Heleno Pontes Antunes
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Ricardo Humberto de Oliveira Filho
Universidade Federal de Uberlândia

Uberlândia, 08 de Maio de 2025.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica
Rodovia BR 050, KM 78, Bloco 1D, 2º andar - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 2512-6771 - www.mecanica.ufu.br - mecatronica@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Mecatrônica				
Defesa de:	FEMEC42100 - Projeto de Fim de Curso II				
Data:	08/05/2025	Hora de início:	13:30	Hora de encerramento:	15:00
Matrícula do Discente:	11711EMT006				
Nome do Discente:	Julia Onora da Silva				
Título do Trabalho:	Simulação Acústica Tridimensional Para Cálculo de Tempo de Reverberação				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não				

Reuniu-se de forma remota, através da Plataforma Digital Google Meet (<https://meet.google.com/exg-piuz-yor>), a Banca Examinadora, designada pelo docente orientador, assim composta: Prof. Dr. Arthur Heleno Pontes Antunes - FEMEC/UFU; Prof. Dr. Ricardo Humberto de Oliveira Filho - FEMEC/UFU; e Prof. Dr. Pedro Pio Rosa Nishida - FEMEC/UFU, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Pedro Pio Rosa Nishida, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, e concedeu à estudante a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da estudante e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada sem nota.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Pio Rosa Nishida**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/05/2025, às 14:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Heleno Pontes Antunes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/05/2025, às 14:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Humberto de Oliveira Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/05/2025, às 14:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6304375** e o código CRC **DF162AC2**.

À minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, que me permitiu chegar até aqui e Quem me dá força para continuar todos os dias.

Agradeço aos meus professores de ensino. Principalmente à Fátima Khaled Allouche, que me incentivou todos os dias a ser uma versão melhor, mais disciplinada e resiliente de mim mesma.

Agradeço aos professores da graduação, em especial ao professor Pedro P. R. Nishida, que além de orientar meu trabalho de Projeto de Fim de Curso, sempre ofereceu uma palavra amiga e me inflou a acreditar no meu desenvolvimento.

Aos meus pais, Alexandre e Luzimar, que correram e acreditaram por mim, nas ocasiões em que não tive forças. Me deram a oportunidade de focar nos meus estudos e que acreditaram nesse sonho antes mesmo dele ser meu. Sem eles, nada disso seria possível.

Aos meus avós, Magnólia Rosado e João Teodoro. Essa conquista também é de vocês. Queria que estivessem aqui para comemorar esse momento comigo.

Ao meu companheiro, Rodrigo Marques Pinheiro, a companhia mais doce e otimista que eu poderia ter ao meu lado. Você serve de inspiração para todos os que o conhecem e tem a minha admiração mais profunda.

À minha irmã Lara Luíza e meus familiares – meus padrinhos, tios e primos – pelo carinho que sempre depositaram em mim.

Aos meus colegas de graduação, por todo o apoio, companheirismo e boas risadas.

Aos meus amigos Giovana, Maria Luiza, Rafaella, Thiago, Ana Luísa, Vitor Hugo, Antônio Pedro, Edmar, Douglas, Francisco e João Matheus, que espero hoje ser uma extensão do carinho que sinto por eles.

Aos professores, técnicos e funcionários da Faculdade de Engenharia Mecânica e a todas as outras pessoas que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Eu não poderia estar mais feliz, muito obrigada!

Se você pode sonhar, você pode fazer.

Walt Disney

SILVA, J. O. **Simulação acústica tridimensional para o cálculo de tempo de reverberação.** 2025, 136 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

O controle de ruídos é essencial na engenharia acústica para garantir conforto e qualidade sonora em diversos ambientes. Para projetos eficazes, é necessário compreender conceitos fundamentais, como identificação de fontes ruidosas, trajetórias de transmissão e mecanismos de absorção sonora. Parte principal de análises acústicas permeiam conceitos como variação de pressão sonora, frequência, decaimento sonoro e tempo de reverberação. Contribuições de pesquisadores como Wallace Sabine, Eyring e Millington aprimoraram o campo da análise acústica. Este trabalho explora, de forma simulada, níveis de pressão sonora, tempo de reverberação e coeficientes de absorção sonora, utilizando normas técnicas como a ISO 532-1:2017 e a ABNT NBR 10152:2017. A simulação computacional, baseada no método da Malha das Guias de Ondas Digitais, *Digital Waveguide Mesh* (DWM), utilizando Python, permitiu representar a propagação sonora em ambientes tridimensionais. Combinando prática e simulação, o estudo busca consolidar uma abordagem técnica para o controle de ruídos.

Palavras-chave: Controle de ruídos; Simulação acústica; Tempo de reverberação; Absorção sonora.

SILVA, J, O. **Three-dimensional acoustic simulation for the calculation of reverberation time**. 2025, 136 p. Final Project – Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

Noise control is essential in acoustic engineering to ensure comfort and sound quality in various environments. For effective projects, it is necessary to understand fundamental concepts such as identifying noise sources, transmission paths, and sound absorption mechanisms. Key aspects of acoustic analysis involve concepts such as sound pressure variation, frequency, sound decay, and reverberation time. Contributions from researchers like Wallace Sabine, Eyring, and Millington have significantly advanced the field of acoustic analysis. This study explores, through simulation, sound pressure levels, reverberation time, and sound absorption coefficients, using technical standards such as ISO 532-1:2017 and ABNT NBR 10152:2017. Computational simulation, based on the Digital Waveguide Mesh (DWM) method using Python, allowed for the representation of sound propagation in three-dimensional environments. Combining practice and simulation, the study aims to consolidate a technical approach to noise control.

Keywords: Noise control. Acoustic simulation. Reverberation time. Sound absorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema de medição de sinais. Azul: aceleração da baqueta durante impacto. Vermelho: pressão sonora incidente no torso e proveniente do impacto no prato	28
Figura 2.2 - Curvas de mesmo nível de audibilidade para tons puros	30
Figura 2.3 - Histograma do ruído classificado na Tab. 7.2, em intervalos sonoros de 5 dB(A)	34
Figura 2.4 - Curvas-critério de ruído, ou curvas NCê	37
Figura 3.1 - Balanço energético do som que incide sobre uma superfície	39
Figura 3.2 - Um estudante sentado em uma cadeira suspensa na câmara anecoica	52
Figura 3.3 - Imagem do vídeo "Ensaio de absorção sonora da lã de rocha". O vídeo mostra a análise de absorção sonora utilizando lã de rocha	53
Figura 4.1 - Junta de Dispersão Genérica.....	58
Figura 4.2 - Representação da junta genérica da Malha Cúbica	61
Figura 4.3 - Terminação de uma Malha de Guia de Ondas Digitais devido a um contorno, resultando em reflexão	63
Figura 4.4 - Representação esquemática da restrição da propagação sonora em uma Malha de Guias de Ondas Digitais Quadrada	65
Figura 5.1 - Sistema de coordenadas adotado	68
Figura 5.2 - Preenchimento da matriz de dados	68
Figura 5.3 - Conceitos geométricos do sistema de coordenadas adotado	69
Figura 5.4 - Identificação das superfícies aplicada ao sistema cartesiano adotado.....	70
Figura 5.5 - Cabine de ligações V4 Company - Domingues & CO (Entrada)	73
Figura 5.6 - Cabine de ligações V4 Company - Domingues & CO (Mesa de apoio)	74
Figura 5.7 - Espumas de isolamento acústico da cabine de ligações V4 Company - Domingues & CO	75

Figura 5.8 - Representação esquemática da Sala A	75
Figura 5.9 - Identificação das superfícies da Sala A.....	76
Figura 5.10 - Sala Amarela V4 Company - Domingues & Co (Entrada)	78
Figura 5.11 - Sala Amarela V4 Company - Domingues & Co (Lateral)	78
Figura 5.12 - Sala Amarela V4 Company - Domingues & Co (Interior)	79
Figura 5.13 - Representação esquemática da Sala B.....	80
Figura 5.14 - Identificação das superfícies da Sala B.....	80
Figura 5.15 - Representação esquemática da Sala C	82
Figura 5.16 - Identificação das superfícies da Sala C.....	82
Figura 5.17 - Sinal impulso com amplitude constante de 1 Pa, frequência central de 2.000 Hz e ausência de ruído de fundo	86
Figura 5.18 - Plano YZ, posicionamento de fonte e sensores simulados para a Sala A	89
Figura 5.19 - Plano XY, posicionamento de fonte e sensores simulados para a Sala A	90
Figura 5.20 - Plano YZ, posicionamento de fonte e sensores simulados para a Sala B	91
Figura 5.21 - Plano XY, posicionamento de fonte e sensores simulados para a Sala B	92
Figura 5.22 - Plano YZ, posicionamento de fonte e sensores simulados para a Sala C	93
Figura 5.23 - Plano XY, posicionamento de sensores e fonte simulados para a Sala C	94
Figura 5.24 - Fluxograma atualização da pressão sonora para as juntas do contorno.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Constantes de absorção sonora do ar (m_{ar}) a 25 °C	46
Tabela 5.1 - Coeficiente de absorção sonora da Sala A	77
Tabela 5.2 - Coeficiente de absorção sonora da Sala B	81
Tabela 5.3 - Coeficiente de absorção sonora da Sala C	83
Tabela 6.1 - Tempo de reverberação calculado, salas A, B e C	102
Tabela 6.2 - Tempo de reverberação simulado para a sala A, à nível de sensor	104
Tabela 6.3 - Tempo de reverberação médio para a Sala A.....	105
Tabela 6.4 - Erro do tempo de reverberação médio da Sala A	106
Tabela 6.5 - Coeficiente de absorção médio da Sala A	107
Tabela 6.6 - Tempo de reverberação simulado para a sala B, à nível de sensor	108
Tabela 6.7 - Tempo de reverberação médio da Sala B	109
Tabela 6.8 - Erro do tempo de reverberação médio da Sala B	110
Tabela 6.9 - Coeficiente de absorção médio da Sala B	111
Tabela 6.10 - Tempo de reverberação simulado para a sala C, à nível de sensor.....	112
Tabela 6.11 - Tempo de reverberação médio da Sala C.....	113
Tabela 6.12 - Erro do tempo de reverberação médio da Sala C	114
Tabela 6.13 - Coeficiente de absorção médio da Sala C	115

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

- A_{ar} : Absorção sonora do ar no interior de um recinto;
- $A_{diversos}$: Absorção sonora de pessoas e mobílias;
- A_{sup} : Absorção sonora de superfícies;
- $A_{sup. recinto}$: Absorção sonora das superfícies de um recinto;
- $A_{recinto}$: Absorção sonora total do recinto;
- c : Constante diferencial;
- c_{corr} : Velocidade do som corrigida, representação tridimensional;
- c_{som} : Velocidade do som;
- d : Distância bidimensional entre duas juntas não conectadas por tubos de Guias Digitais;
- d' : Distância tridimensional entre duas juntas não conectadas por tubos de Guias Digitais;
- dB: Decibéis, unidade de medida de som;
- d_s : Comprimento da guia de onda;
- dx : Distância infinitesimal em x;
- $E_{absorvida}$: Energia sonora absorvida por uma superfície;
- $E_{dissipada}$: Energia sonora que é dissipada no interior de um material;
- $E_{incidente}$: Energia sonora incidente por uma fonte sonora;
- $E_{refletida}$: Energia sonora refletida por uma superfície;
- $E_{transmitida}$: Energia sonora que atravessa a superfície e depois é devolvida para o ambiente;
- f_a : Frequência de um sinal;
- f_s : Taxa de amostragem;
- Hz: Hertz, unidade no SI para frequência;
- K : Número de divisões do comprimento de onda;

- L : Distância entre duas juntas conectadas por tubos de Guias Digitais;
- L_A : Nível sonoro total A-ponderado;
- L_C : Nível sonoro total C-ponderado;
- L_P : Nível sonoro total não ponderado;
- L_{P_i} : Nível sonoro total não ponderado de uma determinada lista de elementos;
- L_{eq} : Nível sonoro equivalente estacionário;
- L_1 : Superfície do teto de uma sala;
- L_2 : Parede esquerda da parede de uma sala;
- L_3 : Superfície do chão de uma sala;
- L_4 : Parede da direita de uma sala;
- L_5 : Parede da frente de uma sala;
- L_6 : Parede do fundo de uma sala;
- L_{10} : Nível sonoro que foi excedido em 10% do tempo de medição;
- L_{50} : Nível sonoro que foi excedido em 50% do tempo de medição;
- L_{90} : Nível sonoro que foi excedido em 90% do tempo de medição;
- m : Metros, unidade no SI para distância;
- m_{ar} : Constante de absorção sonora do ar;
- m^2 : Metros quadrados, unidade no SI para área;
- $m^2(\text{Sabine})$: Metros quadrado (Sabine), unidade de medida para a absorção sonora;
- m^3 : Metros cúbicos, unidade no SI para volume;
- n : Número de elementos ou iterações discreta;
- n_i : Determinado item de uma lista de elementos;
- P_i : Pressão sonora em uma determinada junta;
- P_i^+ : Pressão sonora positiva em uma determinada junta;

P_i^- : Pressão sonora negativa em uma determinada junta;

$P_i(n-1)$: Pressão sonora na junta i um instante de tempo discreto anterior ao atual;

$P_i^+(n)$: Pressão sonora positiva em uma junta i no instante discreto n atual;

P_j : Pressão sonora em uma junta genérica;

$P_j(n)$: Pressão sonora em uma junta genérica no instante discreto n ;

$P_j(n-2)$: Pressão sonora na junta genérica dois instantes de tempo discreto anteriores ao atual;

$P_k^-(n-1)$: Pressão sonora negativa em uma junta i no instante discreto exatamente anterior a n ;

$P_1(n-1)$: Pressão sonora na junta 1 no instante discreto anterior ao atual;

$P(t, x)$: Pressão sonora, em termos de tempo espaço;

P_1 : Coeficiente de reflexão de uma superfície 1;

P^+ : Pressão sonora de uma onda que trafega em um sentido positivo arbitrário;

P^- : Pressão sonora de uma onda que trafega em um sentido contrário a P^+ ;

Pa: Pascal, unidade de medida para a pressão no SI;

R : Impedância acústica;

R_i : Impedância acústica de um determinado nó;

R_1 : Impedância acústica do meio que comporta o nó 1;

R_2 : Impedância acústica do meio que comporta o nó 2;

r : Coeficiente de reflexão de uma superfície;

S : Área da superfície que absorve energia sonora;

S_i : Área de uma das superfícies do recinto que absorvem energia sonora;

$S_{recinto}$: Área total das superfícies do recinto que absorvem energia sonora;

s: Segundos, unidade no SI para tempo;

T_{60} : Tempo de reverberação;

\overline{T}_{60} : Tempo de reverberação médio;

$T_{60} (Analítico)$: Tempo de reverberação obtido analiticamente;

$T_{60} (Sensor 1)$: Tempo de reverberação obtido pelo Sensor 1;

$T_{60} (Sensor 2)$: Tempo de reverberação obtido pelo Sensor 2;

$T_{60} (Sensor 3)$: Tempo de reverberação obtido pelo Sensor 3;

$T_{60} (Eyring- Norris)$: Tempo de reverberação calculado pelo método de Eyring-Norris;

$T_{60} (Millington-Sette)$: Tempo de reverberação calculado pelo método de Millington-Sette;

$T_{60} (Sabine)$: Tempo de reverberação calculado pelo método de Sabine;

T'_{60} : Tempo de reverberação da câmara reverberante com amostra de material;

T''_{60} : Tempo de reverberação da câmara reverberante sem a amostra de material;

t: Tempo;

$t_{excitação\ impulso}$: Tempo de corte no fornecimento de energia para fonte sonora simulada;

V: Volume total de um recinto;

v_i : Velocidade de propagação da onda sonora;

v_i^+ : Velocidade de propagação da onda sonora que trafega em um sentido positivo arbitrário;

v_i^- : Velocidade de propagação da onda sonora que trafega em um sentido contrário a v_i^+ ;

x: Distância;

.txt: Extensão tipo de arquivos de texto.

Letras gregas

- α : Coeficiente de absorção sonora;
- $\bar{\alpha}$: Coeficiente de absorção sonora médio para um recinto;
- α_{exp} : Coeficiente de absorção sonora de Sabine obtido experimentalmente;
- α_i : Coeficiente de absorção sonora de Sabine de uma determinada superfície do recinto;
- ρ : Coeficiente de reflexão sonora;
- τ : Coeficiente de transmissão sonora;
- ∂ : Derivada parcial;

Abreviações

BYU: *Brigham Young University*;

DWM: *Digital Waveguide Mesh*;

LAV: Laboratório de Acústica e Vibrações, Universidade Federal de Uberlândia;

MEF: Método dos Elementos Finitos;

NC: *Noise Criteria Curves*;

POO: Programação Orientada a Objetos;

RC: *Room Criteria Curves*.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	23
1.1. Objetivo	23
1.1.1. Objetivos específicos	24
1.1.2. Desenvolvimento	24
CAPÍTULO II – ANÁLISE DE RUÍDOS.....	26
2.1. Percepção de um sinal ruidoso	26
2.1.1. Avaliação de características sonoras	27
2.2. Medição e nível sonoro.....	28
2.2.1. Curvas isofônicas.....	29
2.2.2. Filtros ponderadores	31
2.3. Análise de ruídos estacionários.....	33
2.4. Análise de ruídos não estacionários.....	33
2.4.1. Níveis estatísticos de L_{10} , L_{50} E L_{90}	34
2.4.2. Nível equivalente L_{eq}	35
2.5. Avaliação de ruídos em ambientes internos.....	36
CAPÍTULO III – PARÂMETROS E AVALIAÇÃO DE RUÍDOS EM RECINTOS	38
3.1. Balanço energético na propagação de sons	38
3.2. Parâmetros para avaliação de absorção sonora.....	40
3.2.1. Coeficiente de absorção sonora	40
3.2.2. Coeficiente de reflexão sonora	41
3.2.3. Coeficiente de transmissão sonora	42
3.3. Absorção sonora em recintos.....	43

3.4. Tempo de reverberação.....	46
3.4.1. Tempo de reverberação, por Sabine.....	47
3.4.2. Tempo de reverberação, por Eyring-Norris.....	48
3.4.3. Tempo de reverberação, por Millington-Sette.....	50
3.5. Ambientes para determinação experimental de parâmetros acústicos.....	51
3.5.1. Câmaras anecoicas.....	51
3.5.2. Câmaras reverberantes.....	52
3.5.3. Determinação de coeficiente de absorção sonora de Sabine, em câmara reverberante..	54
IV. MODELAGEM SEGUNDO GUIAS DE ONDAS DIGITAIS.....	55
4.1. Método da malha de Guias de Ondas Digitais.....	55
4.2. Guias de Ondas Digitais.....	56
4.2.1. Guias de Ondas Digitais na modelagem tridimensional.....	60
4.2.2. Condições de contorno das Guias de Ondas Digitais.....	62
4.3. Erro de dispersão.....	64
CAPÍTULO V – METODOLOGIA.....	67
5.1. Configuração do sistema de análise.....	67
5.1.1. Sistema de coordenadas.....	67
5.1.2. Geometria dos modelos.....	69
5.1.3. Identificação dos elementos do modelo.....	70
5.1.4. Salas simuladas.....	72
5.1.4.1. Sala A.....	73
5.1.4.2. Sala B.....	77
5.1.4.3. Sala C.....	81
5.2. Sistema de aquisição da pressão sonora.....	83

5.2.1. Simulação utilizando Python	84
5.2.2. Estratégia de excitação do modelo simulado.....	85
5.2.3. Posicionamento dos sensores virtuais de medição	87
5.2.3.1. Posicionamento dos sensores virtuais de medição, Sala A.....	88
5.2.3.2. Posicionamento dos sensores virtuais de medição, Sala B.....	90
5.2.3.3. Posicionamento dos sensores virtuais de medição, Sala C.....	92
5.3. Etapas do <i>script</i> de simulação	94
5.3.1. Definição dos parâmetros da simulação	95
5.3.2. Obtenção da pressão sonora nas juntas internas.....	95
5.3.3. Obtenção da pressão sonora nas juntas das paredes.....	96
5.3.4. Exportação dos dados	97
5.3.5. Cálculo do tempo de reverberação simulado.....	98
5.4. Comparação entre o tempo de reverberação simulado e o calculado.....	98
5.4.1. Obtenção do T_{60} simulado.....	99
5.4.2. Análise de convergência do T_{60}	99
CAPÍTULO VI – RESULTADOS	101
6.1. Tempo de reverberação calculado	101
6.2. Análise da Sala A.....	103
6.3. Análise da Sala B.....	108
6.4. Análise da Sala C.....	112
CAPÍTULO VII – CONCLUSÃO	116
7.1. Trabalhos futuros	117
REFERÊNCIAS	119

ANEXO A – CÓDIGO PYTHON DA SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO SONORA TRIDIMENSIONAL	124
---	-----

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

O controle de ruídos e a análise de parâmetros acústicos são essenciais na engenharia acústica, por influenciarem diretamente o conforto e a qualidade sonora de ambientes. Segundo Bistafa (2018), a escassez de literatura técnica em português e a formação diversa dos profissionais limitam a aplicação prática dos conceitos acústicos, que vão além da legislação e escolhas de materiais. Projetos acústicos eficazes requerem o entendimento de tópicos como fontes de ruído, transmissão sonora e mecanismos de absorção.

O controle de ruídos é crucial para prevenir problemas como perda auditiva, dificuldades de comunicação e distúrbios do sono, especialmente em ambientes com elevados níveis de ruído. Além disso, conceitos fundamentais da física, como frequência, comprimento de onda e tempo de reverberação, são centrais para a análise acústica. Sabine e outros pesquisadores contribuíram significativamente para compreender o comportamento sonoro em recintos, desenvolvendo métodos para calcular e medir o decaimento sonoro.

Este trabalho propõe uma abordagem técnica para avaliar fenômenos acústicos, principalmente no que diz respeito ao cálculo do tempo de reverberação. Com base em normas técnicas e na simulação computacional, serão explorados os conceitos de níveis de pressão sonora e coeficientes de absorção. A metodologia emprega a ferramenta numérica do método das Guias de Ondas Digitais, do inglês *Digital Waveguide Mesh* (DWM), o que permitiu representar a propagação sonora em ambientes tridimensionais, fornecendo embasamento teórico para desenvolver soluções eficazes em diferentes cenários de teste.

Por fim, é constatado que a análise teórica e a simulação computacional desenvolvidos neste projeto, não devem ser encaradas como abordagens concorrentes, mas como ferramentas complementares no estudo de fenômenos acústicos. Neste caso, integrar diferentes métodos permitiu validar resultados e aprofundar a compreensão dos mecanismos físicos envolvidos.

1.1. Objetivo

O objetivo desse projeto é simular, utilizando Python, a propagação sonora em três salas distintas, com o intuito de se calcular os parâmetros de qualidade acústica. O tempo de

reverberação será calculado de forma externa com a utilização da ferramenta computacional desenvolvida pelo Laboratório de Acústica e Vibrações, da Universidade Federal de Uberlândia, (LAV – UFU).

1.1.1. Objetivos específicos

A medição do nível sonoro será realizada em três pontos de coleta de dados, após o desligamento de uma fonte sonora. Busca-se avaliar como os diferentes materiais que cobrem as superfícies internas desse recinto influenciam na absorção sonora do ambiente e, portanto, no tempo de reverberação a ser obtido. Deseja-se observar também a existência de convergência entre os valores de tempo de reverberação e como os parâmetros aplicados nas simulações afetam o custo computacional durante o processo.

1.1.2. Desenvolvimento

O Capítulo II deste arquivo faz uma breve apresentação da análise de ruídos, a percepção de um sinal ruidoso e um estudo acerca das metodologias utilizadas para quantificar a intensidade de som. Já o terceiro capítulo aborda conceitos teóricos de absorção e reflexão sonora, bem como a discussão de métricas fundamentais para avaliação de ruídos, como o conceito de reverberação.

O Capítulo IV apresenta como o método da malha de Guias de Ondas Digitais será utilizado no desenvolvimento deste projeto, enquanto contextualiza também como ela será executada em modelos tridimensionais.

O Capítulo V relaciona como foi desenvolvida a metodologia de simulação, desde a configuração do sistema de análise, estratégias de parametrização, explicitação das condições de contorno, etapas da simulação e estrutura de avaliação dos resultados. O sexto capítulo descreve as salas que passarão pela simulação da propagação sonora.

Por fim, o sétimo capítulo apresenta os resultados coletados durante o processo de simulação, compara os dados colhidos com os valores analíticos e faz uma breve análise de

convergência a respeito do método de aquisição dos resultados, enquanto o último trecho conclui o desenvolvimento do projeto, fornecendo apontamentos e sugestões de melhorias.

CAPÍTULO II – ANÁLISE DE RUÍDOS

A percepção auditiva é um fenômeno complexo que depende de diversos fatores físicos e psicológicos. O ser humano é capaz de identificar e diferenciar sons em meio a ruídos, porém essa capacidade varia conforme a intensidade, a frequência e a persistência do sinal sonoro. O estudo da percepção de um sinal ruidoso é fundamental para compreender os impactos do som no cotidiano, desde a comunicação verbal até a interferência em atividades que exigem concentração (BISTAFA, 2018, p. 7).

O presente capítulo aborda os principais aspectos da percepção de um sinal ruidoso, incluindo a avaliação de características sonoras e a medição do nível sonoro. Serão exploradas as metodologias utilizadas para quantificar a intensidade do som e sua percepção pelo ouvido humano, considerando aspectos normativos e psicoacústicos.

2.1. Percepção de um sinal ruidoso

A capacidade do ouvido humano de perceber ruídos varia conforme as suas características e seu nível de som. Além disso, as frequências do sinal também desempenham um papel importante: ruídos agudos tendem a ser mais incômodos do que sons graves (BISTAFA, 2018, p. 33), influenciando diretamente a resposta das pessoas (BISTAFA, 2018, p. 17).

Outro fator relevante é a classificação temporal do ruído, ou seja, se ele é contínuo, intermitente ou impulsivo e o horário que ele ocorre. Por exemplo, a percepção do incômodo pode ser amplificada quando um ruído ocorre durante a noite, pois interfere na necessidade de repouso do ser humano, sendo o sinal contínuo ou não. O volume e a persistência desses sinais podem afetar desde conversas do dia a dia até a qualidade do sono e a produtividade no trabalho (BISTAFA, 2018, p. 133).

Para além dos fatores objetivos citados acima, a própria percepção do incômodo também é subjetiva, e depende da capacidade de cada indivíduo e varia entre diferentes culturas. Sons audíveis para algumas pessoas podem ser imperceptíveis para outras. Essa variabilidade torna a análise dos sons do cotidiano um desafio, pois a diversidade de origens, intensidade e

frequência dos ruídos, aliada à subjetividade humana, dificulta a criação de um padrão único para sua avaliação.

A sensibilidade ao ruído também varia de acordo com a atividade desempenhada no momento em que ele ocorre. Atividades que exigem alta concentração, como a leitura, são mais prejudicadas por um sinal ruidoso do que tarefas de desempenho puramente físico. Dessa forma, um mesmo som pode ser mais ou menos perturbador a depender do contexto em que ele está inserido (BISTAFA, 2018, p. 133).

2.1.1. Avaliação de características sonoras

Para avaliar características sonoras de maneira eficaz, é essencial considerar fatores comportamentais e métodos adequados ao contexto dos ambientes analisados. A seleção dos equipamentos de medição deve ser capaz de categorizar os tipos de ruídos e identificar suas características, permitindo a comparação de soluções mitigadoras e/ou a regulamentação dos níveis sonoros. Esses aspectos são definidos com base em escalas de incômodo, interferência nas atividades e normas de avaliação de aceitabilidade (BISTAFA, 2018, p. 130).

Dentre os métodos utilizados, destacam-se aqueles baseados em níveis de audibilidade e audibilidade, que visam obter medições mais alinhadas à percepção subjetiva dos ruídos estacionários (sons constantes e contínuos). Essas abordagens buscam correlacionar de forma mais precisa os dados técnicos de medição com a experiência sensorial dos indivíduos, proporcionando uma avaliação mais realista do incômodo causado pelos sons. A Figura 2.1 ilustra um ensaio de caracterização de timbre em pratos de percussão, realizado por meio de uma análise psicoacústica da sensação subjetiva de intensidade sonora (*loudness*).

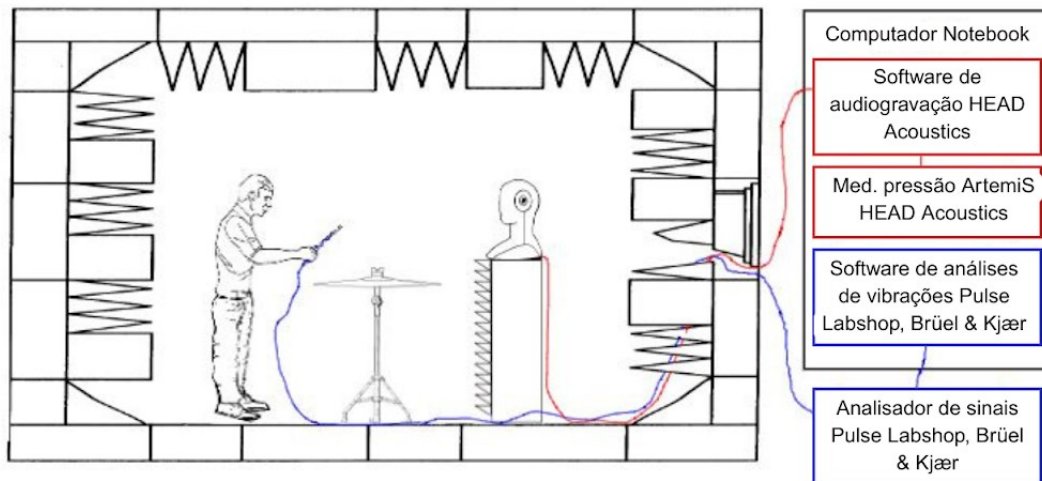


Figura 2.1 – Esquema de medição de sinais. Azul: aceleração da baqueta durante impacto. Vermelho: pressão sonora incidente no torso e proveniente do impacto no prato. Fonte: Modificada a partir de WERNER, K. (2015).

Ensaio de caracterização de timbre, como o apresentado na Figura 2.1 é um exemplo de abordagem que tem por objetivo correlacionar de forma mais precisa os dados técnicos de medição com a experiência sensorial dos indivíduos. Trata-se de uma técnica de medição do nível de audibilidade definida pela norma ISO 532-1:2017, que utiliza unidades psicoacústicas para avaliar a percepção de sons estacionários e não estacionários.

2.2. Medição de nível sonoro

Depois que um estímulo sonoro é captado por sensores de medição, essa informação é convertida em um sinal elétrico equivalente por um transdutor eletroacústico (microfone) e ela então é processada e expressa em termos de nível de pressão sonora por um instrumento chamado medidor de nível sonoro, ou decibelímetro. O nível de pressão sonora, por exemplo, é a grandeza acústica captada por instrumentos de medição que determina a percepção subjetiva da intensidade dos sons (BISTAFA, 2018, p. 87).

Um sensor e um transdutor são os principais elementos de um sistema de medição. Entretanto, outros equipamentos podem fazer parte do conjunto de aferição de nível sonoro, como um pré-amplificador, responsável por amplificar um sinal de baixa magnitude obtido por

um microfone. Ou ainda, um detector de valor eficaz, que mede estatisticamente a magnitude de uma forma de onda captada por microfone.

Os sistemas de medição ainda podem ser compostos por filtros ponderadores, que desempenham papel essencial ao aplicar funções de transferência baseadas em curvas isofônicas. Isso aproxima a sensação de intensidade dos sons dos níveis de pressão sonora medidos, gerando um sinal de saída mais correlacionado com a audibilidade. A aplicação dessa ponderação é comum e mesmo após esse procedimento, o nível de pressão sonora permanece a grandeza base da medição, mas agora melhor ajustado conforme a percepção auditiva (BISTAFA, 2018, p. 91).

2.2.1. Curvas isofônicas

Para quantificar a sensação subjetiva de intensidade dos sons, foi desenvolvida uma grandeza psicoacústica denominada nível de audibilidade. Essa medida varia conforme o nível sonoro e da frequência do som e é expressa na unidade “fone”. Curvas que conectam pontos com o mesmo nível de audibilidade são chamadas de curvas isoaudíveis, ou ainda, curvas isofônicas.

As linhas de mesmo nível de audibilidade foram criadas para representar a relação entre a frequência de um som e o nível de pressão sonora necessário para que ele seja percebido com a mesma intensidade subjetiva pelo ouvido humano. Essas curvas foram normalizadas internacionalmente e estão descritas na norma ISO 226:2023. A Figura 2.2 ilustra as curvas isofônicas para tons puros, segundo a norma anteriormente citada.

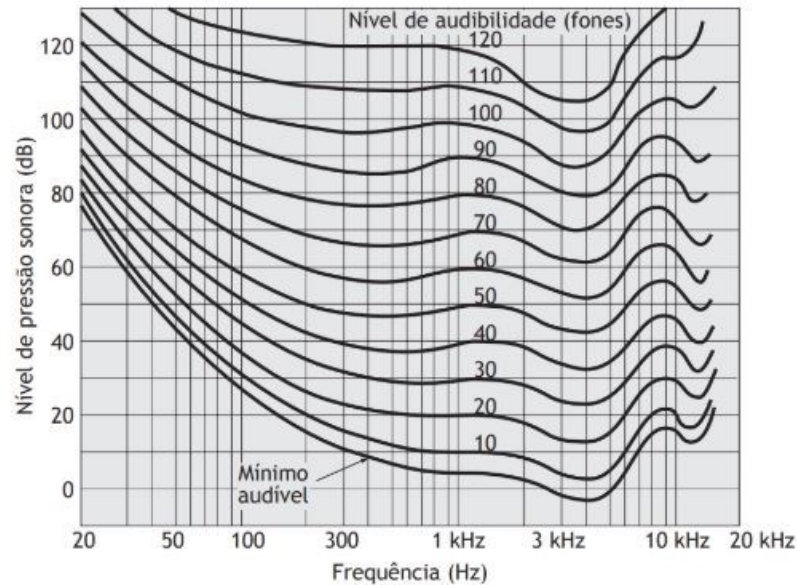


Figura 2.2 – Curvas de mesmo nível de audibilidade para tons puros. Fonte: Adaptada de ISO 226 por BISTAFA, S. (2018). “Acústica aplicada ao controle do ruído”. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2018.

A primeira observação que deve ser feita a respeito da Figura 2.2 é a comparação entre sinais de mesmo nível de audibilidade. Como por exemplo, a linha de 120 fones. Observe que não existe muita variação de nível pressão sonora (cerca de 25 dB) no espectro de 20 a 20 kHz. Isso significa que tanto o sinal de maior nível sonoro para menores frequências, quanto o menor nível para frequências mais altas, podem ser percebidos pela audição de uma pessoa da mesma forma.

Essa situação de mesma percepção para diferentes frequências também pode ser encontrada para curvas isofônicas de menor audibilidade, como a de 10 fones. O que acontece nesses casos é que a variação dos níveis sonoros com a frequência se torna mais acentuada, aumentando a amplitude das curvas isofônicas. Note que a curva isofônica de 40 fones possui a variação de aproximadamente 75 dB ao longo das diferentes frequências, enquanto para a curva de 100 fones essa diferença é de apenas 40 dB.

Outro apontamento que deve ser feito a respeito da Figura 2.2 é a do conceito de limiar de audição. Essa definição corresponde ao mínimo nível de pressão sonora necessário para que um tom puro seja percebido em diferentes frequências, sob condições ideais (ocasiões de campo

livre e percepção do som com ambas as orelhas). Esse limiar define o limite inferior das curvas isofônicas, que variam conforme a frequência do som.

Por exemplo, observa-se uma variação de 80 dB na curva isofônica referente a limiar de audição, quando são comparados os níveis sonoros obtidos para as frequências de 20 Hz e 4.000 Hz. Isso demonstra que o ouvido humano é significativamente mais sensível às frequências médias a altas do que às frequências muito baixas, pois o nível sonoro que deveria ser atingido para ultrapassar o limiar de audição é muito maior para espectros de menor oscilação.

2.2.2. Filtros ponderadores

Os filtros ponderadores utilizam de curvas isofônicas para modificar o espectro sonoro conforme a resposta do ouvido humano a diferentes frequências, permitindo uma medição mais alinhada com a percepção auditiva. Possuem características de filtros do tipo passa-alta e os valores que eles medem são indicados como dB(x), onde “x” corresponde à altura da banda de corte do sinal (BISTAFA, 2018, p. 91). Os tipos de filtros ponderadores são as seguintes:

- Filtro ponderador do tipo A: aproxima a sensação auditiva correspondente à curva isofônica de 40 fones.
- Filtro ponderador do tipo B: aproxima a sensação auditiva correspondente à curva isofônica de 70 fones.
- Filtro ponderador do tipo C: aproxima a sensação auditiva correspondente à curva isofônica de 100 fones.
- Filtro ponderador do tipo D: projetado especificamente para a avaliação de ruídos de aeronaves.

Filtros do tipo A são utilizados para medições de ruídos em atividades cotidianas e simulam a resposta do sistema auditivo a sons de intensidade moderada. Se correlacionam bem na identificação de perdas auditivas, mas possuem baixo desempenho para sinais de alta frequência e/ou representações mais complexas. É mais fácil de ser implementada e fornece

como resultado um número único, sendo assim indicada pela maioria das normas e legislações relativas à ruídos, independentemente das características específicas do ruído analisado.

Já os filtros do tipo B, são mais utilizados para simular respostas auditivas para níveis sonoros medianos, enquanto os do tipo C são mais adequados para sons de níveis elevados e sons de impacto. Na ponderação C, a função de transferência quase não altera o espectro original do som, pois a frequência de corte desenfaziza o sinal nas frequências onde as curvas isofônicas possuem maiores variações de nível de pressão sonora, como visto na Figura 2.2.

Ainda comparando os diferentes tipos de filtros, sabe-se que quando um sinal contém pouca energia nas baixas frequências, o nível sonoro obtido em A é próximo do nível obtido pela ponderação em C, pois um filtro ponderador tipo A desenfaziza essa faixa do espectro. Caso o nível sonoro obtido por A for menor do que aquele obtido por C, isso indica que a energia sonora nas baixas frequências é significativa (BISTAFA, 2018, p. 92).

Ainda existe a opção de realizar uma medição sem ponderação. Caso nenhum filtro ponderador for utilizado no sistema de aquisição, a metodologia é chamada de dB(lin.), dB linear, ou simplesmente dB. Este valor se aproxima do resultado da ponderação tipo C nos casos em que não há muita energia nas baixas frequências.

De todas as possíveis configurações que um sistema de medição pode obter com um filtro ponderador acoplado, um medidor de nível sonoro básico é capaz de fornecer três tipos de respostas:

- L_A : nível sonoro total A-ponderado, em dB(A);
- L_C : nível sonoro total C-ponderado, em dB(C).
- L_P : nível sonoro total não ponderado, em dB(lin.) ou simplesmente dB.

A resposta de nível sonoro total não ponderado pode não estar disponível em todos os medidores. Quando indisponível, a ponderação C pode ser usada como alternativa.

2.3. Análise de ruídos estacionários

Os níveis sonoros ponderados, tanto totais quanto por bandas de frequência, são fundamentais para avaliar as perturbações causadas por ruídos estacionários, principalmente porque a maioria das normas e legislações recomendam a medição do nível sonoro total A-ponderado (BISTAFA, 2018, p. 91).

Um desafio nessa abordagem é o fato de que sinais ruidosos abrangem uma ampla faixa de frequências, o que dificulta a estimativa precisa da audibilidade. A estimativa da audibilidade é mais precisa quando aplicada a ruídos compostos por tons puros, em vez de sinais ruidosos de banda larga.

Para medir a audibilidade de um sinal ruidoso de banda larga, um método comum consiste em determinar essa grandeza separadamente para cada banda de frequência e, em seguida, combiná-las para obter a audibilidade total, em sones. Assim, a norma ANSI S3.4-1980 (R2003), para medir a audibilidade com base em dados empíricos de ruídos com espectros sonoros relativamente planos e sem tons puros, é constantemente citada pela literatura.

Apesar dos avanços, as medidas de audibilidade em fones e sones podem não ser amplamente utilizadas no controle de ruído. Devido à complexidade dos cálculos, o modelo pode não aderir muito bem às situações de perda auditiva, mascaramento sonoro e incômodo. Entretanto, essas medidas podem e são aplicadas na avaliação da qualidade acústica de produtos manufaturados.

2.4. Análise de ruídos não estacionários

Um ruído ambiente pode ser definido como a superposição de ruídos de diferentes naturezas e origens e assim como em qualquer medição sonora, existe um valor mínimo a ser considerado. Esse valor mínimo é chamado de nível de ruído de fundo, que corresponde ao nível sonoro mais baixo registrado durante o intervalo de medição, sendo causado por fontes distintas (BISTAFA, 2018, p. 116).

Apesar do esforço, na análise de um ruído de fundo, muitos sinais intrusivos o sobrepõem, com frequências e períodos diferentes, o que pode dificultar a identificação precisa

desse sinal. Devido à complexidade e à variabilidade do ruído de fundo, torna-se difícil caracterizar ruídos não estacionários com precisão. Para simplificar a descrição dos ruídos, alguns parâmetros específicos são utilizados.

2.4.1. Níveis estatísticos de L_{10} , L_{50} e L_{90}

O nível de um ruído não estacionário pode ser lido e classificado em intervalos de amplitude de modo a permitir uma análise mais detalhada de sua distribuição ao longo do tempo. Essa classificação de tempo são os chamados “Níveis estatísticos”. A utilização de níveis estatísticos é uma das várias abordagens para descrever ruídos em que o regime de energia sonora muda ao longo do tempo (BISTAFA, 2018, p. 119).

Para sua determinação, a análise no tempo divide o sinal em porcentagem de ocorrência de níveis de ruído em cada faixa de nível sonoro. Em seguida, estes trechos de informações são organizados na forma de um histograma, que permite fazer a medição dos níveis estatísticos. A Figura 2.3 apresenta um exemplo de histograma para medição de níveis estatísticos de um ruído classificado em intervalos de níveis sonoros de 5 dB(A).

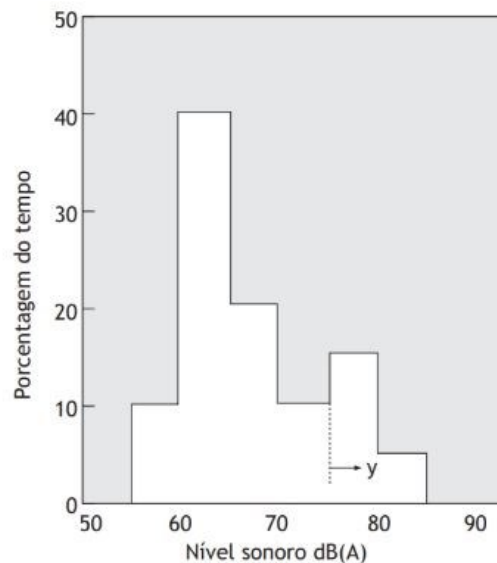


Figura 2.3 – Histograma do ruído classificado na Tab. 7.2, em intervalos sonoros de 5 dB(A).
 Fonte: BISTAFA, S. (2018). “Acústica aplicada ao controle do ruído”. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.

A partir de histogramas, como o da Figura 2.3, é possível calcular a porcentagem do tempo que um nível de um ruído excede um determinado nível sonoro, definindo assim, os níveis estatísticos. Esse indicador também pode ser chamado de níveis de excedência e são três os principais tipos: e L_{10} , L_{50} e L_{90} .

- L_{10} : nível sonoro que foi excedido em 10% do tempo de medição, relacionado a ruídos intrusivos;
- L_{50} : nível sonoro que foi excedido em 50% do tempo de medição, relacionado com ruídos medianos;
- L_{90} : nível sonoro que foi excedido em 90% do tempo de medição, relacionado com ruídos de fundo.

A partir desses indicadores, é possível realizar duas análises iniciais. O valor de L_{90} reflete a condição mais representativa do ruído ambiente, já que em 90% do tempo total do período de análise, o sinal ruidoso esteve presente. Por outro lado, o índice de L_{10} se associa aos ruídos intrusivos, com menor taxa de ocorrência no período de análise.

A diferença entre L_{10} e L_{90} também pode ser calculada e ela indica a variabilidade do ruído durante o período de medição. Ruídos com maior variabilidade tendem a causar maior incômodo (BISTAFA, 2018, p. 120). Algumas análises complementares podem acrescentar mais informação aos estudos de caso, mas essa escolha exigiria a realização de cálculo das áreas abaixo da linha de delimitação, para cada nível de ruído.

2.4.2. Nível equivalente L_{eq}

O nível equivalente (L_{eq}) é outra proposta para avaliação de ruídos não estacionários. Trata-se de uma representação de um nível sonoro estacionário que, se presente durante todo o intervalo de registro, teria a mesma energia sonora dos eventos sonoros analisados numa medição.

O L_{eq} é amplamente utilizado em regulamentações sobre exposição a ruídos não estacionários. No entanto, não é considerado uma medida muito adequada para avaliar perturbações causadas por sinais de curta duração, pois a energia dos impulsos se dilui nos períodos mais silenciosos, afetando a média temporal.

O nível equivalente pode ser calculado de duas formas: pela área sob o histograma do ruído classificado (como o gráfico observado na Figura 2.3) ou pela Equação 2.1.

$$L_{eq} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^N n_i \cdot 10^{\frac{L_{P_i}}{10}} \right) \quad (\text{Eq. 2.1})$$

onde:

- n_i é o número de leituras de um nível sonoro;
- L_{P_i} é o nível sonoro de cada leitura.

Segundo a Equação 2.1, a L_{eq} é a média energética ponderada, na qual cada nível sonoro é ponderado pelo tempo em que ocorre. Sua unidade de medida depende do filtro ponderador utilizado na aquisição do sinal.

2.5. Avaliação de ruído em ambientes internos

Um dos principais fatores a serem considerados na hora de avaliar ruídos em ambientes internos é a sua interferência na fala. As curvas-critério de ruído (“*Noise Criteria Curves*” – NC) classificam e limitam os níveis de ruído ambiente, com uma curva para cada espectro de bandas de oitavas. Figura 2.4 apresenta algumas curvas NC e seus níveis sonoros A-ponderados associados.

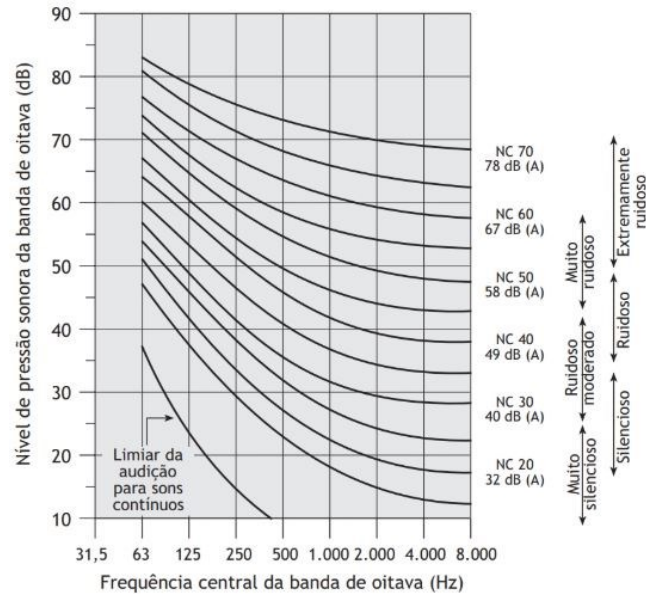


Figura 2.4 – Curvas critério de ruído, ou curvas NCê. Fonte: BISTAFA, S. (2018). “Acústica aplicada ao controle do ruído”. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.

Observe que na Figura 2.4, cada curva NC também foi associada com um nível subjetivo de intensidade sonora. O nível de ruído do ambiente é obtido ao determinar a curva NC logo acima do sinal após medição nas bandas de oitavas entre 63 e 8.000 Hz. As curvas NC são semelhantes às curvas de mesma audibilidade, mas voltadas para ruídos internos, atribuindo um único valor ao nível de ruído do ambiente.

O método NC, baseado na tangente ao espectro de energia predominante, pode gerar erros na classificação por não avaliar adequadamente a “qualidade” do ruído. Por exemplo, um ruído com um pico isolado pode ser classificado da mesma forma que um ruído com um espectro mais uniforme, mesmo que a percepção sonora seja bem diferente. Para reduzir esse problema, recomenda-se que o espectro de ruído ultrapasse a curva NC em pelo menos três bandas de oitavas contínuas.

Outras curvas-critério foram desenvolvidas para classificar com mais moderação as faixas extremas do espectro de ruído. Uma dessas curvas alternativas é a chamada de curvas de avaliação de salas (“*Room Criteria Curves*”), RC, focada em ruídos de baixa frequência, se estendendo até as faixas de 16 Hz. Esse tipo de métrica é utilizada para avaliar, por exemplo, ruídos provenientes de ar-condicionados, com utilização mais adequada que uma curva NC (BISTAFA, 2018, p. 132).

CAPÍTULO III – PARÂMETROS E AVALIAÇÃO DE RUÍDOS EM RECINTOS

A propagação do som em diferentes ambientes é um fenômeno amplamente estudado na engenharia acústica, pois influencia diretamente a qualidade da percepção sonora. O estudo do balanço energético das interações entre ondas e objetos é essencial para compreender a forma como diferentes materiais impactam a propagação sonora. A análise desse fenômeno possibilitou avanços significativos na acústica arquitetônica, especialmente após os estudos pioneiros de Wallace C. Sabine, que, ainda no século XX, definiu o conceito de tempo de reverberação (SKÅLEVIK, 2010).

Este capítulo abordará o balanço energético na propagação do som e os principais parâmetros utilizados para caracterizar a absorção, reflexão e transmissão sonora em superfícies. Além disso, serão discutidas métricas fundamentais para avaliação da absorção sonora em recintos e sua relação com o tempo de reverberação, um dos principais indicadores da qualidade acústica de um ambiente.

3.1. Balanço energético

Quando a trajetória da propagação de uma onda não é interceptada por outro sinal sonoro, ocorre uma propagação de onda livre. Isso não acontece na propagação de ondas em ambientes fechados, onde um sinal que se propaga é constantemente interceptado por outro que foi refletido, por paredes, teto, chão, objetos e pessoas (BISTAFA, 2018, p. 243). A Figura 3.1 ilustra o balanço energético da propagação de uma onda sonora em um recinto.

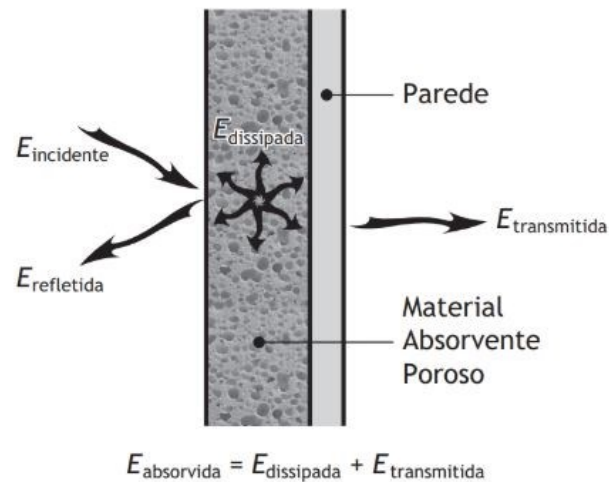


Figura 3.1 - Balanço energético do som que incide sobre uma superfície. Fonte: BISTAFA, S. (2018). “Acústica aplicada ao controle do ruído”. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.

A Figura 3.1 mostra que, ao incidir sobre uma superfície, parte da energia sonora se reflete, enquanto o restante se divide entre energia dissipada e transmitida. A Equação 3.1 expressa matematicamente o balanço energético apresentado pela Figura 3.1.

$$E_{\text{absorvida}} = E_{\text{dissipada}} + E_{\text{transmitida}} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

onde:

- $E_{\text{absorvida}}$ é a energia sonora absorvida por uma superfície;
- $E_{\text{dissipada}}$ é a energia sonora que é dissipada no interior um material;
- $E_{\text{transmitida}}$ é a energia sonora que atravessa a superfície e que depois é devolvida para o ambiente.

O estudo da energia sonora refletida, absorvida e transmitida tem sido fundamental para a engenharia acústica. A partir do estudo do balanço energético, foi possível avaliar como os diferentes materiais influenciam na propagação de ondas sonoras, principalmente após o trabalho desenvolvido por Wallace C. Sabine. Sabine definiu propriedades importantes para

avaliar a absorção sonora de superfícies a partir de parcelas de energia (BISTAFA, 2018, p. 245).

3.2. Parâmetros de avaliação de absorção sonora

Para compreender o comportamento do som em diferentes materiais e ambientes, é fundamental o estudo dos coeficientes que descrevem a interação das ondas sonoras com as superfícies. Uma avaliação mais consciente da absorção total de um recinto permite projetar espaços com melhor desempenho acústico, reduzindo ecos indesejados e melhorando a qualidade sonora de diferentes aplicações.

3.2.1. Coeficiente de absorção sonora

O coeficiente de absorção sonora é a grandeza física que representa a capacidade de uma superfície em absorver som e depende do material que constitui o elemento que se encontra no caminho da propagação de uma onda.

Representado por “ α ”, essa propriedade varia entre 0 e 1 e é mínima para os casos de uma superfície não ou pouco absorvente. Quanto maior é a capacidade de absorção sonora do material, mais o coeficiente se aproxima de 1. Entretanto, por limitações físicas, a absorção completa ($\alpha = 1$) não existe. Se um material possui pouca ou nenhuma capacidade de absorção sonora, diz-se que ele tende a ser um material reflexivo.

A relação matemática para o cálculo do coeficiente de absorção sonora a partir das parcelas do balanço energético da propagação de uma onda sonora em um recinto é dada pela Equação 3.2.

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} = \frac{E_{\text{incidente}} - E_{\text{refletida}}}{E_{\text{incidente}}} = 1 - \frac{E_{\text{refletida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

A absorção sonora ainda varia com a frequência do som incidente. Assim, uma superfície de um determinado material possui diferentes coeficientes de absorção, um valor para cada um dos espectros das bandas de oitava.

A absorção ocorre pela dissipação de energia sonora devido ao atrito interno no material, causado pelo movimento das partículas de ar em sua estrutura. Quanto maior é o coeficiente de absorção, maior é a energia sonora dissipada. Os materiais fibrosos, como lãs (de vidro, de nylon, etc.) e porosos, como a espuma de poliuretano, são considerados bons absorventes acústicos por conta da alta capacidade de absorção de energia sonora.

Bons absorvedores acústicos costumam ser leves e sem estruturas rígidas bem definidas. Em contrapartida, superfícies mais densas e de baixa porosidade não apresentam os mesmos mecanismos de absorção sonora. No entanto, a aplicação de elementos altamente absorventes sobre bases rígidas pode aumentar a dissipação do som. Isso ocorre porque a interação entre esses dois tipos de materiais modifica a forma como a energia sonora é dissipada, influenciando a capacidade de absorção.

Outros fatores que alteram o valor do coeficiente de absorção em materiais absorventes são a sua espessura e a sua densidade. Nota-se que o coeficiente aumenta conforme o material se torna mais espesso e/ou mais denso. A distância de aplicação entre material sólido e superfície absorvente também é capaz de aumentar significativamente o coeficiente de absorção do conjunto. Essa estratégia altera a capacidade de absorção sonora de uma superfície sem aumentar o seu custo de implementação.

Uma das formas de se obter o coeficiente de absorção sonora que é utilizado nas aplicações acústicas é, experimentalmente, em uma câmara de testes chamada câmara reverberante. Quando é referenciado um coeficiente de absorção obtido por câmara reverberante, está sendo mencionado o coeficiente de absorção sonora de Sabine.

3.2.2. Coeficiente de reflexão sonora

Complementando o conceito de coeficiente de absorção, existe o coeficiente de reflexão sonora. Essa característica é representada pelo símbolo “ ρ ” e quantifica a capacidade de um material em refletir uma onda sonora. O coeficiente de reflexão sonora também varia entre 0 e

1, sendo mínimo para superfícies altamente absorventes e 1 para superfícies altamente reflexivas. A reflexão completa ($\rho = 1$) também é impraticável e pode causar problemas em modelagens matemáticas.

A Equação 3.3 mostra como é calculado o coeficiente de reflexão sonora em termos de energia refletida e incidente.

$$\rho = \frac{E_{refletida}}{E_{incidente}} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

É possível ainda construir uma relação entre os coeficientes de absorção e reflexão. Trabalhando matematicamente a Equação 3.1 de balanço de energia é possível obter uma nova fórmula que relacione α e ρ . A Equação 3.4 apresenta como é feito tal cálculo.

$$\alpha = 1 - \rho \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Segundo a Equação 3.4, o coeficiente de absorção sonora e o coeficiente de reflexão sonora se mostram grandezas complementares.

3.2.3. Coeficiente de transmissão sonora

O coeficiente de transmissão sonora foi definido com o objetivo de complementar a análise de contribuição de superfícies para o balanço energético da transmissão de uma onda sonora. Trata-se de uma grandeza que calcula a proporção entre a parcela de energia sonora que atravessa barreiras de uma superfície e a parte incidente. O coeficiente de transmissão sonora é indicado por “ τ ” e sua fórmula matemática está descrita da Equação 3.5.

$$\tau = \frac{E_{transmitida}}{E_{incidente}} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

O coeficiente de transmissão sonora é uma ferramenta essencial para avaliar o desempenho acústico de materiais e auxilia no desenvolvimento de estratégias para controle de ruído e isolamento sonoro. Seu valor varia de 0 a 1, sendo que superfícies altamente transmissivas possuem coeficientes próximos de 1, enquanto materiais com boa capacidade de isolamento apresentam valores mais baixos.

3.3. Absorção sonora em recintos

O coeficiente de absorção é uma propriedade inerente de um material, à num nível molecular. Para analisar como ocorre a absorção sonora em recintos é preciso entender como esse tipo de característica interage com a área da superfície que intercepta a onda, e então com os mecanismos de propagação sonora de uma sala. A absorção sonora de uma superfície é calculada através da Equação 3.6.

$$A_{sup} = \alpha \cdot S \quad (\text{Eq. 3.6})$$

onde:

- α é o coeficiente de absorção sonora da superfície, adimensional;
- S é a área da superfície que intercepta a onda sonora, em m^2 .

A unidade de absorção sonora é o m^2 (Sabine). Pela definição, 1 m^2 (Sabine) corresponde a 1 m^2 de material 100% absorvente.

As superfícies de um recinto podem ter diferentes materiais, cada um com seu respectivo coeficiente de absorção sonora. A absorção sonora total do recinto é então o somatório da absorção sonora de cada uma das superfícies em seu interior. A Equação 3.7 apresenta como é calculada a absorção sonora de um recinto.

$$A_{sup.recinto} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot S_i \quad (\text{Eq. 3.7})$$

onde:

- α_i é o coeficiente de absorção sonora de cada superfície, adimensional;
- S_i é a área de cada uma das superfícies que absorve uma onda sonora, em m².

Ainda é possível definir um coeficiente de absorção sonora médio das superfícies que compõem um recinto ($\bar{\alpha}$), como é visto na Equação 3.8.

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{sup.recinto}}{S_{recinto}} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^N S_i} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

O coeficiente de absorção médio auxilia o projetista a entender como ocorre a distribuição da capacidade de absorção sonora dentro de um ambiente fechado. Desta forma é possível avaliar, por exemplo, se uma sala possui bons índices de absorção sonora ou se ela possui coeficientes de absorção médio mais baixos.

Quando a análise de propagação sonora ocorre sobre um recinto vazio, somente a absorção sonora das paredes internas do ambiente contribui para sua capacidade de absorção sonora. Entretanto, existem outras parcelas de absorção que devem ser consideradas quando se deseja avaliar mais detalhadamente a capacidade de absorção sonora de uma sala.

Conforme a necessidade e complexidade da análise, a $A_{sup. recinto}$ deverá ser somada às influências de móveis, equipamentos, pessoas e até mesmo do ar que ocupa o interior do ambiente. A Equação 3.9 apresenta como fica o cálculo da absorção sonora de um recinto de forma detalhada, levando em consideração não somente a absorção das suas superfícies, mas também a absorção de móveis, equipamentos, pessoas e do ar.

$$A_{recinto} = A_{sup.recinto} + A_{diversos} + A_{ar} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

onde:

- $A_{recinto}$ é a absorção sonora das superfícies do recinto, em m^2 (Sabine);
- $A_{diversos}$ é a absorção sonora de pessoas e móveis, equipamentos e pessoas no interior do recinto, em m^2 (Sabine);
- A_{ar} é a absorção sonora do ar no interior do recinto, em m^2 (Sabine).

Conforme instrução da literatura, a absorção de pessoas, móveis e equipamentos só deve ser considerada em ambientes com alta ocupação relativa ao volume da sala. Isso permite fazer simplificações nos cálculos quando necessários, principalmente em ambientes com o pé direito muito alto, ou quando a área da sala é relativamente grande. Outro fator descomplicador é a influência da absorção sonora devido a presença de ar dentro desses ambientes, que só deve ser considerada em recintos que possuem grande volume.

Para o cálculo da absorção sonora de móveis, equipamentos e pessoas, basta utilizar o coeficiente de absorção sonora adequado e a área que terá contato com a onda que irá propagar o ambiente. Todavia, para o cálculo da absorção sonora devido a presença de ar dentro de uma sala, são exigidas algumas outras informações. A absorção sonora devido a presença de ar dentro de uma sala pode ser calculada pela Equação 3.10.

$$A_{ar} = 4 \cdot V \cdot m_{ar} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

onde:

- V é o volume total do recinto, em m^3 ;
- m_{ar} é a constante de absorção sonora do ar, em m^{-1} .

A constante de absorção sonora do ar é uma grandeza que varia com a umidade relativa e a temperatura do ambiente. A Tabela 3.1 lista os valores de m_{ar} para o ar a 25 °C para diferentes níveis de umidade relativa e bandas de oitava.

Tabela 3.1 - Constantes de absorção sonora do ar (m_{ar}) a 25 °C. Fonte: BISTAFA, S. (2018). “Acústica aplicada ao controle do ruído”. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.

Umidade relativa	Frequência central da banda de oitava (Hz)								
	31,5	63	125	500	1.000	2.000	4.000	8.000	16.000
10	-	-	-	0,0030	0,0060	0,0080	0,0200	0,0450	0,0625
20	-	-	-	0,0010	0,0020	0,0040	0,0150	0,0460	0,0830
30	-	-	-	-	0,0015	0,0028	0,0078	0,0171	0,0675
40	-	-	-	-	0,0010	0,0025	0,0064	0,0130	0,0500
50	-	-	-	-	0,0010	0,0024	0,0059	0,0111	0,0410
60	-	-	-	-	0,0010	0,0022	0,0055	0,0102	0,0340
70	-	-	-	-	0,0010	0,0021	0,0052	0,0097	0,0300
80	-	-	-	-	0,0010	0,0020	0,0050	0,0093	0,0260
90	-	-	-	-	0,0010	0,0020	0,0050	0,0093	0,0258

Além das características individuais dos materiais, outros fatores influenciam a absorção sonora em um recinto. A relação entre a absorção sonora e a propagação do som dentro de um recinto influencia diretamente a forma como o som se comporta ao longo do tempo. Esse comportamento pode ser analisado a partir do crescimento e do decaimento sonoro no ambiente, que determinam a estabilização do nível sonoro enquanto a fonte está ativa e sua redução após o desligamento. Esse processo está diretamente ligado ao conceito de tempo de reverberação, fundamental para a caracterização da acústica de uma sala.

3.4. Tempo de reverberação

Quando uma fonte sonora é ligada em um recinto, a energia sonora aumenta até atingir um estado estacionário, no qual a injeção e a absorção de energia se equilibram, mantendo um nível sonoro constante. Ao ser desligada, esse nível começa a diminuir, e a velocidade do decaimento depende da capacidade de absorção do ambiente.

A maneira com que ocorre o decaimento de nível sonoro em um ambiente após o desligamento de uma fonte está diretamente relacionada ao tempo de reverberação. O tempo de

reverberação é definido como o intervalo de tempo necessário para que o nível sonoro do recinto diminua em 60 dB após o desligamento da fonte sonora.

O tempo de reverberação, representado por T_{60} , varia de acordo com a capacidade de absorção sonora do recinto. Ambientes com alta absorção apresentam tempos de reverberação reduzidos, resultando em uma queda mais rápida do nível sonoro. Por outro lado, recintos com baixa absorção possuem tempos de reverberação mais longos, prolongando o processo de decaimento.

Diversos pesquisadores desenvolveram equações para o cálculo do tempo de reverberação, considerando diferentes características dos recintos. A primeira abordagem foi proposta por Wallace C. Sabine, que estabeleceu as bases da acústica moderna. Posteriormente, outras metodologias foram desenvolvidas para corrigir limitações da equação de Sabine, como as equações de Eyring-Norris e de Millington-Sette. As três abordagens mencionadas serão apresentadas a seguir.

É importante destacar que tanto a equação de Sabine, quanto a fórmula de Eyring-Norris, assumem condições ideais de propagação sonora, como a teoria do campo difuso, uma situação difícil de ser obtida na prática. Dentre os modelos adotados neste trabalho, a formulação de Millington-Sette se destaca por considerar individualmente a capacidade de absorção de cada superfície do recinto. Assim, cada equacionamento possui suas próprias recomendações de aplicação, conforme o contexto do ambiente analisado.

3.4.1. Tempo de reverberação, por Sabine

A primeira pessoa a estudar métodos para aprimorar o cálculo do tempo de reverberação foi Wallace C. Sabine, ainda no século XIX. Nessa ocasião, a Universidade de Harvard pediu que Sabine resolvesse um problema acústico em um auditório do museu de arte da instituição. Além de solucionar o problema, Sabine estabeleceu as bases da acústica como ciência. Esse trabalho influenciou gerações de engenheiros acústicos, que passaram a adotar suas pesquisas pioneiras sobre o tempo de reverberação como referência.

A Equação 3.11 expressa a fórmula do tempo de reverberação pela metodologia de Sabine, considerando a absorção sonora do ar.

$$T_{60} = 0,161 \cdot \frac{V}{S_{recinto} \cdot \bar{\alpha} + 4 \cdot m_{ar} \cdot V} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

onde:

- V é o volume total da sala, em m^3 ;
- $S_{recinto}$ é a área total das superfícies de um recinto, em m^2 ;
- $\bar{\alpha}$ é o coeficiente de absorção sonora médio das superfícies que compõem um recinto (Eq. 3.8), adimensional;
- m_{ar} é a constante de absorção sonora do ar, em m^{-1} .

Por questões de simplificação dos cálculos e considerando que os modelos simulados não apresentam volumes elevados, a parcela da absorção sonora referente ao ar foi desconsiderada. Com isso, utilizou-se uma fórmula simplificada para o tempo de reverberação, baseada na equação de Sabine (Eq. 3.12).

$$T_{60} = 0,161 \cdot \frac{V}{S_{recinto} \cdot \bar{\alpha}} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Apesar do pioneirismo, com o tempo, a formulação de Sabine não se mostrou tão eficiente para o cálculo do tempo de reverberação de ambientes muitos complexos ou com alta capacidade de absorção. Logo, outros pesquisadores também contribuíram para o estudo da absorção sonora de recintos.

3.4.2. Tempo de reverberação, por Eyring-Norris

Com o avanço dos estudos em acústica, constatou-se que a equação desenvolvida por Sabine não era adequada para todas as situações. Para superar essa limitação, diversos pesquisadores tentaram desenvolver fórmulas mais precisas do que a relação matemática de

Sabine. Entre elas, a de Eyring (1930), que se destaca por fornecer resultados mais realistas do que aqueles apontados pela primeira alternativa de cálculo. A abordagem de Eyring aprimora a equação de Sabine, corrigindo suas limitações em ambientes com alta absorção sonora.

A Equação 3.13 expressa como realizar o cálculo do tempo de reverberação segundo a metodologia de Eyring-Norris, considerando a parcela de absorção sonora do ar.

$$T_{60} = 0,161 \cdot \frac{V}{S_{recinto} \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4 \cdot m_{ar} \cdot V} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

onde:

- V é o volume total da sala, em m^3 ;
- $S_{recinto}$ é a área total das superfícies do recinto, em m^2 ;
- $\bar{\alpha}$ é o coeficiente de absorção sonora médio do recinto (Equação 3.8), adimensional;
- m_{ar} é a constante de absorção sonora do ar, em m^{-1} .

A mesma simplificação aplicada a fórmula de Sabine e que resultou na equação 3.12, pode ser desenvolvida para o cálculo do tempo de reverberação segundo Eyring-Norris. A Equação 3.14 apresenta o cálculo de T_{60} segundo Eyring-Norris, desconsiderando a absorção sonora do ar.

$$T_{60} = 0,161 \cdot \frac{V}{S_{recinto} \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

Eyring descobriu que sua fórmula era não apenas mais precisa que a de Sabine, mas também que a abordagem de Sabine era, na verdade, um caso particular da sua própria equação. Atualmente, aceita-se que as equações 3.11 e 3.12 podem ser usadas em ambientes onde o coeficiente de absorção médio seja inferior a 0,2. No entanto, quando esse coeficiente ultrapassa 0,2 é recomendado o uso das equações de Eyring-Norris (BRANDÃO, 2016).

3.4.3. Tempo de reverberação, por Millington-Sette

A equação de Millington-Sette é uma segunda alternativa à fórmula de Sabine, sendo mais indicada para lidar com ambientes onde o coeficiente de absorção sonora varia significativamente entre os elementos de uma sala. Essa nova abordagem deve ser aplicada quando há distribuição desigual de materiais absorventes e busca-se corrigir as limitações das equações anteriores, Sabine e Eyring-Norris, em cenários complexos.

A Equação 3.15 expressa o tempo de reverberação segundo a metodologia de Millington-Sette, incluindo o efeito da absorção sonora do ar no interior de um recinto.

$$T_{60} = 0,161 \cdot \frac{V}{-\sum_{i=1}^N S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i) + 4 \cdot m_{ar} \cdot V} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

onde:

- V é o volume total da sala, em m^3 ;
- α_i é o coeficiente de absorção sonora de cada superfície, adimensional;
- S_i é a área de cada uma das superfícies que absorve uma onda sonora, em m^2 ;
- m_{ar} é a constante de absorção sonora do ar, em m^{-1} .

A equação simplificada para o cálculo do tempo de reverberação segundo Millington-Sette, obtida pelos mesmos motivos apresentados nas seções 3.4.1 e 3.4.2 deste trabalho, é apresentada a seguir na Equação 3.16.

$$T_{60} = 0,161 \cdot \frac{V}{-\sum_{i=1}^N S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Ao mesmo tempo que a utilização do logaritmo neperiano pela fórmula de Millington-Sette complexifica os cálculos, ele proporciona uma melhor ponderação do coeficiente de

absorção sonora no cálculo do tempo de reverberação. Isso permite trabalhar melhor os ambientes pouco homogêneos em termos de absorção sonora (BRANDÃO, 2016).

3.5. Ambientes para determinação experimental de parâmetros acústicos

A determinação das propriedades sonoras de produtos é outra preocupação da engenharia acústica. Nesse sentido, a ISO 10534-2:2023 e a ISO 354:2003 apresentam as normas para obtenção de coeficiente de absorção sonora de materiais em ambientes e condições extremamente controladas.

Existem dois tipos de salas que são utilizadas em laboratórios para realizar ensaios especializados em acústica: as câmaras reverberantes e as câmaras anecoicas. Cada uma possui uma configuração especial que permite obter informações técnicas sobre a interação entre uma onda sonora e um material, isolando-os de outras variáveis ambientais.

3.5.1. Câmaras anecoicas

O primeiro ambiente a ser apresentado é a câmara anecoica. Trata-se de uma sala projetada para absorver toda ou a maioria da energia sonora emitida por uma fonte em seu interior, de modo a tentar minimizar a reflexão do som. Câmaras anecoicas simulam condições de campo livre e são usadas principalmente para determinar a potência sonora de máquinas e os índices de diretividade de fontes de som.

A Figura 3.2 apresenta uma sala anecoica montada pelo departamento de acústica Carl F. Eyring Science Center, da Brigham Young University (BYU), em parceria com o professor associado Timothy W. Leishman (Y Magazine, 2015). Em salas como esta, os sons de baixa frequência se refletem infinitamente até desaparecerem, enquanto os sons de alta frequência são absorvidos por entre as espumas em forma de cunha (VERITASIUM, 2014). O ambiente é composto por 37 microfones utilizados na coleta de dados.



Figura 3.2 - Um estudante sentado em uma cadeira suspensa na câmara anecoica. Fonte: Adaptado de PHILBRICK, Mark A. "The quietest place to study". Y MAGAZINE, Out of the Blue (2015). Disponível em: <https://magazine.byu.edu/article/the-quietest-place-to-study/>.

Segundo a própria equipe de pesquisadores da BYU, essa câmara anecoica pode causar enjoos, tonturas e claustrofobia devido à sensação de espaço reduzido que ela reproduz. Segundo os relatos do time, a condição de abafamento sonoro é tão intensa, que após alguns minutos dentro da sala, é possível escutar os próprios batimentos cardíacos.

3.5.2. Câmaras reverberantes

Outro ambiente utilizado para obtenção de parâmetros acústicos é a câmara reverberante. Tais ambientes são projetados para maximizar a reflexão sonora, gerando um campo difuso, no qual, independentemente da distância entre fonte e receptor, a pressão sonora

refletida permanece uniforme em todo o recinto. Câmaras reverberantes possuem a mesma utilização da câmara anecoica, mas agora com o acréscimo da possibilidade de determinação de coeficientes de absorção sonora de Sabine e de transmissão sonora.

As normas ISO 10534-2:2023 e ISO 354:2003 padronizam os ensaios para obtenção de coeficiente de absorção sonora de materiais em uma câmara reverberante. A Figura 3.3 mostra o interior da câmara reverberante da Universidade de Southampton, utilizada, na ocasião, para medir o coeficiente de absorção sonora da lã de rocha. Nela, é possível observar a presença de uma fonte sonora e de microfones para realizar a medição.



Figura 3.3 - Imagem do vídeo "Ensaio de absorção sonora da lã de rocha". O vídeo mostra a análise de absorção sonora utilizando lã de rocha. Fonte: SERRANO, Pablo. Ensaio de absorção sonora da lã de rocha. YouTube, 2018. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=uPVNS9YU0ys>.

É importante salientar que os microfones utilizados na determinação do coeficiente de absorção de Sabine são colocados em diferentes posições para permitir o cálculo de uma média da pressão sonora no ambiente.

3.5.3. Determinação de coeficiente de absorção sonora de Sabine, em câmara reverberante

Os ensaios para determinação do coeficiente de absorção sonora de Sabine em câmaras reverberantes seguem a norma ISO 354:2003. Num primeiro momento, são realizadas medições do tempo de reverberação em uma câmara reverberante sem o material que se deseja analisar. Em seguida, o produto que participa da análise é inserido no ambiente controlado e novas medições de tempo de reverberação são obtidas.

Após o período de medições de T_{60} , calcula-se o coeficiente de absorção sonora experimental de Sabine, α_{exp} , conceito que correlaciona os dados com e sem material de análise. O coeficiente de absorção sonora experimental de Sabine, é determinado pela Equação 3.17.

$$\alpha_{exp} = 0,161 \cdot \frac{V}{S} \cdot \left(\frac{1}{T'_{60}} - \frac{1}{T''_{60}} \right) \quad (\text{Eq. 3.17})$$

onde:

- V é o volume total da câmara, em m^3 ;
- S é a área da superfície da amostra, em m^2 ;
- T'_{60} é o tempo de reverberação da câmara com a amostra, em segundos;
- T''_{60} é o tempo de reverberação da câmara sem a amostra, em segundos.

Vale ressaltar que como se trata de um método experimental de obtenção de parâmetros, é de suma importância repetir as mesmas condições para cada uma das medições.

CAPÍTULO IV – MODELAGEM SEGUNDO GUIAS DE ONDAS DIGITAIS

A simulação numérica da propagação sonora em ambientes tridimensionais é um desafio significativo devido à necessidade de lidar com um alto volume de dados e cálculos complexos. Diante dessas limitações, o método da Malha de Guias de Ondas Digitais se mostra uma alternativa interessante. Esse método baseia-se na representação da propagação sonora através de tubos discretizados que permitem simular a solução da equação diferencial da onda de forma eficiente.

A seguir, serão abordados em detalhes o funcionamento da Malha de Guias de Ondas Digitais e sua aplicação na modelagem tridimensional da propagação sonora.

4.1. Método da malha das Guias de Ondas Digitais

Existem vários métodos numéricos que podem ser utilizados em simulações. Um deles é o MEF, Método dos Elementos Finitos (GERGES, 2000). Essa abordagem é amplamente utilizada em análises estruturais e está incorporada em softwares de simulação, como o Ansys®.

Na utilização do MEF como metodologia de implementação, o modelo de um corpo é dividido em uma quantidade pré-estabelecida de elementos, que se conectam por juntas ou nós (BATHE, 1981). Apesar da vasta utilização, os elementos finitos não desempenham um papel muito bom em simulações acústicas (GERGES, 2000).

Um dos motivos da inviabilidade da utilização do MEF em análises de propagação sonora é a sua ineficiência em simulações de grandes volumes, o que eleva o custo computacional pelo cálculo de matrizes de dados extensas. Dessa forma, é preciso encontrar novas abordagens que permitam lidar com grandes quantidades de informação de uma simulação de propagação sonora.

Uma alternativa promissora para o problema de capacidade de processamento é a utilização do método da Malha de Guias de Ondas Digitais. O nome é originário do inglês “*Digital Waveguide Mesh*” (DWM) e se trata de um método de discretização de malhas voltado para a solução da equação diferencial da onda, numa abordagem unidirecional. A DWM considera que as ondas se propagam dentro de guias de onda, ou tubos, de pequeno

comprimento e seção transversal reduzida (SMITH, 1992). Tais guias de propagação são chamadas Guias de Ondas Digitais.

As guias do DWM ainda podem ser interligadas entre si, para assim representar ambientes de até três dimensões. A propagação da onda sonora entre duas juntas, em um meio sem perdas, é simulada através de uma linha de atraso digital, o que permite reduzir custos computacionais. A metodologia DWM é utilizada, por exemplo, para simular a reverberação em salas (SMITH, 1992).

Um dos desafios do DWM em simulações de propagação sonora é o erro de dispersão, que ocorre devido à dificuldade em discretizar modelos tanto quanto necessário. Esse problema compromete a precisão dos resultados, especialmente em malhas com resolução limitada. Uma das formas de diminuir o erro de dispersão é aumentar o refinamento da malha, o que, em contrapartida, eleva os custos computacionais da simulação (NISHIDA, 2022).

Além do trabalho NISHIDA (2022), a tese de BOAVENTURA (2014) agrega grande valor ao desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de simular a propagação sonora em ambientes fechados, especialmente no que diz respeito a simulações acústicas utilizando DWM e Guias de Ondas Digitais.

4.2. Guias de Ondas Digitais

As Guias de Ondas Digitais são os pequenos tubos onde a propagação sonora ocorre de forma unidirecional na metodologia da DWM. Essas guias representam a unidade fundamental dessa estratégia de representação, pois expande o conceito de unidirecionalidade para todos os eixos do sistema de coordenadas estabelecido (NISHIDA, 2022).

A Equação 4.1 descreve matematicamente a propagação sonora unidirecional pelas Guias de Ondas Digitais.

$$\frac{\partial^2 P(t,x)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 P(t,x)}{\partial x^2} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde:

- $P(t, x)$ é a equação unidirecional da pressão sonora em função do tempo e espaço, em Pa.

A Equação 4.1 pode ser solucionada pela fórmula de d'Alembert, conforme mostrado na Equação 4.2.

$$P(t, x) = P^+ \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right) + P^- \cdot \left(t + \frac{x}{c}\right) \quad (\text{Eq. 4.2})$$

onde:

- P^+ representa a pressão sonora proveniente de uma onda que trafega em um sentido arbitrário da guia de propagação;
- P^- representa a pressão sonora proveniente de uma onda que trafega em um sentido oposto ao de P^+ no tubo da guia de propagação.

As guias de ondas que orientam a propagação de P^+ e P^- podem ser interconectadas por meio das chamadas juntas de dispersão, o que possibilita o cálculo pontual dos seus valores de pressão sonora (NISHIDA, 2022, p. 45). A Figura 4.1 ilustra uma junta conectada a N guias de ondas.

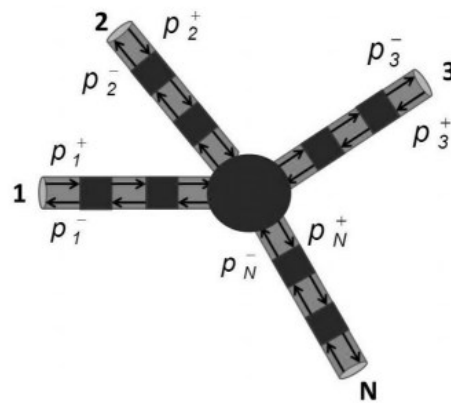


Figura 4.1 – Junta de Dispersão Genérica. Fonte: CAMPOS (2004), citado por BOAVENTURA (2014).

Ao observar a Figura 4.1 é possível visualizar os vetores de pressão sonora que entram e saem de um nó, em sentidos opostos entre si. Segundo Boaventura (2014, p. 97), o valor da pressão sonora de um determinado nó pode ser calculado pela Equação 4.3, enquanto uma análise similar pode ser realizada para a velocidade de propagação da onda, conforme a Equação 4.4.

$$P_i = P_i^+ + P_i^- \quad (\text{Eq. 4.3})$$

$$v_i = v_i^+ + v_i^- \quad (\text{Eq. 4.4})$$

onde:

- P_i é a pressão sonora em um determinado nó;
- v_i é a velocidade da onda viajante em um determinado nó.

Uma relação entre as Equações 4.3 e 4.4 pode ser estabelecida com o uso da impedância acústica R , conforme visto na Equação 4.5.

$$P_i^+ = R \cdot v_i^+ \quad (\text{Eq. 4.5})$$

$$P_i^- = R \cdot v_i^- \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Através do balanço da quantidade de movimento linear, sabe-se que a soma das velocidades que entram numa determinada junta de dispersão, deve ser igual à soma dessas grandezas vetoriais que saem dela. Para além disso, as pressões sonoras nas vizinhanças de uma determinada junta de dispersão são iguais à daquele que é analisada (NISHIDA, 2022, p. 46). Visto isso, é possível escrever uma nova fórmula que calcule a pressão sonora em uma junta. O resultado desse processo é apresentado na Equação 4.6.

$$P_J = \frac{2 \left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i^+}{R_i} \right) \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{R_i} \right)} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

onde:

- P_J representa pressão sonora para uma junta de dispersão genérica.

Caso a impedância acústica seja uniforme para todas as guias que acessam uma junta, a Equação 4.6 pode ser simplificada, resultando na Equação 4.7.

$$P_J = \frac{2}{N} \cdot \left(\sum_{i=1}^N P_i^+ \right) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Na metodologia da Malha de Guias de Ondas Digitais, sempre existe uma outra junta ao final de cada tubo de propagação, enquanto todos os nós de uma malha são equidistantes. Sendo assim, as pressões positivas de uma determinada junta j são iguais às pressões sonoras que saíram das suas juntas vizinhas, mas desta vez, no intervalo de tempo anterior (NISHIDA, 2022, p. 46). Esse comportamento é descrito matematicamente pela Equação 4.8.

$$P_i^+(n) = P_k^-(n - 1) \quad (\text{Eq. 4.8})$$

onde:

- $P_i^+(n)$ é a pressão sonora que entra em um determinado nó i , no instante discreto atual;
- $P_k^-(n - 1)$ é a pressão sonora que saiu de um nó adjacente a i , no instante discreto exatamente anterior ao momento atual.

Conforme os apontamentos realizados a respeito às Guias de Ondas Digitais, das equações de 4.1 a 4.8 e a comprovada ligação com as respectivas juntas vizinhas, é possível compor uma malha na qual as guias de propagação são interconectadas. Essa conexão entre nós será realizada para representar o processo de propagação sonora em até três dimensões, permitindo a atualização da pressão sonora em cada junta da malha em um dado instante de tempo n (NISHIDA, 2022, p. 46).

A modelagem escolhida para o desenvolvimento deste projeto utilizará a malha cúbica para simular tridimensionalmente a propagação sonora em recintos segundo o método da Malha de Guias de Ondas Digitais.

4.2.1. Guias de Ondas Digitais na modelagem tridimensional

Dentre os diferentes tipos de malhas que podem ser aplicadas na análise tridimensional com DWM, a malha escolhida para representar os sistemas analisados por este projeto é a do tipo cúbica. Nesta configuração, cada junta possui seis nós vizinhos, perpendiculares entre si, conforme ilustrado na Figura 4.2, conforme foi apresentado por MURPHY et al. (2007) e referenciado por Nishida (2022, p. 49).

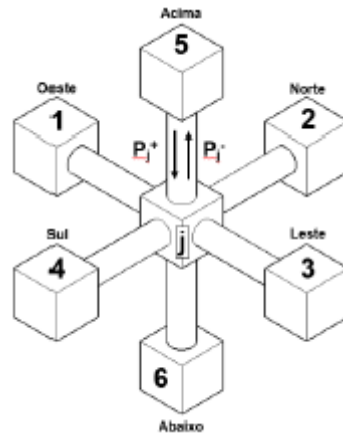


Figura 4.2 – Representação da junta genérica da Malha Cúbica. Fonte: NISHIDA P. P. R. (2022).

É possível observar que na Figura 4.2, cada uma das juntas vizinhas do nó analisado pode ser nomeada com base na posição relativa ao ponto de análise genérico. Para tal, elas receberam os seguintes indicadores: o norte, sul, leste, oeste, acima e abaixo da junta analisada.

Unindo os resultados obtidos pelas equações 4.7 e 4.8, é possível formular uma equação para calcular a pressão sonora de uma junta genérica j em uma malha cúbica.

$$P_j = \frac{1}{3} \cdot [\sum_{i=1}^N P_i (n - 1) - P_j (n - 2)] \quad (\text{Eq. 4.9})$$

A Equação 4.9 calcula a atualização temporal da pressão sonora em todas as juntas da malha, de acordo com instantes de tempo anteriores.

A velocidade de propagação de ondas sonoras numa malha cúbica é determinada pela diagonal de um cubo. Assim, a velocidade do som deve ser corrigida para a consideração dessa forma de propagação. A frequência de atualização da pressão sonora para este tipo de malha também é modificada para comportar a trajetória de propagação de onda que percorre a diagonal citada. A velocidade de propagação corrigida para a utilização de uma malha cúbica é calculada pela equação 4.10, enquanto a taxa de amostragem f_s , também corrigida para o percurso da diagonal de um cubo é vista na Equação 4.11 (NISHIDA, 2022, p. 50).

$$c_{corr} = c_{som} \cdot \sqrt{3} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

$$f_s = c_{som} \cdot \frac{\sqrt{3}}{dx} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

onde:

- c_{corr} é a velocidade de propagação do som corrigida pela trajetória da malha cúbica, em m/s;
- c_{som} é a velocidade de propagação do som, com valor de 340 m/s;
- f_s é a taxa de amostragem do sistema;
- dx é a distância infinitesimal em um eixo arbitrário x.

Segundo a Equação 4.11, é possível concluir que quanto maior for a frequência de amostragem desejada, maior será a taxa de atualização da pressão sonora de uma junta, mais densa será a malha e menor será a distância entre nós.

4.2.2. Condições de contorno das Guias de Ondas Digitais

As juntas que representam as superfícies de contorno do ambiente devem ser trabalhadas de forma diferente dos nós do restante da malha. Quando uma onda sonora atinge uma superfície que intercepta seu caminho de propagação, parte da sua energia é absorvida e parte refletida, a depender dos materiais das paredes da sala (MURPHY; MULLEN, 2002). A Figura 4.3 ilustra a interação entre uma onda sonora e uma superfície.

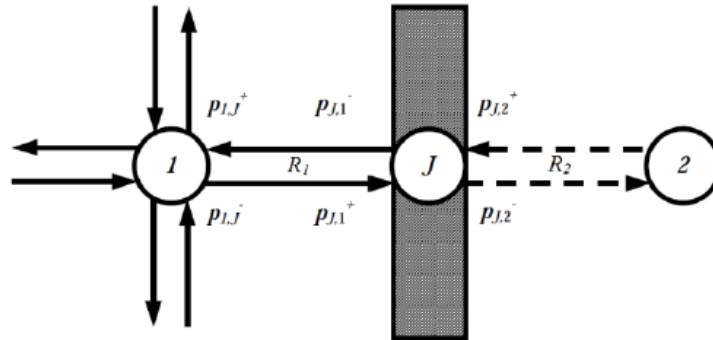


Figura 4.3 – Terminação de uma Malha de Guia de Ondas Digitais devido a um contorno, resultando em reflexão. Fonte: Modificada por NISHIDA, P. P. R. (2022), a partir de MURPHY e MULLEN (2002).

Conforme visto na Figura 4.3, é necessário considerar na análise uma junta imaginária, posicionada para além dos nós da superfície de uma sala. A guia que conecta a junta J à junta imaginária 2, terá um valor de impedância R_2 distinto daquele das demais guias da malha, indicada por R_1 .

Ainda analisando a superfície que intercepta a propagação sonora, é possível calcular a sua reflexão, tomando como base a impedância acústica das guias conectadas à junta j . Conforme o descrito por Murphy e Mullen (2002), o cálculo do coeficiente de reflexão da superfície que comporta a junta j é apresentado na Equação 4.12.

$$r = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

onde:

- r é o coeficiente de reflexão da junta do contorno do ambiente;
- R_1 é a impedância sonora da junta 1, no interior do ambiente;
- R_2 é a impedância sonora da junta 2, posicionada após a junta do contorno do ambiente.

O coeficiente de reflexão definido matematicamente pela Equação 4.12 também respeita a relação de complementaridade com o coeficiente de absorção apresentado pela Equação 3.4 (NISHIDA, 2022, p. 51).

O trabalho apresentado por NISHIDA (2022, p. 51) ainda apresenta um desenvolvimento da Equação 4.7 para análise dos nós do contorno de uma malha seguindo a metodologia DWM, a partir da nova definição para coeficiente de reflexão obtido analiticamente. Tal expressão é definida pela Equação 4.13.

$$P_j = (1 + r) \cdot P_1(n - 1) - r \cdot P_j(n - 2) \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Embora represente uma nova abordagem de cálculo, a Equação 4.13 pode não ser precisa para superfícies com absorção total de energia sonora, como é o caso das superfícies anecoicas (NISHIDA, 2022, p. 51).

A partir de agora, uma questão se tornará altamente relevante para a análise tridimensional de uma propagação sonora: o erro associado a escolha de uma topologia de malha. Esse erro, conhecido como erro de dispersão, está diretamente relacionado à representação das juntas e à velocidade de propagação da onda (VAN DUYNE; SMITH, 1995), como será discutido a seguir.

4.3. Erro de dispersão

A malha cúbica foi a topologia escolhida para as simulações tridimensionais deste projeto. Todavia, quando se trabalha com essa configuração aplicada ao método das Guias de Ondas Digitais, ocorrem erros na velocidade propagação da onda, que dependem da sua frequência e da direção da trajetória (NISHIDA, 2022, p. 54). A Figura 4.4 ilustra como ocorre o erro na propagação das velocidades da onda nesse tipo de formação.

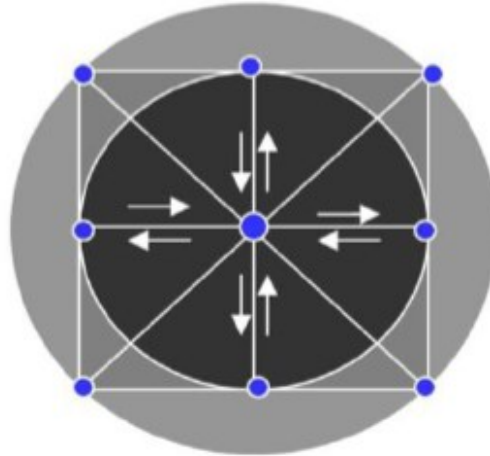


Figura 4.4 – Representação esquemática da restrição da propagação sonora em uma Malha de Guias de Ondas Digitais Quadrada. Fonte: Adaptado de BOAVENTURA (2014) por NISHIDA P. P. R. (2022).

Conforme descrito por Nishida (2022) e que pode ser visto da Figura 4.4, a propagação da onda, representada pela cor cinza mescla, ocorre de forma circular, com a origem do movimento num determinado nó. Desta forma, as juntas posicionadas na borda do círculo, em direções diagonais com relação ao nó central, só serão atingidas após cerca de duas vezes o tempo que levaria para alcançar àquelas juntas posicionadas ortogonalmente (em azul marinho).

Uma alternativa para diminuir o erro de dispersão que pode ocorrer nesse trabalho é a utilização de malhas do tipo triangular, para o sistema em 2D, ou tetraédrica para comportar a tridimensionalidade (VAN DUYNE; SMITH, 1995). Entretanto, essa forma de representação é impraticável numa simulação numérica que utiliza matrizes de dados para o armazenamento de informação.

Outra possibilidade seria realizar a interpolação da malha cúbica. Essa estratégia busca uniformizar a velocidade de atualização da pressão sonora para todos os nós, inserindo um número arbitrário de juntas conectadas à junta central (SAVIOJA; VÄLIMÄKI, 1997). O objetivo seria reduzir o erro de dispersão, sem aumentar o custo computacional, ou aumentar o refinamento da malha. Entretanto, essa abordagem resulta em uma maior complexidade do sistema a um nível que não foi proposto inicialmente para esse projeto.

Após a especificação dos parâmetros e da metodologia para calcular a pressão sonora que se propaga na sala, é necessário definir os sistemas que serão analisados neste trabalho, tema que será abordado no Capítulo V.

CAPÍTULO V – METODOLOGIA

O Capítulo V aborda o processo de simulação da propagação sonora, desde a definição dos parâmetros do modelo até a extração dos tempos de reverberação. São discutidas a escolha do sistema de coordenadas, a discretização da malha, as simplificações adotadas e a influência dessas decisões na estrutura computacional.

5.1. Configuração do sistema de análise

Para garantir a coerência dos dados e a precisão dos resultados, a simulação foi estruturada com base em um conjunto de parâmetros fundamentais. Entre eles, destacam-se a definição do sistema de coordenadas, a modelagem geométrica dos ambientes e a parametrização dos elementos estruturais. Além disso, simplificações foram aplicadas para otimizar o processamento e viabilizar as análises.

Nos próximos tópicos, serão detalhadas as escolhas adotadas para cada um desses aspectos, incluindo a organização espacial dos dados, a padronização das dimensões da sala e a forma como portas, janelas e superfícies foram consideradas na simulação.

5.1.1. Sistema de coordenadas

O sistema cartesiano X-Y-Z foi adotado como sistema de coordenadas para representar os dados de maneira coerente. Essa decisão foi tomada com o objeto de organizar o preenchimento das matrizes de dados na linguagem Python. Considerando o modelo padrão de uma sala com quatro paredes, chão e teto, o resultado da escolha do sistema cartesiano adotado é ilustrado na Figura 5.1.

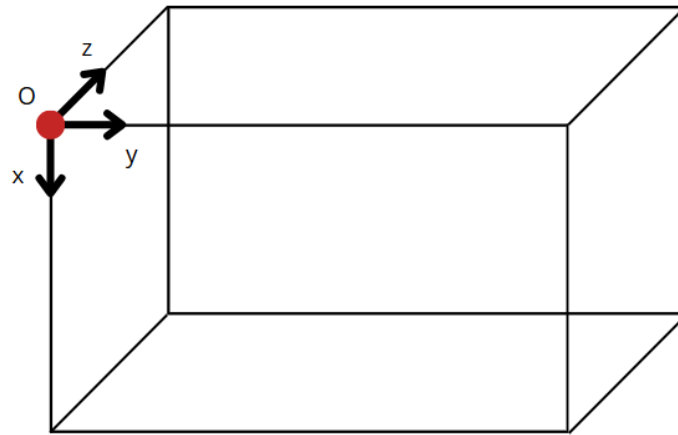


Figura 5.1 - Sistema de coordenadas adotado. Fonte: do autor (2025).

A Figura 5.1 apresenta o sistema de coordenadas escolhido, com os planos X, Y e Z perpendiculares entre si. Por meio desta imagem também, é possível ver que a origem do sistema cartesiano está localizada no canto superior esquerdo da sala, mais próximo à tela. Inicialmente, adota-se um sistema de coordenadas cartesiano com a orientação dos eixos definida da seguinte forma: o eixo Y orientado positivamente para a direita, o eixo X no sentido vertical descendente, e o eixo Z cresce no sentido perpendicular ao plano da tela, dirigindo-se contrário ao observador. Desta forma, o volume será representado por uma malha tridimensional que preencherá a sala, progredindo paralelamente à seção transversal do chão do ambiente, conforme apresentado pela Figura 5.2.

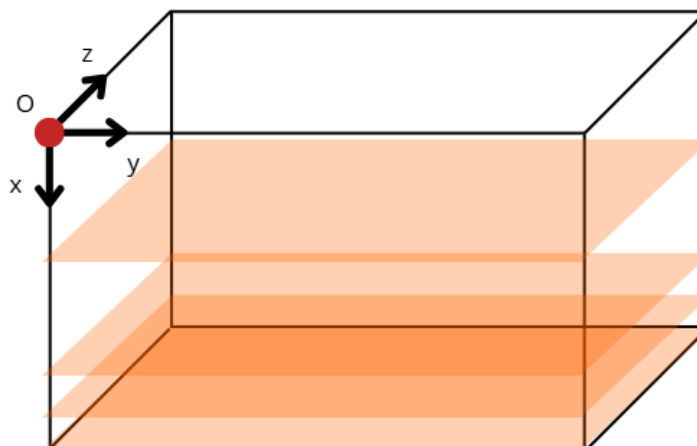


Figura 5.2 - Preenchimento da matriz de dados. Fonte: do autor (2025).

Todavia, essas são apenas as primeiras definições desse sistema. A seguir, as nomenclaturas referentes à geometria do modelo serão apresentadas.

5.1.2. Geometria dos modelos

Alguns termos geométricos utilizados neste trabalho foram associados diretamente aos eixos do sistema de coordenadas definido anteriormente. Assim, o comprimento está relacionado ao eixo Y, a largura ao eixo Z e a altura ao eixo X. Essa padronização visou facilitar a interpretação das dimensões envolvidas nas simulações acústicas dos ambientes modelados.

Quando se analisa a orientação do sistema cartesiano adotado, é possível perceber que os sentidos dos eixos foram rotacionados em relação à representação convencional. Após essas modificações, observa-se que o sistema de coordenadas utilizado neste projeto é levogiro.

A Figura 5.3 ilustra a padronização dos termos “comprimento”, “largura” e “altura” e como eles se relacionam com o sistema de coordenadas adotado.

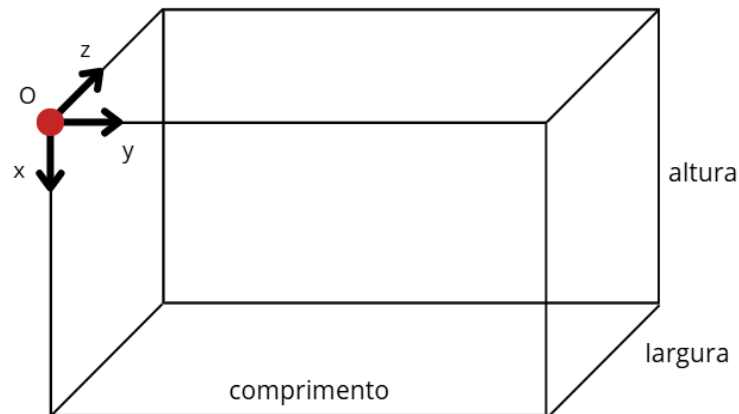


Figura 5.3 - Conceitos geométricos do sistema de coordenadas adotado. Fonte: do autor (2025).

Essa padronização é essencial para garantir a correta interpretação dos resultados da simulação e a compatibilidade com os modelos matemáticos adotados. A partir dessa estrutura, é possível associar as grandezas geométricas às propriedades acústicas do ambiente, permitindo uma análise mais precisa da propagação sonora no espaço modelado.

Com o sistema de coordenadas e identificação de grandezas bem definidas, o próximo passo tratou da disposição de elementos estruturais nos contornos dos ambientes simulados. A inclusão de portas e janelas, bem como a possibilidade de configurar individualmente os coeficientes de absorção sonora das superfícies, permite maior realismo na modelagem.

5.1.3. Identificação dos elementos do modelo

Seguindo com a personalização da análise, o sistema de simulação permite ao usuário configurar individualmente as propriedades de absorção sonora das superfícies da sala. A Figura 5.4 apresenta a identificação das faces das salas simuladas e sua relação com o sistema de coordenadas adotado.

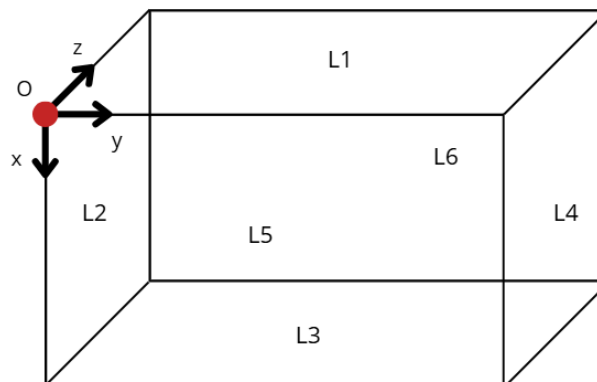


Figura 5.4 - Identificação das superfícies aplicada ao sistema cartesiano adotado. Fonte: do autor (2025).

Conforme indicado na Figura 5.2, as superfícies de uma sala de quatro paredes, chão e teto são identificadas da seguinte forma:

- L1: superfície referente ao teto da sala simulada;
- L2: superfície referente a parede esquerda da sala simulada;
- L3: superfície referente ao chão da sala simulada;

- L4: superfície referente a parede direita da sala simulada;
- L5: superfície referente a parede da frente da sala simulada;
- L6: superfície referente a parede do fundo da sala simulada.

Continuando o processo de parametrização dos ambientes da simulação, a próxima escolha a ser tomada é com relação a quais elementos estruturais de uma sala serão incluídos na análise. Em termos práticos, uma sala sempre possui pelo menos uma porta, podendo ou não conter janelas. Assim, a simulação foi estruturada para incluir os seguintes elementos construtivos:

- 1 porta centralizada em uma das paredes da sala;
- 1 janela centralizada em uma das paredes da sala, sendo essa área diferente daquela que contém uma porta.

No script responsável por executar a simulação, um conjunto de variáveis identificam qual das quatro paredes da sala contém a porta e a janela que podem ser incluídas na análise. Vale ressaltar que a depender das dimensões da sala e da presença de portas e janelas, os cálculos computacionais podem ficar extensos. A frequência do sinal e o aumento da discretização também impactam a simulação, exigindo maior capacidade de processamento e aumentando o tempo total de análise.

Para facilitar a compreensão da simulação, define-se um parâmetro auxiliar K , que representa o número de divisões do comprimento de onda empregadas para determinar o tamanho da guia de propagação sonora. Nesse projeto, K será utilizado tanto para o refinamento da malha quanto para a identificação das etapas de coleta de dados.

A Equação 5.1 descreve como o espectro de um sinal influencia na discretização do modelo, relacionando-se com o comprimento da guia de onda digital (d_s).

$$d_s = c \cdot \frac{\sqrt{3}}{K \cdot f_a} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

onde:

- d_s é o comprimento da guia de onda, em metros;
- K é o número de divisões do comprimento de onda, adimensional;
- f_a é a frequência do sinal, em Hz.

De acordo com a Equação 5.1, o comprimento da guia de onda (d_s) é inversamente proporcional ao produto entre a frequência de amostragem (f_a) e o número de divisões do comprimento de onda (K). Assim, ao manter um desses parâmetros constante, o aumento do outro reduz o valor de d_s . Tanto a elevação da frequência de amostragem quanto o aumento de K resultam em uma malha mais refinada e, conseqüentemente, em uma simulação mais detalhada.

Por último, buscando simplificar matematicamente o sistema de simulação, a absorção sonora do ar, assim como a de materiais, equipamentos, mobília e pessoas no interior da sala, foram desconsiderados. Assim, apenas as perdas de energia provenientes da absorção sonora das superfícies da sala serão analisadas.

Com a definição do sistema de coordenadas e identificação inicial da geometria, avançou-se para a etapa de aquisição dos dados de pressão sonora, detalhada no item 5.2. Essa fase viabilizou a comparação dos tempos de reverberação obtidos a partir de diferentes modelos teóricos.

5.1.4. Salas simuladas

Na etapa de desenvolvimento que precede as simulações, três salas foram escolhidas para serem representadas. Dois dos ambientes pertencem à empresa V4 Company – Domingues & CO e foram incluídos na simulação com o aval da gerência. O terceiro ambiente foi inspirado em um exemplo de Bistafa (2018). Para facilitar a identificação, as salas foram denominadas de A até C. Esse tópico apresenta como foi feita a parametrização destes ambientes para então prosseguir com a simulação.

5.1.4.1. Sala A

Em ambientes de trabalho que envolvem atendimento ao público, o controle do ruído é um fator essencial. Para minimizar interferências sonoras e melhorar a inteligibilidade da fala, é comum a adoção de salas com isolamento acústico. Essas estruturas possibilitam a realização de reuniões sem interrupções, além de evitar que os usuários se distraiam com sons externos.

A primeira sala proposta para simulação é baseada em uma cabine de ligações da empresa V4 Company - Domingues & Co. Esse espaço reservado para ligações, com dimensões de 1,92 x 1,22 metros e 2,33 metros de altura, comporta uma mesa e uma pessoa para reuniões curtas sem interferência externa. O ambiente é constituído por uma parede em vidro temperado 60 mm, com uma porta de mesmo material e altura, e três paredes revestidas por difusores acústicos. Nas figuras 5.5 e 5.6, verificam-se imagens da sala e servem para familiarização com o ambiente.



Figura 5.5 - Cabine de ligações V4 Company - Domingues & CO (Entrada). Fonte: do autor (2025).



Figura 5.6 - Cabine de ligações V4 Company - Domingues & CO (Mesa de apoio). Fonte: do autor (2025).

O teto da sala é feito de forro de gesso e o chão de cimento liso, enquanto o material isolante é do tipo Alpha, com densidade 60 kg/m^3 e 60 mm de espessura, assim como mostra a Figura 5.7.



Figura 5.7 - Espumas de isolamento acústico da cabine de ligações V4 Company - Domingues & CO. Fonte: do autor (2025).

A Figura 5.8 representa esquematicamente a Sala A, seguindo as características da cabine de ligações da V4 Company - Domingues & CO, apresentadas pelas figuras 5.5, 5.6 e 5.7. Já a Figura 5.9 mostra como a estrutura desse espaço se relaciona com o sistema de coordenadas e a identificação de superfícies adotadas.

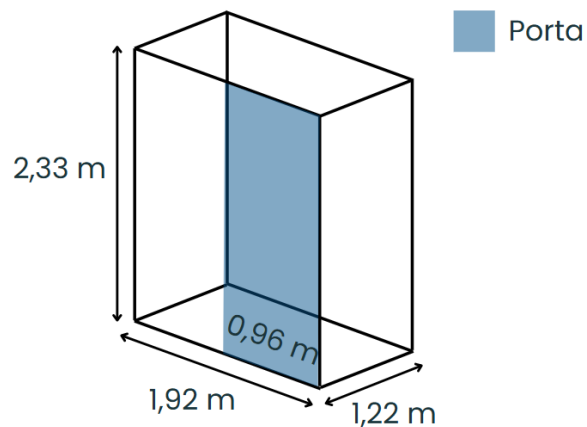


Figura 5.8 - Representação esquemática da Sala A. Fonte: do autor (2025).

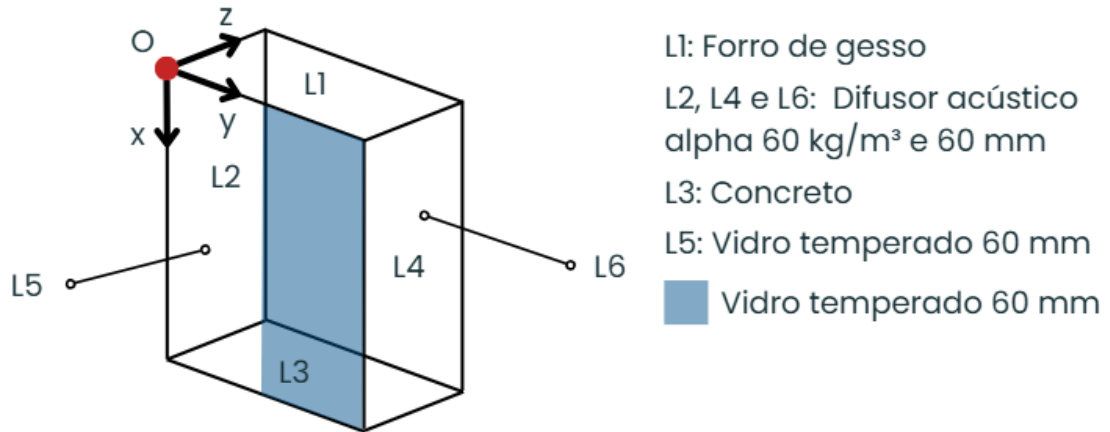


Figura 5.9 - Identificação das superfícies da Sala A. Fonte: do autor (2025).

Segundo Figura 5.9 é possível ver que as paredes L2, L6 e L4 devem ser simuladas com as especificações do difusor acústico. O coeficiente de absorção utilizado para a simulação deste material foi aquele apresentado por GONÇALVES (2008). A superfície de nome L1 é construída em forro de gesso e L3 em concreto.

Para fins práticos, não haverá diferenças estruturais entre os nós da superfície da parede de vidro temperado e a porta, pois ambas são feitas no mesmo material (parede L5, em vidro temperado 60 mm).

A Tabela 5.1 reúne os valores de coeficiente de absorção sonora dos materiais que compõem a Sala A, para as bandas de oitava que serão simuladas.

Tabela 5.1 - Coeficiente de absorção sonora da Sala A. Fonte: Adaptado de BISTAFA, S. (2018). “Acústica aplicada ao controle de ruído”. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.; e GONÇALVES, A. S. (2008).

Material	250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz
Difusor acústico alpha 60 kg/m ³ e espessura 60 mm	0,58	1,00	1,00	0,93
Concreto com cimentado liso desempenado	0,01	0,01	0,02	0,02
Vidro fixo, temperado ou laminado com grande superfície	0,06	0,04	0,03	0,02
Forro de gesso acartonado com ou sem preenchimento	0,08	0,05	0,03	0,03

5.1.4.2. Sala B

Outra sala da empresa V4 Company - Domingues & Co também serviu de inspiração para a simulação: a chamada “Sala Amarela”. Esse espaço é destinado a reuniões de até sete pessoas e suas dimensões são de 3,28 x 3,39 m e altura de 2,41 m. Duas das quatro paredes e teto são feitos de forro de gesso, uma outra parede é de vidro temperado de 60 mm e a parede restante é formada por uma chapa de aço carbono de 0,8 mm. As figuras 5.10, 5.11 e 5.12 são imagens do espaço.



Figura 5.10 - Sala Amarela V4 Company - Domingues & Co (Entrada). Fonte: do autor (2025).



Figura 5.11 - Sala Amarela V4 Company - Domingues & Co (Lateral). Fonte: do autor (2025).



Figura 5.12 - Sala Amarela V4 Company - Domingues & Co (Interior). Fonte: do autor (2025).

Uma porta de 2,20 m de altura por 0,78 m de largura está localizada sobre uma das superfícies de gesso e a sala ainda conta com três janelas de vidro temperado de 1,38 m de altura, na parede feita em chapa de aço carbono. Essas estruturas de ventilação ocupam toda a largura de uma das paredes da sala, por isso, podem ser representadas por uma simplificação numérica, onde só será considerada uma janela com largura equivalente à soma destes três elementos estruturais. O piso é em vinil, material derivado do Paviflex.

A Figura 5.13 representa esquematicamente a Sala B, seguindo as características da Sala Amarela da V4 Company - Domingues & CO apresentadas pelas figuras 6.7, 6.8 e 6.9. Já a Figura 5.14 identifica as superfícies deste ambiente e o relaciona com o sistema de coordenadas adotado.

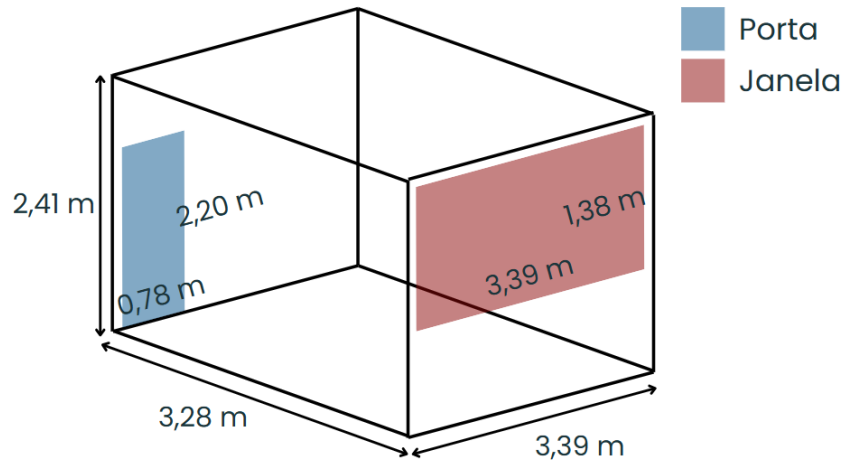


Figura 5.13 - Representação esquemática da Sala B. Fonte: do autor (2025).

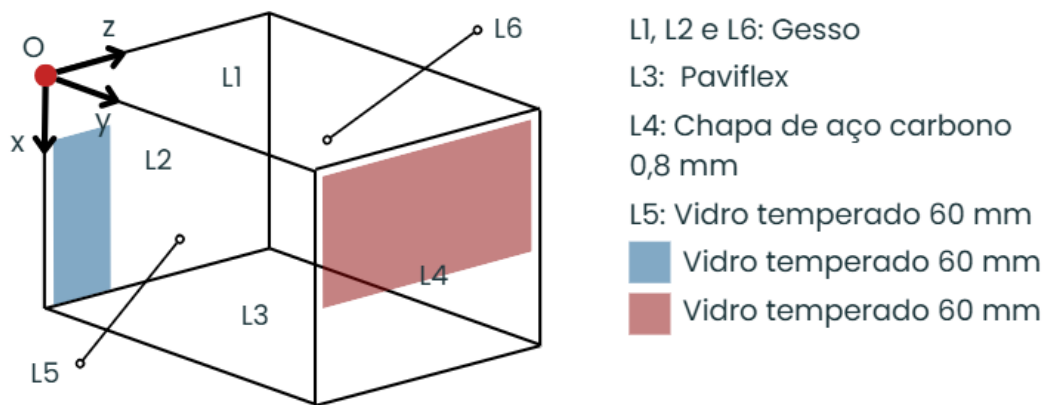


Figura 5.14 - Identificação de superfícies da Sala B. Fonte: do autor (2025).

De acordo com a Figura 5.14, as paredes L1 e L6 e L4 devem ser simuladas com as características acústicas do gesso, L3 com os dados do piso vinílico e superfície de nome L4 com as informações da chapa de aço carbono. Parede L5, porta e janela são construídas em vidro temperado 60 mm.

A Tabela 5.2 resume os valores de coeficiente de absorção sonora dos materiais que compõem a Sala Amarelas, para 250, 500, 1.000 e 2.000 Hz.

Tabela 5.2: Coeficiente de absorção sonora de materiais da Sala B. Fonte: Adaptado de BISTAFA, S. (2018). “Acústica aplicada ao controle do ruído”. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.; e SOARES, F. S. *et al.* (2018).

Material	250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz
Chapa de aço carbono 0,8 mm	0,01	0,01	0,01	0,02
Forro de gesso acartonado com ou sem preenchimento	0,08	0,05	0,03	0,03
Paviflex	0,03	0,05	0,03	0,03
Vidro fixo, temperado ou laminado com grande superfície	0,06	0,04	0,03	0,02

5.1.4.3. Sala C

O livro “Acústica aplicada ao controle de ruído” de Sylvio Bistafa (2018) foi a principal referência bibliográfica para a construção desta pesquisa. Para além de conteúdo teórico, esta literatura apresenta muitos exercícios resolvidos que ensinam leitores a como realizar os cálculos práticos de muitos conceitos e medições da engenharia acústica. O exemplo resolvido 10.2 do BISTAFA (2018, p. 261) foi escolhido para a simulação da terceira sala.

Trata-se de uma sala retangular para seminários, com 7,0 x 7,0 metros de largura e comprimento, e pé-direito de 2,8 metros. O piso é revestido com carpete do tipo forração simples, enquanto o teto possui revestimento de Sonex - Illbruck (20 mm de espessura e densidade de 32 kg/m³). As paredes são de alvenaria, revestidas com gesso desempenado e pintadas. Esse ambiente conta com uma porta de madeira de 2,1 x 0,9 metros.

As figuras 5.15 e 5.16 mostram, de forma respectiva, a representação esquemática referente ao ambiente apresentado pelo exemplo 10.2 do livro do Bistafa (2018, p. 261), e sua identificação de superfícies e do sistema de cartesiano proposto (adaptação para a Sala C).

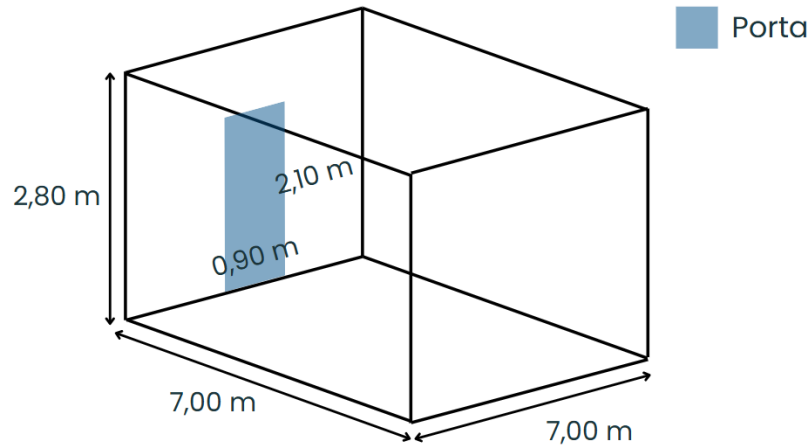


Figura 5.15 - Representação esquemática da Sala C. Fonte: do autor (2025).

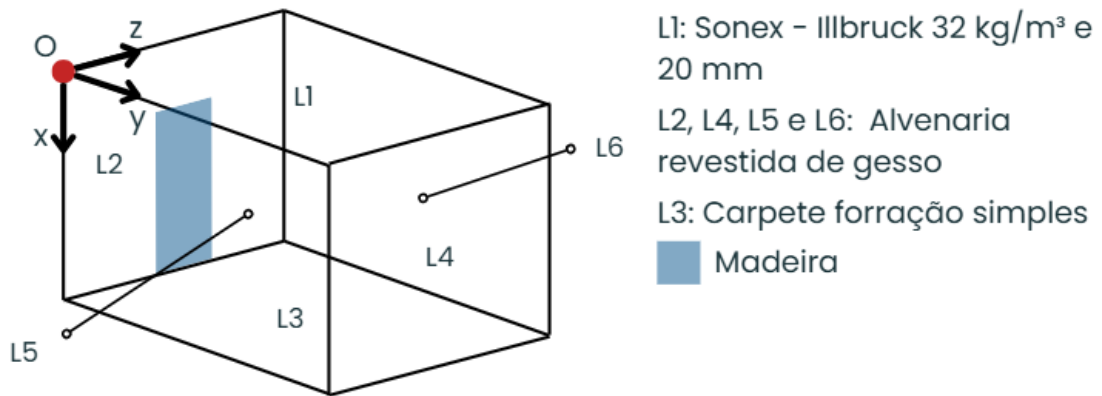


Figura 5.16 - Identificação de superfícies da Sala C. Fonte: do autor (2025).

Conforme a Figura 5.16, as paredes L2 e L6, L4 e L3 são de alvenaria revestida, L1 possui as propriedades do Sonex e L3 com as informações do carpete. Apesar de possuir uma distribuição mais homogênea das características de absorção sonora, quando comparado às outras salas simuladas, o terceiro modelo representa um ambiente muito maior. Por isso, a simulação da sala C possui o desafio computacional da representação de grandes espaços e não o da capacidade de personalização do recinto.

Seguindo o mesmo objetivo das tabelas 5.1 e 5.2, a Tabela 5.3 faz a relação dos coeficientes de absorção sonora dos materiais relevantes para a simulação da sala C.

Tabela 5.3 - Coeficiente de absorção sonora da Sala C. Fonte: Adaptado de BISTAFA, S. (2018). “Acústica aplicada ao controle do ruído”. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.

Material	250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz
Sonex - Illbruck Espuma poliuretano 32 kg/m ³ e espessura de 20 mm	0,12	0,28	0,44	0,60
Reboco ou gesso desempenado sobre quaisquer alvenarias	0,02	0,03	0,04	0,04
Carpete tipo forração simples, colado sobre o contrapiso	0,05	0,10	0,20	0,30
Porta de madeira comum, pintada ou envernizada	0,19	0,14	0,08	0,13

Com a descrição e especificação das três salas simuladas prontas, o projeto deve partir para a fase da execução das simulações, coleta de dados e análise.

5.2. Sistema de aquisição da pressão sonora

Para garantir a precisão dos resultados, a simulação seguiu um conjunto estruturado de etapas, que incluem a definição das condições iniciais e de contorno, o posicionamento dos sensores de medição e a implementação do código responsável pelos cálculos. A escolha do Python como linguagem de programação se deve à sua flexibilidade e à vasta disponibilidade de bibliotecas especializadas, como o Matplotlib, utilizada para a visualização dos resultados.

A base do código utilizado nesta simulação foi desenvolvida previamente por Nishida (2022), e foi adaptada e expandida conforme as necessidades específicas deste projeto, exigindo o entendimento da lógica implementada e dos princípios físicos envolvidos. Essa abordagem permitiu aproveitar uma fundação sólida já validada, ao mesmo tempo em que demandou modificações e complementações para atender aos objetivos propostos nesta pesquisa.

As simulações foram realizadas em um sistema com Windows 10 (64 bits), processador Intel Core i7-7500U (2.70 GHz), 8 GB de RAM e GPU dedicada AMD Radeon R7 M340 (2 GB).

A seguir, são apresentados os detalhes da simulação, desde os aspectos computacionais até as configurações específicas adotadas para representar os ambientes analisados.

5.2.1. Simulação utilizando Python

O Python é uma linguagem de programação interpretada de alto nível, como assim é apresentado por Stross-Radschinski em PSF Python Brochure Vol. I final (2018). Isso significa que os comandos da linguagem possuem uma sintaxe próxima à linguagem natural, facilitando a compreensão, enquanto as instruções são executadas linha a linha. Um código em Python pode ser executado em qualquer sistema operacional, desde que um interpretador Python esteja instalado.

Um interpretador Python converte o código-fonte para linguagem de máquina, tornando-o executável pelo sistema. Sistemas operacionais Linux e macOS geralmente incluem o interpretador Python por padrão. Já no Windows, a instalação deve ser feita manualmente, acessando o site oficial do Python e seguindo as instruções disponíveis.

O Python pode seguir, por exemplo, um paradigma de programação chamado Programação Orientada a Objetos (POO), que permite economia de código e organização por meio de conceitos como herança, polimorfismo, abstração e encapsulamento de informações. Outra vantagem da utilização dessa linguagem é a lista de bibliotecas e recursos que simplificam a escrita do código (AMOS, 2024).

Outro ponto positivo na utilização da linguagem Python para a simulação é a vasta comunidade. Com base de conhecimento disponível bastante ampla, com uma comunidade ativa e uma extensa documentação acessível em várias línguas, o uso dessa linguagem funcional facilita a resolução de problemas, enquanto proporciona o aprendizado contínuo.

O uso de bibliotecas, não somente em linguagem Python, amplia as funcionalidades das aplicações. Por exemplo, a biblioteca Flask é utilizada para desenvolvimento *web*, enquanto a Pandas é amplamente usada em análise e ciência de dados. Outra biblioteca muito popular é a Matplotlib.

O Matplotlib é uma biblioteca Python com a finalidade de criar visualizações estáticas, gráficas e interativas. Com ampla usabilidade, ela oferece recursos que permitem desenvolver

diferentes tipos de gráficos, configurar eixos, títulos, estilos de marcadores, entre outras funcionalidades (MATPLOTLIB DEVELOPMENT TEAM, 2022).

Para o desenvolvimento deste trabalho, a integração entre Python e Matplotlib possibilitou a criação de simulações com código simples, organizado e legível, além de ter gerado representações gráficas dos resultados de forma intuitiva.

5.2.2. Estratégia de excitação do modelo simulado

A norma ISO 3382-2:2008 descreve dois métodos para medição do tempo de reverberação, cuja escolha depende do objetivo da análise. No primeiro, denominado método do ruído interrompido, uma fonte sonora é alimentada com um sinal elétrico de banda larga (ruído aleatório) até que o campo sonoro atinja o regime estacionário. Em seguida, a fonte é desligada e inicia-se a coleta de dados. Esse método também pode ser aplicado com sinais impulsivos de curta duração.

O segundo método, conhecido como resposta impulsiva integrada, também definido pela ISO 3382-2:2008, consiste na aplicação de sinais sonoros específicos logo antes do início da coleta. O sinal ideal, segundo a literatura é o delta de Dirac, que não é possível de ser gerado na prática. Desta forma, uma das recomendações é utilizar um varrimento sinusoidal e transformá-lo em um sinal impulso. Este procedimento foi adaptado para a simulação desenvolvida neste projeto, visando representar a excitação virtual do sistema.

Para isso, foi implementada uma estrutura no código que simula o corte no fornecimento de energia pela fonte sonora simulada após um tempo predeterminado. Esse tempo, denominado $t_{excitação\ impulso}$, foi calculado com base na frequência do sinal, conforme expressa a Equação 5.2:

$$t_{excitação\ impulso} = \frac{1}{2 \cdot f_a} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

onde:

- f_a é a frequência do sinal, em Hz.

A escolha da Equação 5.2 para cálculo do $t_{excitação\ impulto}$ foi realizada de modo a representar adequadamente o tempo de emissão do sinal senoidal da fonte sonora simulada. Segundo a ISO 3382-2:2008, para que a coleta de T_{20} por meio do método da resposta impulsiva integrada seja válida, é necessário que a fonte produza um nível de pressão sonora ao menos 35 dB acima do nível de ruído de fundo, considerando cada banda de frequência. Para a medição de T_{30} , esse valor é de 45 dB. O tempo de reverberação é obtido então por extrapolação numérica da curva de decaimento.

Em simulações computacionais, esses requisitos podem ser atendidos pela escolha de um sinal com amplitude suficiente para permitir um decaimento de 60 dB, necessário para a medição do tempo de reverberação. A Figura 5.17 ilustra um sinal impulso com amplitude constante de 1 Pa, mantido até que o tempo $t_{excitação\ impulto}$ seja atingido, considerando uma frequência central de 2.000 Hz e ausência de ruído de fundo.

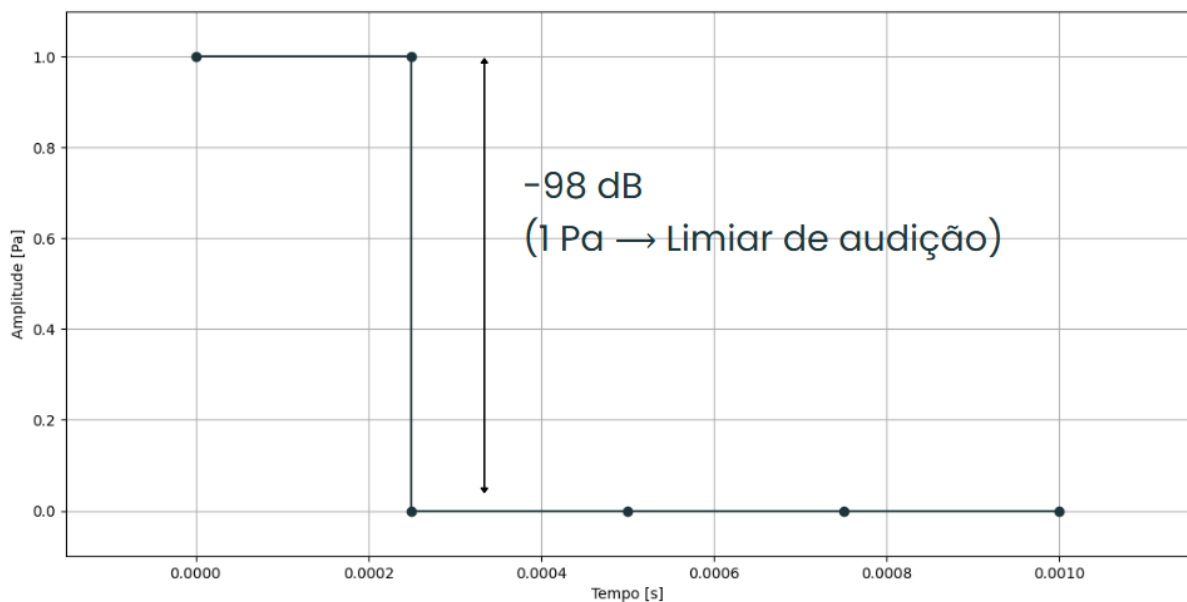


Figura 5.17 - Sinal impulso com amplitude constante de 1 Pa, frequência central de 2.000 Hz e ausência de ruído de fundo. Fonte: do autor (2025).

Observa-se que, partindo de 1 Pa, a curva de decaimento alcança uma redução maior que 60 dB em relação ao limiar de audição (2×10^{-6} Pa), sendo essa representação, portanto, adequada para a simulação do tempo de reverberação. Assim, o sinal senoidal originalmente considerado foi substituído por um impulso de amplitude de 1 Pa.

Com a metodologia de excitação virtual definida, foi possível avançar para a etapa de posicionamento dos sensores de medição. Essa definição é essencial para garantir que a coleta de dados ocorra de forma padronizada e em conformidade com as diretrizes normativas, permitindo a análise dos tempos de reverberação com base nos diferentes modelos teóricos.

5.2.3. Posicionamento dos sensores virtuais de medição

A ABNT NBR 10152:2017 também foi utilizada como base para posicionar a fonte sonora e os sensores de medição desta simulação. Segundo essa normatização, a seguinte consideração deveria ser seguida na medição de nível sonoros em ambientes internos e edifícios:

- a) O período total de amostragem do sistema deve ser maior que 30 segundos;
- b) A fonte sonora do sistema deve estar posicionada a pelo menos 1 (um) metro de distância de cada uma das paredes, teto e chão;
- c) Devem ser acrescentados um sistema de aquisição de dados para cada 30 m² de área do ambiente analisado;
- d) Quando o sistema de medição for composto por mais de um ponto de medição, estes devem estar distanciados entre si em pelo menos 0,7 metros, para que a medição de um sensor não influencie na aquisição de dados dos outros sensores do conjunto de aquisição.

O uso de um modelo computacional permitiu flexibilizar algumas diretrizes da ABNT NBR 10152:2017. A primeira diz respeito à escolha de um número fixo de pontos de medição. Para o desenvolvimento deste projeto, foram posicionados três sensores para aquisição de dados, para cada uma das três salas simuladas, ao invés de considerar a área total dos ambientes.

Por motivos de padronização do sistema de aquisição, a fonte sonora será posicionada a exatamente 0,7 metros de distância da origem do sistema cartesiano, em todas as direções, enquanto o posicionamento dos sensores segue as seguintes regras:

- Sensor 1: posicionado a 1 metro de distância da origem do sistema de coordenadas adotado, em todas as três direções;
- Sensor 2: posicionado a 1 metro de distância do ponto exatamente oposto à origem do sistema de coordenadas adotado, em todas as três direções;
- Sensor 3: posicionado a 0,7 metro de distância do ponto exatamente oposto à origem do sistema de coordenadas adotado, em todas as três direções;

A exigência de um tempo de coleta superior a 30 segundos proposta pela ABNT NBR 10152:2017 também foi adaptada neste trabalho, conforme o raciocínio apresentado no item 5.2.2. Segundo a ISO 3382-2:2008, a medição do T_{60} pelo método da resposta impulsiva integrada exige que o sinal inicial esteja suficientemente acima do nível de ruído de fundo. A simulação de um sinal impulso com amplitude de 1 Pa atende a essa condição, permitindo a análise adequada do decaimento sonoro em períodos inferiores a 30 segundos.

O requisito da distância mínima entre sensores, segundo ABNT NBR 10152:2017, também foi desconsiderado neste trabalho. Por se tratar de um sistema de aquisição simulado computacionalmente, não existe interferência física entre os sensores, como ocorre em medições reais. Cada ponto de coleta foi modelado de forma independente, o que permitiu uma maior flexibilidade no posicionamento dos sensores durante a simulação dos ambientes.

5.2.3.1. Posicionamento dos sensores virtuais de medição, Sala A

As figuras 5.18 e 5.19 apresentam, na forma bidimensional, o posicionamento dos sensores virtuais de medição e da fonte sonora simulada para a Sala A, segundo a geometria apresentada no item 5.1 e a metodologia descrita em 5.2.3.

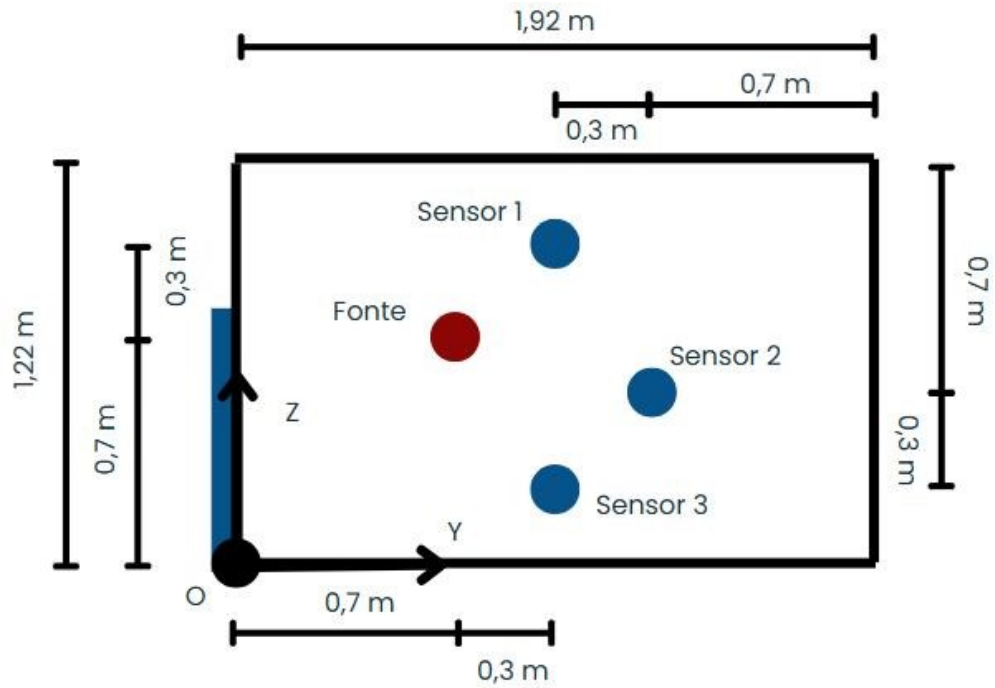


Figura 5.18 - Plano YZ, posicionamento de sensores e fonte simulados para a Sala A. Fonte: do autor (2025).

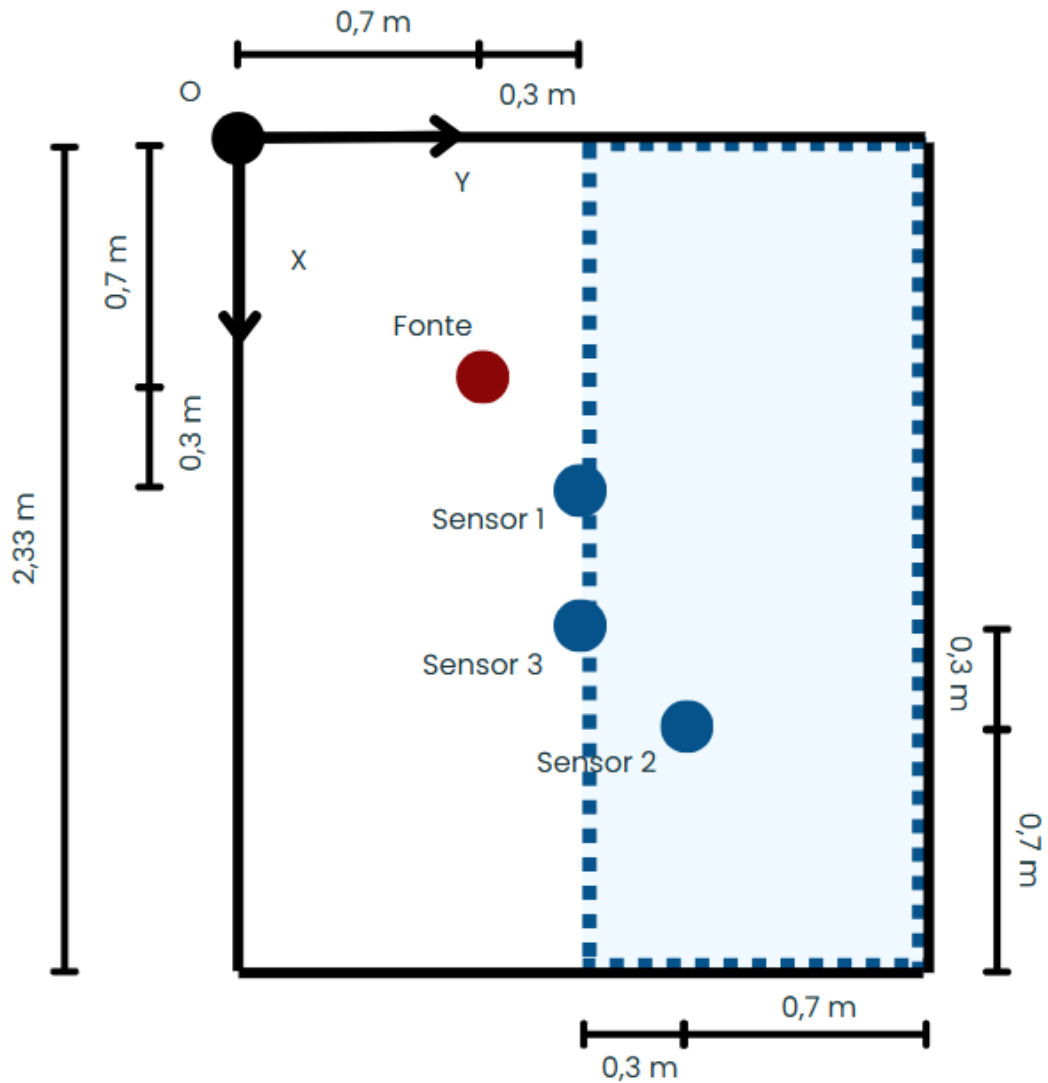


Figura 5.19 - Plano XY, posicionamento de sensores e fonte simulados para a Sala A. Fonte: do autor (2025).

5.2.3.2. Posicionamento dos sensores virtuais de medição, Sala B

As figuras 5.20 e 5.21 apresentam, na forma bidimensional, o posicionamento dos sensores virtuais de medição e da fonte sonora simulada para a Sala B, segundo a geometria apresentada no item 5.1 e a metodologia descrita em 5.2.3.

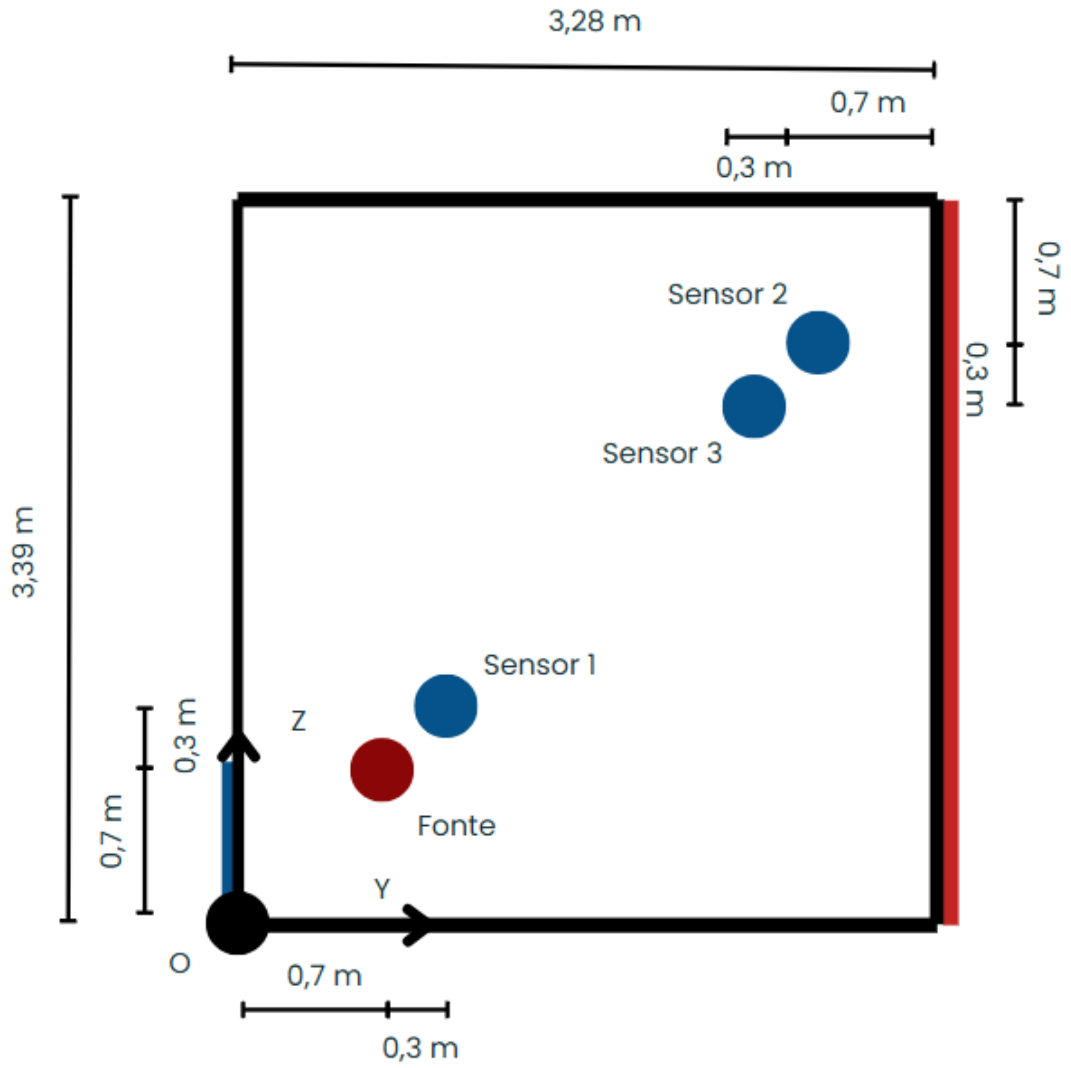


Figura 5.20 - Plano YZ, posicionamento de sensores e fonte simulados para a Sala B. Fonte: do autor (2025).

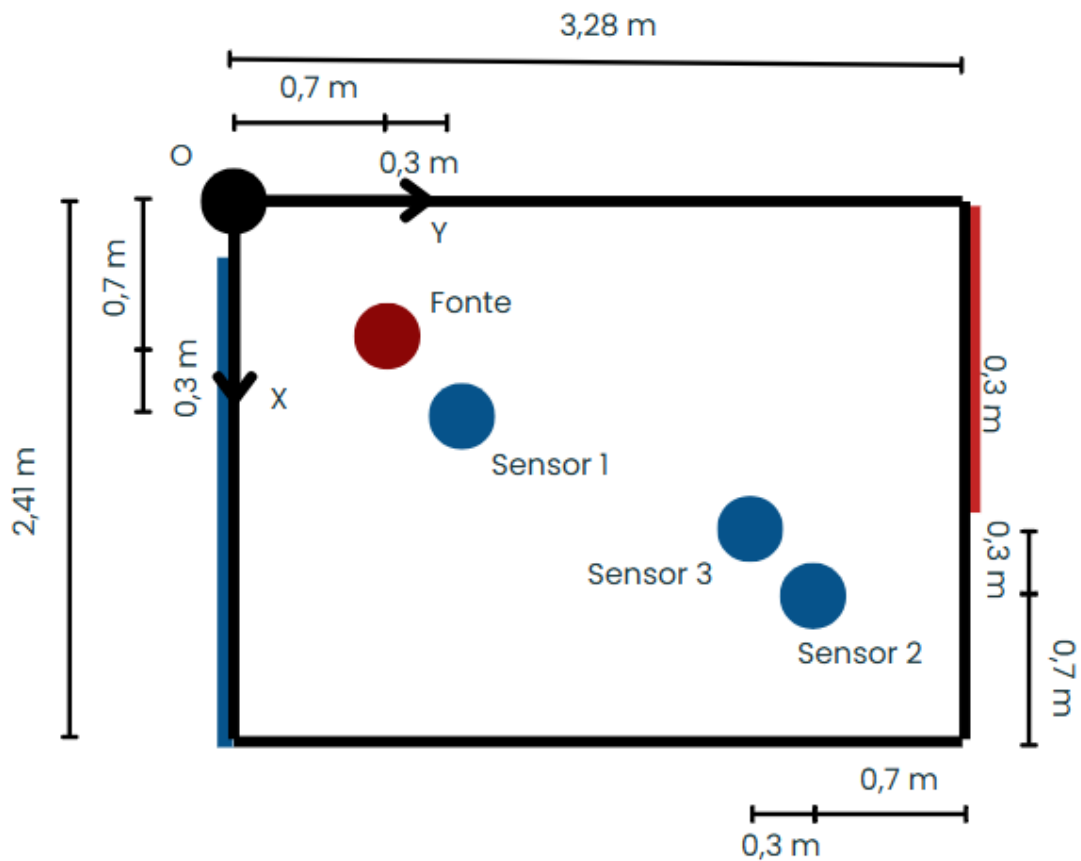


Figura 5.21 - Plano XY, posicionamento de sensores e fonte simulados para a Sala B. Fonte: do autor (2025).

5.2.3.3. Posicionamento dos sensores virtuais de medição, Sala C

As figuras 5.22 e 5.23 apresentam, na forma bidimensional, o posicionamento dos sensores virtuais de medição e da fonte sonora simulada para a Sala C, segundo a geometria apresentada no item 5.1 e a metodologia descrita em 5.2.3.

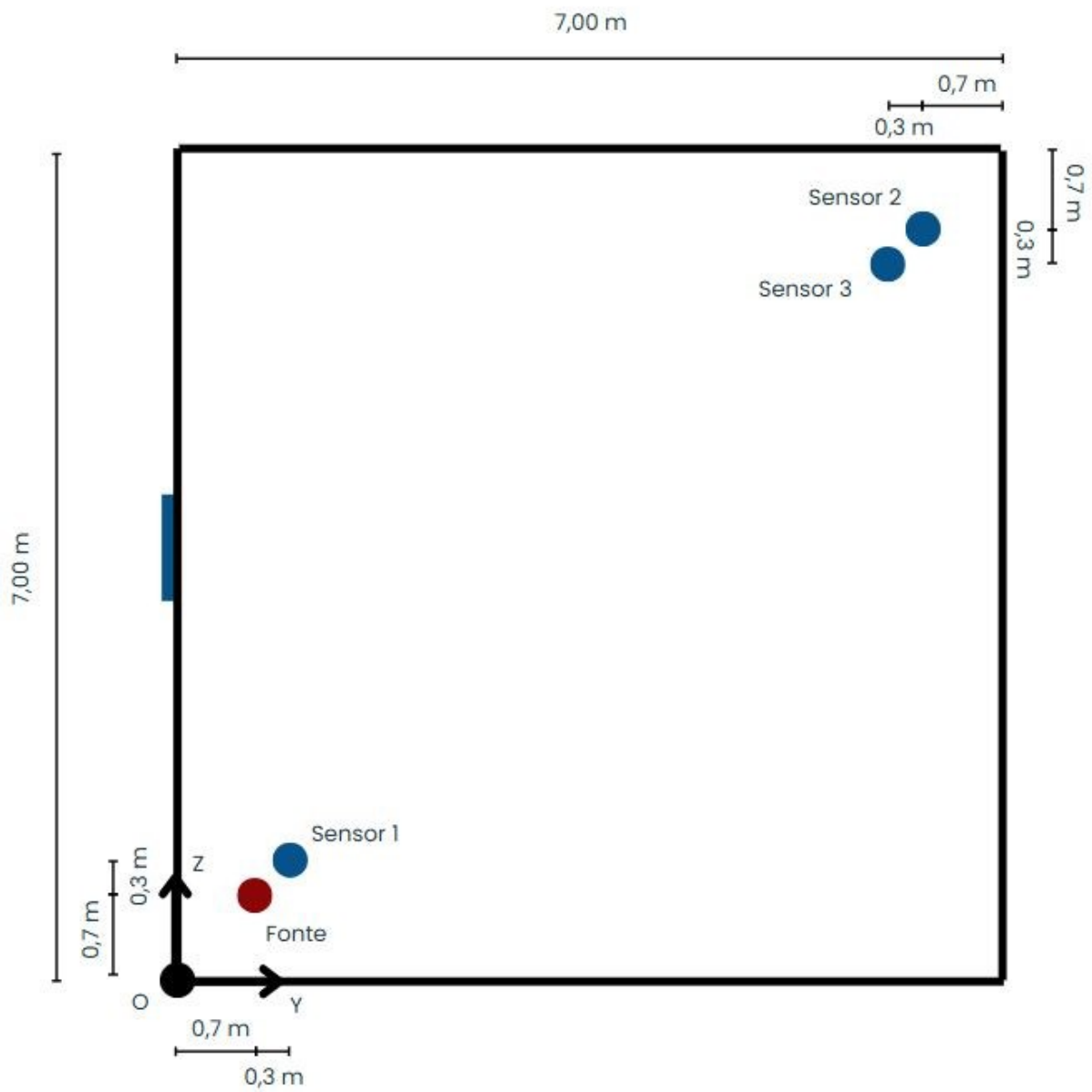


Figura 5.22 - Plano YZ, posicionamento de sensores e fonte simulados para a Sala C. Fonte: do autor (2025).

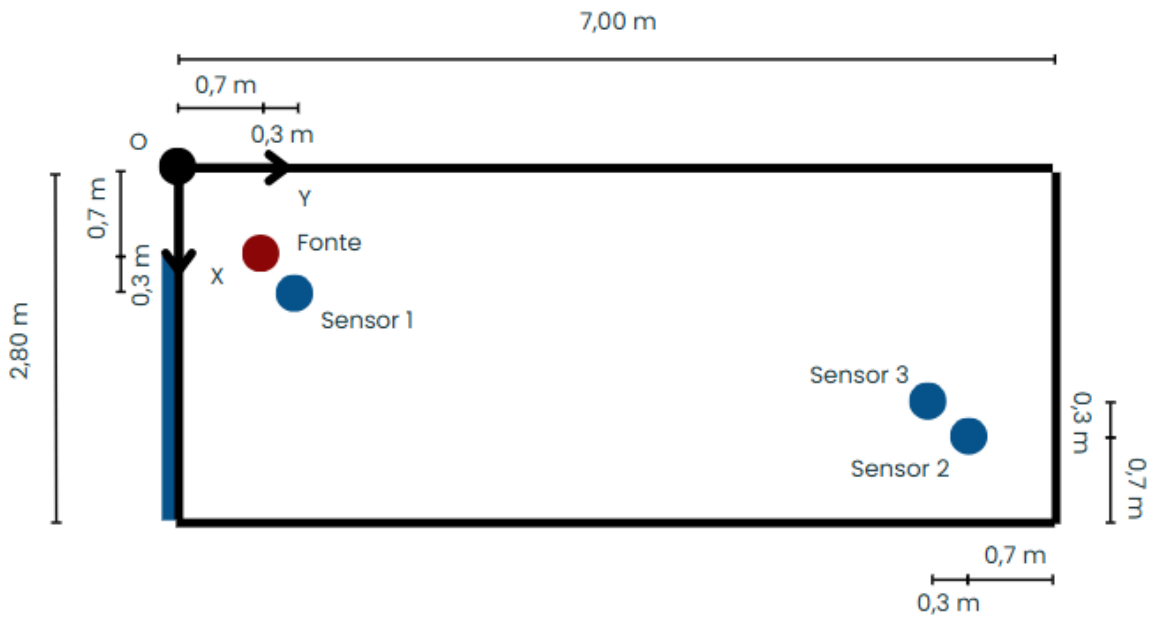


Figura 5.23 - Plano XY, posicionamento de sensores e fonte simulados para a Sala C. Fonte: do autor (2025).

Uma vez que vetores de informação dos sensores de pressão sonora e tempo foram coletados, foi possível simular o tempo de reverberação para cada sala e em todas as bandas de frequência idealizadas.

5.3. Etapas do *script* de simulação

O *script* de simulação desenvolvido opera por meio da avaliação individual de cada nó da malha simulada dentro de uma estrutura de repetição, que se mantém ativa até que o tempo máximo de execução seja atingido. A cada iteração, a quantidade de energia nas juntas das Guias de Ondas é atualizada conforme sua posição em relação à modelagem do sistema.

O código é estruturado em quatro etapas principais: definição dos parâmetros de simulação, atualização dos valores nas juntas internas das salas, atualização da pressão sonora nos nós das superfícies do ambiente e exportação dos dados para um arquivo .txt. Posteriormente, os dados de pressão sonora e tempo são processados para o cálculo do tempo de reverberação. O *script* completo utilizado na simulação está disponível no Anexo A.

5.3.1. Definição dos parâmetros da simulação

A primeira etapa do código consiste na definição das variáveis de simulação. Nesse momento, são estabelecidas as dimensões das salas, o posicionamento e identificação de portas e janelas, além da configuração do sinal medido, o número de divisões do comprimento de onda (K) e o tempo total de simulação.

Essa parte do código também é responsável por fazer a discretização da malha com base nas dimensões do recinto, que ocorre tanto para os nós internos da sala quanto para aqueles que representam as superfícies do ambiente. A discretização da posição da fonte sonora, sensores de medição e da porta e janela também foi realizada. Essa fase de desenvolvimento também contempla a definição das propriedades de absorção das superfícies simuladas.

Essas configurações iniciais tem como objetivo obter uma boa representação acústica dos ambientes simulados, proporcionando uma análise cada vez mais precisa da propagação sonora e do tempo de reverberação.

5.3.2. Obtenção da pressão sonora nas juntas internas

A segunda etapa do *script* de simulação é responsável pelo cálculo da pressão sonora nas juntas internas das salas modeladas. Antes de cada atualização, duas verificações são realizadas. A primeira consiste em determinar se o sistema ainda deve receber energia sonora virtual, conforme os critérios definidos na Equação 5.2.

A segunda verificação determina se o nó analisado pertence ao interior do ambiente ou a uma de suas superfícies. Para juntas internas, a atualização do nível de pressão sonora é realizada de acordo com a Equação 4.9, considerando o valor do próprio nó no instante anterior e de seus nós adjacentes. Esse processo ocorre de forma sequencial: após a atualização dos valores de pressão sonora em todos os nós de uma seção transversal paralela ao teto, a simulação avança para a próxima seção na fila de processamento, garantindo a propagação ordenada da energia sonora.

Se o nó pertence aos contornos da sala, o processo segue para a etapa de obtenção da pressão sonora nas juntas das bordas do ambiente.

5.3.3. Obtenção da pressão sonora nas juntas das paredes

O terceiro trecho de código do projeto é responsável por atualizar o nível de pressão sonora nas juntas das paredes do ambiente, segundo Equação 4.13. Essa etapa é crítica para a simulação, pois as superfícies podem conter elementos estruturais diferentes do material das paredes, como portas e janelas. Assim, antes da atualização do valor, é necessário determinar se o próximo nó da malha deve possuir as propriedades acústicas do material da parede ou os coeficientes de absorção sonora da porta ou janela.

Para essa distinção, uma estrutura de código separa os nós em duas categorias de atualização, levando a dois caminhos de simulação:

- Categoria I – Atualização da pressão sonora em superfícies sem a presença de portas ou janelas;
- Categoria II – Atualização da pressão sonora em superfícies com a presença de portas ou janelas.

Na Categoria I, a atualização da pressão sonora das juntas das paredes considera exclusivamente o coeficiente de absorção do material que compõe a superfície interna do ambiente.

Já na Categoria II, antes de atualizar o valor da pressão sonora, uma estrutura de código verifica se o nó corresponde a uma parede comum ou se devem ser utilizadas as propriedades acústicas de uma porta ou janela. Esse processo é viabilizado pela discretização da sala, que associa as dimensões do ambiente simulado ao posicionamento desses elementos no modelo. Assim, o coeficiente de absorção apropriado é atribuído à junta correspondente.

O sistema de avaliação e atualização das juntas das paredes das salas, conforme as categorias I e II, é representado na forma de fluxograma na Figura 5.24.

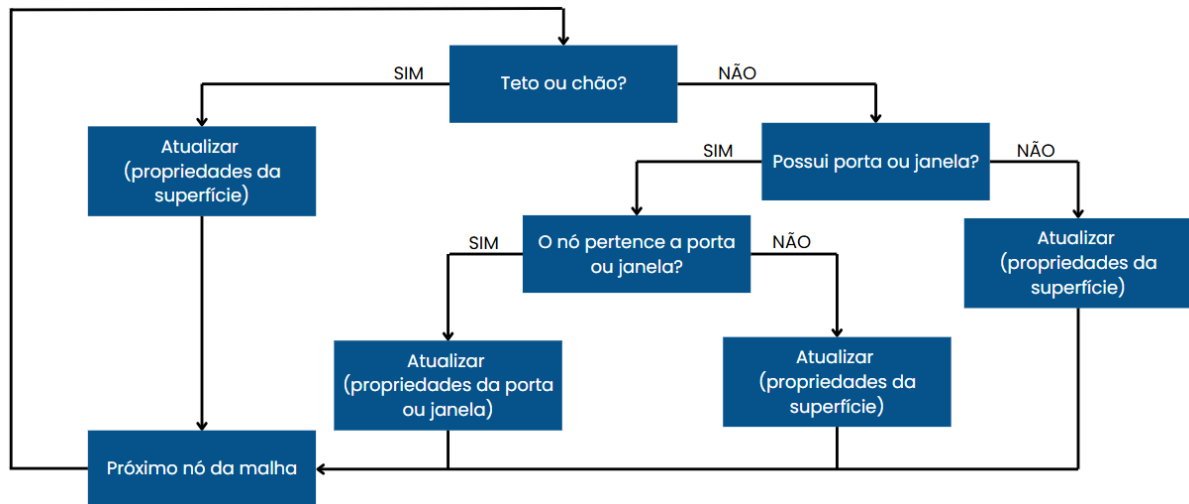


Figura 5.24 - Fluxograma atualização da pressão sonora para as juntas do contorno. Fonte: do autor (2025).

Com os níveis de pressão sonora devidamente calculados e atualizados para cada nó da simulação, o próximo passo é garantir que essas informações sejam armazenadas e organizadas de forma estruturada. Para isso, um mecanismo de exportação de dados foi implementado, permitindo que os resultados obtidos possam ser utilizados em análises posteriores.

5.3.4. Exportação dos dados

É comum que linguagens de programação possuam comandos internos para operações fundamentais, como manipulação de dados, controle de fluxo e interações com o sistema. No Python, uma dessas estruturas essenciais é a criação, leitura e armazenamento de arquivos. Neste projeto, utilizou-se uma abordagem que permite salvar localmente arquivos com a extensão .txt, armazenando os dados de tempo e pressão sonora capturados por cada sensor virtual de medição durante a simulação.

O arquivo gerado contém quatro informação por linha: o vetor dos instantes de tempo e a pressão sonora nos sensores 1, 2 e 3, respectivamente. Para organização e rastreabilidade, os arquivos foram nomeados dinamicamente conforme as especificações das salas analisadas e os parâmetros de simulação, sendo armazenados no mesmo diretório do *script*. Por exemplo, o

arquivo "salaB_3e3x3e4x4e2_2000Hz_a_K16.txt" contém os dados da sala de nome "B", considerando um sinal de 2.000 Hz e $K = 16$.

Após a simulação, os arquivos .txt gerados passaram por exportação e processamento por uma estrutura de código externa, desenvolvida em outro projeto, com o objetivo de calcular o tempo de reverberação.

5.3.5. Cálculo do tempo de reverberação simulado

Após a coleta dos dados de pressão sonora e tempo nos pontos de medição de cada ambiente, as informações foram armazenadas em arquivos .txt para cálculo externo do tempo de reverberação.

O *script* para cálculo do tempo de reverberação pertence ao LAV - UFU. O sistema desenvolvido em MATLAB, utiliza como entrada os dados exportados no final de etapa da simulação e calcula o tempo de reverberação. A estrutura de código desenvolvida pelo laboratório ainda é capaz de representar graficamente a curva de decaimento sonoro de um sistema e armazena o tempo de reverberação obtido na forma de tabelas. Os dados de T_{60} simulados foram então comparados com os resultados calculados segundo item 3.4 deste trabalho.

5.4. Comparação entre tempo de reverberação simulado e o calculado

A validação do projeto ocorreu pela comparação entre os dados de tempo de reverberação calculados, conforme descrito no item 3.4 deste arquivo, e o tempo de reverberação simulado obtido conforme item 5.3.5. Como a aquisição de dados será feita em três pontos diferentes de cada ambiente, foi preciso estruturar como chegar no valor final para o T_{60} simulado.

5.4.1. Obtenção do T_{60} simulado

A coleta de dados foi realizada em três pontos distintos de cada sala simulada, conforme ilustrado das Figuras 5.18 a 5.23. O tempo de reverberação médio simulado para cada ambiente ($\overline{T_{60}}$) é determinado pela média aritmética dos valores de T_{60} obtidos nos três sensores, conforme a Equação 5.3.

$$\overline{T_{60}} = \frac{T_{60}(\text{Sensor 1}) + T_{60}(\text{Sensor 2}) + T_{60}(\text{Sensor 3})}{3} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Após a obtenção do T_{60} , os dados serão submetidos a uma análise de convergência, considerando como referência os tempos de reverberação calculados pelos modelos de Sabine, Eyring-Norris e Millington-Sette.

5.4.2. Análise de convergência do T_{60}

Para se avaliar a convergência dos resultados obtidos em simulação foi calculada a diferença percentual entre o T_{60} obtido numericamente e os valores calculados pelos métodos de Sabine, Eyring-Norris e Millington-Sette. A Equação 5.4 define como calcular essa variação.

$$\text{Variação \% de } \overline{T_{60}} = \frac{\overline{T_{60}} - T_{60}(\text{Analítico})}{T_{60}(\text{Analítico})} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Para que os resultados sejam considerados concordantes, a variação percentual obtida pela Equação 5.4 entre os dois valores citados deve ser inferior a 5%. Além disso, o sucesso da simulação também pode ser avaliado pela tendência de diminuição do erro com o aumento da discretização da malha. Dessa forma, serão analisadas as diferenças relativas entre os valores

analíticos e numéricos para K igual a 16, 32 e 64, a fim de verificar a redução do erro e a estabilidade dos resultados.

CAPÍTULO VI – RESULTADOS

Este capítulo possui como objetivo principal, apresentar os resultados obtidos a partir das simulações das salas A, B e C. Além disso, foi desenvolvida uma análise de convergência, pela variação de K , entre os valores simulados e calculados pelas fórmulas de Sabine, Eyring-Norris e Millington-Sette.

6.1. Tempo de reverberação calculado

Para garantir que o tempo de simulação fosse suficiente para a análise do tempo de reverberação em cada sala, os valores foram previamente calculados pelos métodos analíticos apresentados nas equações 3.12, 3.14 e 3.16, para as frequências de 250, 500, 1.000 e 2.000 Hz, considerando os três métodos teóricos (Sabine, Eyring-Norris e Millington-Sette). O tempo total de simulação adotado corresponde ao maior tempo de reverberação obtido entre os métodos, para cada combinação sala/frequência, acrescido de uma margem de 10%. Essa estratégia permitiu otimizar o processo, reduzindo o custo computacional. Caso essa margem adicional se mostre insuficiente para gerar resultados confiáveis, recomenda-se seu reajuste.

A Tabela 6.1 apresenta os dados de tempo de reverberação calculados para as três salas modeladas, conforme as fórmulas de Sabine, Eyring-Norris e Millington-Sette descritas no item 3.4.

Tabela 6.1 - Tempo de reverberação calculado, salas A, B e C. Fonte: do autor (2025).

Sala	Frequência [Hz]	T_{60} - Sabine [s]	T_{60} - Eyring-Norris [s]	T_{60} - Millington-Sette [s]
A	250	0,1379	0,1137	0,0944
	500	0,0839	0,0582	0,0188
	1.000	0,0844	0,0588	0,0187
	2.000	0,0910	0,0657	0,0323
B	250	0,9589	0,9298	0,9254
	500	1,4137	1,3848	1,3826
	1.000	2,0044	1,9755	1,9745
	2.000	2,1537	2,1245	2,1235
C	250	2,1615	2,0983	2,0603
	500	1,0429	0,9790	0,9252
	1.000	0,6372	0,5741	0,5182
	2.000	0,4660	0,4001	0,3359

Embora o maior valor de T_{60} obtido para a Sala A tenha sido de 0,1379 segundos, optou-se por estender a simulação até 1 segundo, modificando a metodologia de simulação do tempo de reverberação para esse ambiente específico, a fim de garantir uma margem confortável para a observação do decaimento sonoro. Essa decisão se deve ao método de aquisição do T_{60} adotado pelo software desenvolvido pelo LAV – UFU, que calcula o tempo de reverberação com base na inclinação da curva de pressão sonora em função da frequência. Nesse caso, devido à alta tendência de absorção sonora da Sala A (vide Tabela 5.1), tornou-se necessário um tempo maior para garantir a precisão desses resultados. Já para as Salas B e C, o tempo total de

simulação foi fixado em 2,4 segundos. Essa abordagem favoreceu uma análise mais robusta dos dados.

Os valores mostrados na Tabela 6.1 serão os valores referência para a análise de convergência descrita no item 5.4.2 com os dados de T_{60} obtidos numericamente.

6.2. Análise da Sala A

O primeiro ambiente a ser analisado é a Sala A, a cabine de ligações da V4 Company - Domingues & CO. A Tabela 6.2 apresenta os valores de tempo de reverberação simulados para esse recinto, para K iguais a 16, 32 e 64. Nessa etapa, os resultados ainda serão mostrados por sensor utilizado na aquisição de dados.

Tabela 6.2 - Tempo de reverberação simulado para a Sala A, à nível de sensor. Fonte: do autor (2025).

Sala	K	Sensor	T_{60} [s]			
			250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz
A	16	1	0,1269	0,0582	0,0569	0,0681
		2	0,1271	0,0582	0,0578	0,0759
		3	0,1269	0,0582	0,0580	0,0723
	32	1	0,1267	0,0582	0,0569	0,0659
		2	0,1269	0,0582	0,0582	0,0763
		3	0,1268	0,0581	0,0581	0,0739
	64	1	0,1266	0,0581	0,0562	0,0667
		2	0,1269	0,0581	0,0585	0,0800
		3	0,1268	0,0582	0,0584	0,0799

Por meio da Tabela 6.2 é possível observar que os valores de tempo de reverberação colhidos em cada um dos três sensores, por frequência e por valor de K , estão próximos entre si. A Tabela 6.3 apresenta o valor calculado para o tempo de reverberação médio para a Sala A.

Tabela 6.3 - Tempo de reverberação médio para a Sala A. Fonte: do autor (2025).

Sala	K	T_{60} [s]			
		250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz
A	16	0,12697	0,05820	0,05757	0,07210
	32	0,12680	0,05817	0,05773	0,07203
	64	0,12677	0,05813	0,05770	0,07553

Comparando os valores das tabelas 6.2 e 6.3, é possível perceber que o resultado encontrado não se distancia dos valores que foram medidos separadamente para cada sensor. Isso indica forte precisão dos dados e tendência de coerência no processo de aquisição. Esse comportamento pôde ser observado em quase todas as coletas da simulação.

Seguindo com a análise, a Tabela 6.4 reúne as informações sobre a convergência do tempo de reverberação médio simulado em função do valor de K . Nesta próxima etapa, será feita a comparação dos dados simulados com os valores de referência indicados na Tabela 6.1, pelo cálculo da diferença percentual entre os valores.

Tabela 6.4 - Erro do tempo de reverberação médio da Sala A. Fonte: do autor (2025).

Sala	Frequência [Hz]	K	Diferença percentual [%]		
			T_{60} - Sabine	T_{60} - Eyring-Norris	T_{60} - Millington-Sette
A	250	16	7,92845	11,66813	34,49859
		32	8,04931	11,52155	34,32203
		64	8,07348	11,49223	34,28672
	500	16	30,63170	0,00000	209,57447
		32	30,67143	0,05727	209,39716
		64	30,71116	0,11455	209,21986
	1.000	16	31,79305	2,09751	207,84314
		32	31,59558	1,81406	208,73440
		64	31,63507	1,87075	208,55615
	2.000	16	20,76923	9,74125	123,21981
		32	20,84249	9,63978	123,01342
		64	16,99634	14,96702	133,84933

Por ser o ambiente com menor volume (aproximadamente 5,5 m³), as variações percentuais se tornam mais expressivas quando aplicadas a baixos valores de tempo de reverberação, como é o caso da Sala A (vide tabelas 6.1 e 6.2). Contudo, os resultados observados na Tabela 6.4 demonstraram-se consistentes, confirmando a robustez da metodologia aplicada para a análise acústica deste ambiente.

Os dados simulados apresentaram boa estabilidade em relação aos valores obtidos experimentalmente, especialmente nas frequências centrais. Por exemplo, para a frequência de

500 Hz na Sala A, a diferença absoluta entre os tempos de reverberação foi menor que 1×10^{-4} segundos. No entanto, devido ao baixo valor absoluto de T_{60} para essa sala, essa diferença representa uma variação percentual de 209% quando comparada com o modelo de Millington-Sette, evidenciando que análises percentuais podem ser distorcidas em ambientes com baixa reverberação. Cabe ainda destacar que a formulação da condição de contorno adotada neste trabalho, embora adequada ao escopo proposto, possui limitações ao representar superfícies com características anecóicas. Modelos mais precisos podem ser explorados em estudos futuros para ampliar a fidelidade em contextos específicos que exijam maior detalhamento.

Ainda analisando os dados da Sala A, foi possível perceber que para frequências intermediárias (500 e 1.000 Hz), verifica-se erros menores, quando comparados aos valores obtidos por Eyring-Norris. Isso também pode ser confirmado pela análise do coeficiente de absorção sonora médio da sala ($\bar{\alpha}$). Segundo a literatura (BRANDÃO, 2016), a equação Eyring-Norris possui melhor desempenho em processos que envolvem ambientes com $\bar{\alpha}$ maiores que 0,2. Os coeficientes de absorção sonora médios para a Sala A, calculados segundo Equação 3.8, possui os seguintes valores:

Tabela 6.5 - Coeficiente de absorção média da Sala A. Fonte: do autor (2025).

Frequência [Hz]	Coeficiente de absorção sonora média, Sala A [-]
250	0,32983
500	0,54243
1.000	0,53890
2.000	0,49978

A Tabela 6.5 mostra que, independentemente da frequência do sinal analisado, o coeficiente de absorção sonora médio da Sala A é superior ao valor de referência de 0,2. Assim, quando for calculada a diferença percentual entre o tempo de reverberação simulado e o encontrado pela fórmula de Eyring-Norris, a tendência é obter valores de erro menores.

6.3. Análise da Sala B

O próximo ambiente a ser analisado é a Sala B, a Sala Amarela da V4 Company - Domingues & CO. A Tabela 6.6 reúne os dados de tempo de reverberação simulados para o recinto em questão, com a análise detalhada por sensor (também para os valores de K iguais a 16, 32 e 64).

Tabela 6.6 - Tempo de reverberação simulado para a Sala B, à nível de sensor. Fonte: do autor (2025).

Sala	K	Sensor	T_{60} [s]			
			250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz
B	16	1	0,8154	1,1691	1,6171	1,8540
		2	0,8705	1,1958	1,7631	1,9159
		3	0,7976	1,1337	1,6966	1,7953
	32	1	0,8467	1,1774	1,6754	1,7990
		2	0,8467	1,2597	1,8446	2,0762
		3	0,7701	1,2519	1,7658	1,8221
	64	1	0,8808	1,2503	1,8403	
		2	0,8765	1,2741	1,9068	
		3	0,8034	1,2593	1,7824	

A Tabela 6.6 apresenta os dados de tempo de reverberação obtidos pelos três sensores de aquisição para a Sala B. Os valores simulados pelos pontos de aquisição apresentaram boa proximidade entre si, ainda que com variações um pouco maiores do que as observadas na Sala

A. Devido às dimensões do ambiente, nem todos os valores de tempo de reverberação puderam ser colhidos. O aumento considerável nas dimensões do ambiente (volume maior cerca de 490%) implicou em tempos de simulação mais longos, especialmente para as frequências elevadas e maior discretização, o que limitou a obtenção completa dos dados para a condição de 2.000 Hz e $K = 64$.

Seguindo o procedimento apresentado pelo item 6.1, o próximo passo consistiu no cálculo do tempo de reverberação médio para a Sala B, para cada conjunto de frequência e K . A Tabela 6.7 apresenta os dados de tempo de reverberação médio para a Sala B.

Tabela 6.7 - Tempo de reverberação médio da Sala B. Fonte: do autor (2025).

Sala	K	T_{60} [s]			
		250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz
B	16	0,82783	1,16620	1,69227	1,85507
	32	0,82117	1,22967	1,76193	1,89910
	64	0,85357	1,26123	1,84317	

Ao observar a Tabela 6.7, nota-se que outra vez, a média do tempo de reverberação dos três sensores se aproxima ao valor encontrado individualmente para cada ponto de aquisição, principalmente para as baixas frequências. A Tabela 6.8 reúne então as informações de diferença percentual entre o tempo de reverberação médio simulado para a Sala B, e o calculado.

Tabela 6.8 - Erro do tempo de reverberação médio da Sala B. Fonte: do autor (2025).

Sala	Frequência [Hz]	K	Diferença percentual [%]		
			T_{60} - Sabine	T_{60} - Eyring-Norris	T_{60} - Millington-Sette
B	250	16	13,66843953	10,9665161	10,54318853
		32	14,36368061	11,68351617	11,26359772
		64	10,98480898	8,19889582	7,762409048
	500	16	17,50725048	15,78567302	15,65167077
		32	13,01784914	11,2025804	11,0612855
		64	10,78493787	8,923069517	8,778147452
	1.000	16	15,57240737	14,33729857	14,29391407
		32	12,09672055	10,81076521	10,76559467
		64	8,043969933	6,698726061	6,651472947
	2.000	16	13,86605996	12,68219973	12,64107998
		32	11,82151646	10,60955519	10,56745938
		64			

A Tabela 6.8 mostra que os valores simulados apresentaram diferenças percentuais superiores a 5% em relação aos modelos analíticos. No entanto, observou-se uma tendência de redução desses valores com o aumento de K . Isso sinaliza que melhorar o refinamento da malha, ou seja, diminuir o comprimento da guia de onda, pode fazer com que os resultados simulados se aproximem dos valores analíticos e a precisão da simulação aumente. Esse comportamento destaca o impacto positivo do refinamento da malha, evidente na Sala B, em contraste com a

Sala A, cujas limitações da curva obtida para interpolação do T_{60} no primeiro ambiente simulado impactaram o processo de aquisição.

Por outro lado, um ambiente maior e com menor capacidade de absorção sonora, como a Sala B, tende a apresentar um tempo de reverberação mais elevado. Nesse contexto, pequenas diferenças absolutas, quando associadas a valores maiores, resultam em variações percentuais mais suaves.

Para avaliar o desempenho da simulação da Sala B em relação aos diferentes métodos de cálculo adotados neste projeto, foram determinados os coeficientes médios de absorção sonora. Esses resultados estão organizados na Tabela 6.9 para análise posterior.

Tabela 6.9 - Coeficiente de absorção médio da Sala B. Fonte: do autor (2025).

Frequência [Hz]	Coeficiente de absorção sonora média, Sala B [-]
250	0,06003
500	0,04480
1.000	0,02872
2.000	0,02673

A Tabela 6.9 mostra que os valores de coeficiente de absorção sonora médio são significativamente inferiores a 0,2. Isso por indicar, por exemplo, que os resultados obtidos por simulação tendem a se alinhar melhor com a formulação de Sabine, mesmo que o erro médio observado para a Sala B seja de pelo menos 11%.

A tendência de diminuição do erro percentual com o aumento de K indica coerência no processo de aquisição de dados e sugere que, com técnicas de redução do erro de dispersão, o método empregado pode se tornar ainda mais preciso. A justificativa mais plausível é que as diferenças percentuais observadas aconteceram em razão do erro de dispersão.

6.4. Análise da Sala C

A Sala C é o último ambiente analisado pelo projeto, a sala descrita pelo exercício resolvido 10.2 do livro de Sylvio Bistafa, “Acústica aplicada ao controle de ruído” (2018). A Tabela 6.10 apresenta as informações de tempo de reverberação simuladas para a Sala C em função do sensor de medição (outra vez, para valores de K iguais a 16, 32 e 64).

Tabela 6.10 - Tempo de reverberação simulado para a Sala C, à nível de sensor. Fonte: do autor (2025).

Sala	K	Sensor	T_{60} [s]			
			250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz
C	16	1	1,7676	0,6836	0,4884	0,3726
		2	1,7655	0,8468	0,4855	0,3746
		3	1,8526	0,7573	0,4808	0,3782
	32	1	1,8434	0,6765	0,4711	
		2	1,7637	0,8847	0,5242	
		3	1,8698	0,8606	0,5093	
	64	1	2,0131	0,6869		
		2	1,8251	0,9686		
		3	1,8498	0,9095		

A Sala C é a maior sala simulada nesse projeto, com volume cerca de 25 vezes maior quando comparada com menor ambiente analisado, elevando o tempo total de simulação. O aumento de custo computacional impediu a conclusão do processo de aquisição de dados para

as frequências mais altas e maiores números de divisões de comprimento de onda: 1.000 Hz e K igual 64, 2.000 Hz e K igual a 32 e 2.000 Hz e K igual a 64.

Para aqueles dados que foram gerados, conforme visto na Tabela 6.10, os valores de tempo de reverberação colhidos, para cada grupo de três sensores, também estão relativamente próximos entre si. Nos casos com maiores refinamentos de malha, a simulação não pôde ser concluída com os recursos computacionais disponíveis.

A próxima etapa da análise consiste em encontrar o tempo de reverberação médio para a Sala C. Os resultados deste processo foram reunidos na Tabela 6.11.

Tabela 6.11 - Tempo de reverberação médio da Sala C. Fonte: do autor (2025).

Sala	K	T_{60} [s]			
		250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz
C	16	1,79523	0,76257	0,48490	0,37513
	32	1,82563	0,80727	0,50153	
	64	1,89600	0,85500		

Ao observar a Tabela 6.11, a média dos tempos de reverberação também apresenta precisão consistente, embora com maior variação do que os resultados das salas A e B, possivelmente em função das dimensões maiores desse recinto. A análise deve prosseguir para a avaliação do erro entre resultados simulados e os calculados pelas fórmulas de Sabine, Eyring-Norris e Millington-Sette. O produto final desse processo é apresentado na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 - Erro do tempo de reverberação médio da Sala C. Fonte: do autor (2025).

Sala	Frequência [Hz]	K	Diferença percentual [%]		
			T_{60} - Sabine	T_{60} - Eyring-Norris	T_{60} - Millington-Sette
C	250	16	16,94502275	14,44343834	12,86544031
		32	15,53859203	12,99464646	11,38992703
		64	12,28313671	9,641138064	7,974566811
	500	16	26,88017387	22,10759278	17,57818129
		32	22,59404865	17,54170923	12,74679349
		64	18,01706779	12,6659857	7,587548638
	1.000	16	23,90144382	15,53736283	6,426090313
		32	21,29106508	12,64007432	3,216261418
		64			
	2.000	16	19,49928469	6,24010664	11,68006351
		32			
		64			

Ao observar a Tabela 6.12, apesar de alguns erros percentuais superiores a 5%, observa-se uma tendência de redução do erro com o aumento de K nos resultados da Sala C. Novamente, isso pode indicar que uma malha mais refinada, ou seja, comprimentos de guias de onda menores, resulta em menor erro de dispersão.

Esses resultados também podem estar associados às características físicas da Sala C, que, assim como a Sala B, apresenta dimensões maiores e menor capacidade de absorção sonora. Com um tempo de reverberação mais elevado e diferenças absolutas pequenas, a

comparação entre valores analíticos e simulados tende a produzir variações percentuais menos expressivas. Este comportamento reforça a importância da escolha adequada de K para reduzir erros de dispersão.

A Tabela 6.13 apresenta os resultados do cálculo do coeficiente de absorção sonora médio da Sala C. Esses valores foram utilizados para avaliar a relação entre os resultados da simulação e os métodos de cálculo adotados neste projeto.

Tabela 6.13 - Coeficiente de absorção médio da Sala C. Fonte: do autor (2025).

Frequência [Hz]	Coeficiente de absorção sonora média, Sala C [-]
250	0,05793
500	0,12007
1.000	0,19598
2.000	0,26874

Conforme indicado na Tabela 6.13, o valor máximo de coeficiente de absorção sonora média da Sala C é de 0,27, considerando as bandas de frequência analisadas. Assim, é razoável supor que o cálculo do tempo de reverberação neste ambiente apresente maior compatibilidade com a fórmula de Sabine, já que todos os valores médios de absorção sonora são inferiores a 0,2. Além disso, as diferenças percentuais observadas nas comparações podem estar associadas a ocorrência de erro de dispersão, sendo possível reduzi-las com a aplicação de estratégias voltadas à mitigação desse tipo de erro.

CAPÍTULO VII – CONCLUSÃO

O principal objetivo deste projeto foi verificar a convergência entre os resultados das simulações desenvolvidas em três ambientes e os valores teóricos calculados para cada situação. Embora a referência apresentada pelo item 5.4.2 estabeleça critérios para avaliar a proximidade entre os resultados analíticos e numéricos, os ambientes analisados mostraram evolução dos resultados, com redução da diferença percentual à medida que o valor de K aumentava.

Enquanto a redução da diferença percentual foi mais evidente nas simulações das salas B e C, para a Sala A, esse comportamento foi distinto. A alta capacidade de absorção sonora desse ambiente acentuou o impacto das pequenas diferenças absolutas, resultando em erros relativos mais elevados, devido a tempos de reverberação menores.

Para além da análise de convergência proposta no início deste projeto, os resultados coletados permitiram fazer alguns apontamentos sobre os métodos de cálculo utilizados. Nessa etapa, foi fundamental realizar uma análise complementar a respeito do coeficiente de absorção sonora média dos recintos.

Enquanto a fórmula de Sabine mostrou melhor desempenho em análises de ambientes com baixa absorção, o modelo de Millington-Sette se mostrou mais apropriado para salas com características acústicas heterogêneas e modelos mais complexos (BISTAFA, 2018). Essas diferenças demonstram que a escolha do modelo pode influenciar diretamente a precisão dos cálculos, podendo justificar algumas das discrepâncias observadas nos resultados. Assim, compreender as limitações e as condições ideais de aplicação de cada método é essencial para interpretar corretamente os valores obtidos e aprimorar futuras simulações.

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que a simulação implementada e os métodos de cálculo utilizados não são abordagens concorrentes, mas sim complementares na obtenção de resultados. A alta precisão das simulações valida o projeto, mesmo quando os valores obtidos se distanciam da abordagem teórica. A hipótese levantada é de que a ocorrência significativa de erro de dispersão tenha influenciado parte dos resultados, indicando uma oportunidade de aprimoramento para as simulações futuras. Com a aplicação de estratégias de mitigação, é provável que as diferenças absolutas observadas fossem ainda menores.

Dentre as alternativas viáveis para reduzir o erro de dispersão está a adoção de topologias mais adequadas, como as malhas triangulares ou tetraédricas, que respeitam melhor a trajetória circular de propagação das ondas e corrigem a velocidade de propagação nas direções diagonais. No entanto, a implementação dessas topologias tende a aumentar a complexidade da simulação.

Outra opção seria aplicar a técnica de interpolação na malha cúbica. Essa abordagem corrige a velocidade de propagação da onda sonora sem alterar a topologia da malha, mantendo o custo computacional e a capacidade de refinamento do modelo. Nesse método, são simuladas juntas adicionais, como se houvesse mais direções de propagação, e sua influência é redistribuída para os nós reais mais próximos por meio de coeficientes de ponderação (SAVIOJA; VÄLIMÄKI, 1997).

7.1. Trabalhos futuros

A primeira oportunidade de melhoria se refere à criação de um código mais flexível, capaz de incluir novos elementos construtivos ao modelo (portas, janelas, mobílias). Isso permitiria aumentar a capacidade de personalização do ambiente, mas adicionaria complexidade ao sistema. Como consequência, o aumento no custo computacional poderia demandar a adoção de um novo ambiente de simulação. Trabalhar a discretização de uma sala mais detalhada também seria outro desafio.

Outra opção seria a personalização da quantidade de pontos de aquisição (sensores) usados na simulação. No modelo atual, esse número foi padronizado para facilitar o desenvolvimento de um código único, mas, em trabalhos futuros, ele poderia ser ajustado conforme o tamanho e a complexidade do ambiente. Isso permitiria análises mais detalhadas em salas maiores, por exemplo. Mesmo assim, é importante destacar que esse ajuste não eliminaria as limitações de custo computacional, já que o principal gargalo está no processamento dos dados coletados pelos sensores, e não na quantidade de pontos de aquisição.

No que diz respeito ao custo computacional, recursos de *multithreading* e *multiprocessing* disponíveis em Python poderiam ser utilizados para agilizar a aquisição de dados. Essas técnicas permitem a execução paralela de tarefas, melhorando o desempenho em operações de leitura, escrita e tarefas bloqueantes. Essas implementações demandam

conhecimentos técnicos específicos, o que representa uma oportunidade para aprimorar o sistema e ampliar as capacidades de simulação.

Outra possibilidade de aprimoramento futuro é substituir a estrutura baseada em condicionais e *loops* de repetição por uma abordagem de cálculo matricial. Ao permitir que várias operações sejam realizadas de forma simultânea, os recursos do processador seriam melhor aproveitados, reduzindo o tempo de execução das simulações. Tal estratégia tornaria o código mais eficiente e escalável com base em uma reestruturação mais robusta.

Adicionalmente, a modularização do código e a definição de funções reutilizáveis também poderiam tornar o sistema mais organizado e eficiente. Essas práticas ajudam a reduzir o tempo de implementação e a quantidade de linhas de código, quando acompanhadas de um bom planejamento da estrutura de módulos e suas interdependências.

Outra sugestão de melhoria para futuras versões seria o desenvolvimento de uma interface de usuário, tornando o sistema mais intuitivo e acessível, o que melhoraria sua usabilidade. A inclusão de uma barra de progresso também facilitaria o monitoramento da simulação em tempo real. Execuções como essas poderiam exigir conhecimento de UX/UI do desenvolvedor/programador, um conhecimento nem sempre tão difundido.

Além disso, a integração com um banco de dados contendo coeficientes de absorção de diferentes materiais ampliaria a aplicabilidade do sistema. Caso esse banco de dados ainda não exista, uma alternativa seria desenvolver um repositório abrangendo os materiais mais comuns em diferentes regiões do mundo. Essa melhoria aumentaria a utilidade e o alcance da aplicação desenvolvida.

Por fim, caso se opte por manter a topologia da malha cúbica para o desenvolvimento das simulações, a implementação da interpolação, de forma robusta e organizada, representaria uma solução eficiente para reduzir o erro de dispersão.

REFERÊNCIAS

- ABSORÇÃO sonora (ISO 10534-2 e ISO 354). [S. l.]: EAC. Disponível em: <https://www.eac.ufsm.br/ensaios/ensaios-acusticos>. Acesso em: 11 dez. 2024.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI S3.4-1980 (R2003) – Procedure for the computation of loudness of noise**. New York: ANSI, 2003.
- AMOS, D. Programação Orientada a Objetos (POO) em Python. **Real Python**, [s. l.], 15 dez. 2024. Disponível em: <https://realpython.com/python3-object-oriented-programming/>. Acesso em: 7 abr. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. **Acústica - Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações**. NBR 10152. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. (versão corrigida em 2020).
- BATHE, K. J., **Finite Element Procedures in Engineering Analysis**. Prentice-Hall, 1981.
- BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2008.
- BOAVENTURA, A.P.F.V. **Modelagem Acústica de Salas Através da Técnica de Malha de Guias Digitais de Ondas**. Orientador: DUARTE, M. A. V. 2014. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. DOI <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2014.9>, Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14746>. Acesso em: 6 mai. 2024.
- BRANDÃO, E. **Acústica de salas: projeto e modelagem**. 1. ed. rev. São Paulo, Brasil: Edgard Blücher Ltda., 2016. 654 p.
- CÂNDIDO, S. V. **Como medir a absorção sonora de um material acústico?**. [S. l.]: Portal acústica, 26 ago. 2020. Disponível em: <https://portalacustica.info/absorcao-sonora-de-um-material-acustico/>. Acesso em: 10 nov. 2024.
- CASTRO, K. J. R.; FONSECA, W. L. R. **Avaliação da difusão sonora de uma câmara reverberante em escala reduzida de diferentes geometrias e configurações de difusores sonoros**. Orientador: BASTOS, L. P. 2019. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação

em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019. Disponível em: <https://bdm.ufpa.br/jspui/handle/prefix/4641>. Acesso em 15 nov. 2024.

COSTA, A. B. F. Metodologia de aplicação da NBR ISO 3382-2 e análise dos tempos de reverberação das salas de aula no prédio 11209 do campus Centro da UFRGS.

Orientador: RAGGIO QUINTAS, J. P. 2020. 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/217364>. Acesso em: 15 nov. 2024.

COZZA, E. Quais são as normas técnicas relacionadas à acústica. [S. l.]: AEC Academy, 11 dez. 2024. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/academy/aec-responde/quais-sao-as-normas-tecnicas-relacionadas-a-acustica/24995>. Acesso em: 10 nov. 2024.

CROCE, B. Materiais acústicos: o mercado e o desempenho acústico. [S. l.]: Portal acústica, 19 set. 2018. Disponível em: <https://portalacustica.info/materiais-acusticos-o-mercado-e-o-desempenho-acustico/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

ENSAIO de absorção sonora da lã de rocha. YouTube: Pablo Serrano, 2018. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=uPVNS9YU0ys&t=150>. Acesso em: 10 nov. 2024.

FIGUEIREDO, F. L. Parâmetros Acústicos Subjetivos: Critérios para Avaliação da Qualidade Acústica de Salas de Música. Orientador: IAZZETTA, F. H. O. 2005. 259 f. Dissertação (Mestrado em Musicologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.27.2005.tde-16102006-105834>. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/27/27140/tde-16102006-105834/en.php>. Acesso em 15 nov. 2024.

GERGES, S. N. Ruído: Fundamentos e Controle. Florianópolis: NR Editora, 2000.

GONÇALVES, A. S. Caracterização Acústica de Espumas de Poliuretano: Absorção Sonora. Orientador: RODRIGUES, R. M. G. C. 2008. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/57729>. Acesso em: 15 nov. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method.** ISO 10534-2:2023. Geneva: ISO, 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms**. ISO 3382-2:2008. Geneva: ISO, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room**. ISO 354:2003. Geneva: ISO, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Acoustics - Methods for calculating loudness - Part 1: Zwicker method**. ISO 532-1:2017. Geneva: ISO, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Acoustics - Normal equal-loudness-level contours**. ISO 226:2003. Geneva: ISO, 2003.

KUTTRUFF, H. Room Acoustics. 4. ed. Londres, Ingraterra: Spon Press, 2000. 369 p.

MATPLOTLIB DEVELOPMENT TEAM. Matplotlib - Visualization with Python. *In: Matplotlib: Visualization with Python*. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://matplotlib.org/>. Acesso em: 7 abr. 2025.

MICHAELIS. **Dicionário Michaelis Online**. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br>. Acesso em: 4 nov. 2024.

MURPHY, D.; KELLONIEMI, A.; MULLEN, J., SHELLEY, S. Acoustic Modeling Using the Digital Waveguide Mesh. **Signal processing Magazine**, IEEE, v.24(2), p. 55-66, 2007.

MURPHY, Damian T.; MULLEN, Jack. Digital waveguide mesh modelling of room acoustics: Improved anechoic boundaries. *In: Proc. DAFX*. 2002. p. 163-168. <https://doi.org/10.1109/MSP.2007.323264>

NISHIDA P. P. R. **Desenvolvimento de uma ferramenta numérico computacional para avaliação da propagação sonora em ambientes fechados**. Orientador: DUARTE, M. A. V. 2022. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.615>. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/36740>. Acesso em 6 mai. 2024.

PARDO-QUILES, D.; RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, I.; RODRÍGUEZ, J. V. Design of Optimal Sound Absorbers Using Acoustic Diffusers for Multipurpose Auditoriums. **Acoustics**, [s. l.], v. 6, ed. 1, p. 219-239, 6 mar. 2024. DOI <https://doi.org/10.3390/acoustics6010012>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2624-599X/6/1/12>. Acesso em: 10 nov. 2024.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Documentation**. Disponível em: <https://www.python.org/doc/>. Acesso em: 4 abr. 2025.

SAVIOJA, Lauri; VALIMAKI, V. Improved discrete-time modeling of multi-dimensional wave propagation using the interpolated digital waveguide mesh. *In: Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1997. ICASSP-97., 1997 IEEE International Conference on*. IEEE, 1997. p. 459-462. Acesso em: 7 abr. 2025.

SAVIOJA, Lauri; VALIMAKI, V. Interpolated rectangular 3-D digital waveguide mesh algorithms with frequency warping. **IEEE transactions on speech and audio processing**, v. 11, n. 6, p. 783-790, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TSA.2003.818028>. Acesso em: 7 abr. 2025.

SERÁ que o silêncio te faz louco?. [S. l.]: Veritasium, 2014. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=mXVGib3bzHI>. Acesso em: 6 nov. 2024.

SILVA, B. M. P. **Análise do Efeito de Difusores Suspensos na Medição do Coeficiente de Absorção Sonora em Câmara Reverberante**. Orientador: CARVALHO, A. P. O. 2022. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Porto, Porto, 2022. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/140394>. Acesso em: 15 nov. 2024.

SMITH, J. O. Physical modeling using digital waveguides. **Computer music journal**, v. 16, n. 4, p. 74-91, 1992. <https://doi.org/10.2307/3680470>

SKÅLEVIK, M. Reverberation Time - The Mother of All Room Acoustic Parameters. **ICA 2010**, Sidney, Australia, p. 403-407, 23 out. 2010. Disponível em: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICA2010/cdrom-ICA2010/papers/p403. Acesso em: 10 abr. 2025.

SOARES, F. S. *et al.* CARACTERIZAÇÃO DA ABSORÇÃO SONORA DE PAINÉIS METÁLICOS PERFURADOS PARA USO EM BARREIRAS ACÚSTICAS. **XXVIII ENCONTRO DA SOBRAC**: Sociedade Brasileira de Acústica, Porto Alegre, 2018. DOI: 10.17648/sobrac-87020. Disponível em: <https://proceedings.science/sobrac/trabalhos/caracterizacao-da-absorcao-sonora-de-paineis-metalicos-perfurados-para-uso-em-ba?lang=pt-br#>. Acesso em: 10 nov. 2024.

STROSS-RADSCHINSKI, A. C. **PSF Python Brochure Vol. I final**. Python Software Foundation, 2015. Disponível em: <https://brochure.getpython.info/media/releases/psf-python-brochure-vol.-i-final-download.pdf/view>. Acesso em: 4 abr. 2025

THE QUIETEST Place to Study. **Y Magazine**: Out Of The Blue, [s. l.], 2015. Disponível em: <https://magazine.byu.edu/article/the-quietest-place-to-study/>. Acesso em: 13 out. 2024.

VAN DUYNE, Scott A.; SMITH, Julius O. The tetrahedral digital waveguide mesh. *In: Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 1995. IEEE ASSP Workshop on*. p. 234-237.

WERNER, K. **Caracterização de aspectos do timbre de pratos de percussão através de análises psicoacústicas**. Orientador: CORDIOLI, L. A. 2016. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/169649>. Acesso em 15 nov. 2024.

ANEXO A – CÓDIGO PYTHON DA SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO SONORA TRIDIMENSIONAL

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

##### DEFINIÇÃO COORDENADAS E PLANOS #####

# Eixo x: altura
# Eixo y: comprimento
# Eixo z: largura
# Origem: vértice superior esquerdo, frente

# L1: Teto
# L2: Parede esquerda
# L3: Chão
# L4: Parede direita
# L5: Parede da frente
# L6: Parede do fundo
# _____

##### DEFINIÇÃO PARÂMETROS DA SALA #####

# Parâmetros da sala
id_sala = "A" ## Identificação da sala

comp_P = 1.92 ## Comprimento da sala
larg_P = 1.22 ## Largura da sala
altu_P = 2.33 ## Altura da sala

altuPorta_P = 2.33 ## Altura da porta
largPorta_P = 0.96 ## Largura da porta
altuJanela_P = 0 ## Altura da janela

```

```

distJanelaChao = 0 ## Distância parte inferior da janela até o chão
largJanela_P = 0 ## Largura da janela

paredePorta = "L5" ## Identificação da parede da porta
paredeJanela = "" ## Identificação da parede da janela
aPorta = 0.02 ## Coeficiente de absorção sonora da porta
aJanela = 0.00 ## Coeficiente de absorção sonora da janela

# Posição da porta
position_altuPorta = altu_P - altuPorta_P
if paredePorta in ["L5", "L6"]:
    position_largPorta = (comp_P / 2 - largPorta_P / 2)
else:
    position_largPorta = (larg_P / 2 - largPorta_P / 2) ## L2 e L4

# Posição da janela
position_altuJanela = altu_P - distJanelaChao - altuJanela_P
if paredeJanela in ["L5", "L6"]:
    position_largJanela = (comp_P / 2 - largJanela_P / 2)
else:
    position_largJanela = (larg_P / 2 - largJanela_P / 2) ## L2, e L4

# Coeficientes de absorção superfícies
aTeto = 0.03
aChao = 0.02
aL1, aL2, aL3, aL4, aL5, aL6 = aTeto, 0.93, aChao, 0.93, 0.02, 0.93

# Propriedades da onda
c = 340
fa = 2000
A = 1

# Propriedades da malha

```

```
k = 64
```

```
fs = k * fa
```

```
ds = c * np.sqrt(3) / fs
```

```
time = 1.0
```

```
vetor_t_SI = []
```

```
# Número de pontos na malha
```

```
noxParede = int(np.ceil(altu_P / ds))
```

```
noyParede = int(np.ceil(comp_P / ds))
```

```
nozParede = int(np.ceil(larg_P / ds))
```

```
no_altuPorta = int(np.ceil(altuPorta_P / ds))
```

```
no_largPorta = int(np.ceil(largPorta_P / ds))
```

```
no_altuJanela = int(np.ceil(altuJanela_P / ds))
```

```
no_largJanela = int(np.ceil(largJanela_P / ds))
```

```
# Estados da malha
```

```
state0 = np.zeros((noxParede, noyParede, nozParede))
```

```
state1 = np.zeros((noxParede, noyParede, nozParede))
```

```
state2 = np.zeros((noxParede, noyParede, nozParede))
```

```
# Fonte sonora
```

```
x, y, z = 0.7, 0.7, 0.7
```

```
x_fp = int(np.ceil(x / ds) - 1)
```

```
y_fp = int(np.ceil(y / ds) - 1)
```

```
z_fp = int(np.ceil(z / ds) - 1)
```

```
# Coeficientes de reflexão
```

```
R_L1, R_L2, R_L3, R_L4, R_L5, R_L6 = 1 - aL1, 1 - aL2, 1 - aL3, 1 - aL4, 1 - aL5, 1 - aL6
```

```
R_Porta = 1 - aPorta
```

```
R_Janela = 1 - aJanela
```

```
# Sensores
```

```

sensores = [(1.0, 1.0, 1.0), (altu_P - 1.0, comp_P - 1.0, larg_P - 1.0), (altu_P - 0.7, comp_P -
0.7, larg_P - 0.7)]
indices_sensores = [
    (int(np.ceil(xs / ds) - 1), int(np.ceil(ys / ds) - 1), int(np.ceil(zs / ds) - 1)) for xs, ys, zs in
sensores
]

```

```

# Função para encontrar índices (otimizada)

```

```

def EncontrarIndices(vetor, valor):

```

```

    return np.abs(vetor - valor).argmin()

```

```

# Digitalização da porta

```

```

vetorAlturaPorta = np.arange(0, altu_P, ds)

```

```

vetorLarguraPorta = np.arange(0, larg_P, ds) if paredePorta in ["L2", "L4"] else np.arange(0,
comp_P, ds)

```

```

indexAlturaPortaDiscreto = EncontrarIndices(vetorAlturaPorta, position_altuPorta)

```

```

indexLarguraPortaDiscreto = EncontrarIndices(vetorLarguraPorta, position_largPorta)

```

```

indexAlturaJanelaDiscreto = EncontrarIndices(vetorAlturaPorta, position_altuJanela)

```

```

indexLarguraJanelaDiscreto = EncontrarIndices(vetorLarguraPorta, position_largJanela)

```

```

# Simulação

```

```

time_steps = np.arange(0, time, 1 / fs)

```

```

vetor_S1, vetor_S2, vetor_S3 = [], [], []

```

```

for t in time_steps:

```

```

    # Atualização vetorizada do estado

```

```

    state2[1:-1, 1:-1, 1:-1] = (

```

```

        (1 / 3) * (

```

```

            state1[:-2, 1:-1, 1:-1] + state1[2:, 1:-1, 1:-1] + # Sul/Norte

```

```

            state1[1:-1, :-2, 1:-1] + state1[1:-1, 2:, 1:-1] + # Oeste/Leste

```

```

            state1[1:-1, 1:-1, :-2] + state1[1:-1, 1:-1, 2:] # Baixo/Cima

```

```

        ) - state0[1:-1, 1:-1, 1:-1]

```

```

    )

```

```

# Fonte sonora
if t <= 1 / (2 * fa):
    state2[x_fp, y_fp, z_fp] = A
else:
    state2[x_fp, y_fp, z_fp] = 0

# Condições de contorno vetorizadas
# Otimização das condições de contorno

# Parede P1 (Teto)
state2[0, :, :] = (1 + R_L1) * state1[1, :, :] - R_L1 * state0[0, :, :]

# Parede P3 (Chão)
state2[-1, :, :] = (1 + R_L3) * state1[-2, :, :] - R_L3 * state0[-1, :, :]

# Parede P2 (Esquerda)
if paredePorta == "L2":
    # Faixa de parede acima da porta
    state2[0:indexAlturaPortaDiscreto, 0, :] = (
        (1 + R_L2) * state1[0:indexAlturaPortaDiscreto, 1, :] -
        R_L2 * state0[0:indexAlturaPortaDiscreto, 0, :]
    )
    # Faixa a partir da altura da porta
    for posicao_x in range(indexAlturaPortaDiscreto, noxParede):
        # Antes da porta
        state2[posicao_x, 0, :indexLarguraPortaDiscreto] = (
            (1 + R_L2) * state1[posicao_x, 1, :indexLarguraPortaDiscreto] -
            R_L2 * state0[posicao_x, 0, :indexLarguraPortaDiscreto]
        )
        # Porta
        state2[posicao_x, 0, indexLarguraPortaDiscreto:indexLarguraPortaDiscreto +
no_largPorta] = (

```

```

(1 + R_Porta) * state1[posicao_x, 1,
                        indexLarguraPortaDiscreto:indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta]
-
R_Porta * state0[posicao_x, 0,
indexLarguraPortaDiscreto:indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta]
)
# Depois da porta
state2[posicao_x, 0, indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta:] = (
    (1 + R_L2) * state1[posicao_x, 1, indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta:] -
    R_L2 * state0[posicao_x, 0, indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta:]
)

elif paredeJanela == "L2":
    # Faixa de parede acima da janela
    state2[0:indexAlturaJanelaDiscreto, 0, :] = (
        (1 + R_L2) * state1[0:indexAlturaJanelaDiscreto, 1, :] -
        R_L2 * state0[0:indexAlturaJanelaDiscreto, 0, :]
    )
    # Faixa na altura da janela
    for posicao_x in range(indexAlturaJanelaDiscreto, indexAlturaJanelaDiscreto +
no_altuJanela):
        # Antes da janela
        state2[posicao_x, 0, :indexLarguraJanelaDiscreto] = (
            (1 + R_L2) * state1[posicao_x, 1, :indexLarguraJanelaDiscreto] -
            R_L2 * state0[posicao_x, 0, :indexLarguraJanelaDiscreto]
        )
        # Janela
        state2[posicao_x, 0, indexLarguraJanelaDiscreto:indexLarguraJanelaDiscreto +
no_largJanela] = (
            (1 + R_Janela) * state1[posicao_x, 1,
indexLarguraJanelaDiscreto:indexLarguraJanelaDiscreto +
no_largJanela] -
            R_Janela * state0[posicao_x, 0,

```

```

indexLarguraJanelaDiscreto:indexLarguraJanelaDiscreto + no_largJanela]
    )
    # Depois da janela
    state2[posicao_x, 0, indexLarguraJanelaDiscreto + no_largJanela:] = (
        (1 + R_L2) * state1[posicao_x, 1, indexLarguraJanelaDiscreto + no_largJanela:] -
        R_L2 * state0[posicao_x, 0, indexLarguraJanelaDiscreto + no_largJanela:]
    )
    # Faixa abaixo da janela
    state2[indexAlturaJanelaDiscreto + no_altuJanela:, 0, :] = (
        (1 + R_L2) * state1[indexAlturaJanelaDiscreto + no_altuJanela:, 1, :] -
        R_L2 * state0[indexAlturaJanelaDiscreto + no_altuJanela:, 0, :]
    )

else:
    state2[:, 0, :] = (1 + R_L2) * state1[:, 1, :] - R_L2 * state0[:, 0, :]

# Parede L4 (Direita)
if paredePorta == "L4":
    # Faixa de parede acima da porta
    state2[0:indexAlturaPortaDiscreto, -1, :] = (
        (1 + R_L4) * state1[0:indexAlturaPortaDiscreto, -2, :] -
        R_L4 * state0[0:indexAlturaPortaDiscreto, -1, :]
    )
    # Faixa a partir da altura da porta
    for posicao_x in range(indexAlturaPortaDiscreto, noxParede):
        # Antes da porta
        state2[posicao_x, -1, :indexLarguraPortaDiscreto] = (
            (1 + R_L4) * state1[posicao_x, -2, :indexLarguraPortaDiscreto] -
            R_L4 * state0[posicao_x, -1, :indexLarguraPortaDiscreto]
        )
        # Porta
        state2[posicao_x, -1, indexLarguraPortaDiscreto:indexLarguraPortaDiscreto +
no_largPorta] = (

```

```

(1 + R_Porta) * state1[posicao_x, -2,
                        indexLarguraPortaDiscreto:indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta]
-
R_Porta * state0[posicao_x, -1,
indexLarguraPortaDiscreto:indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta]
)
# Depois da porta
state2[posicao_x, -1, indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta:] = (
    (1 + R_L4) * state1[posicao_x, -2, indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta:] -
    R_L4 * state0[posicao_x, -1, indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta:]
)

elif paredeJanela == "L4":
    # Faixa de parede acima da janela
    state2[0:indexAlturaJanelaDiscreto, -1, :] = (
        (1 + R_L4) * state1[0:indexAlturaJanelaDiscreto, -2, :] -
        R_L4 * state0[0:indexAlturaJanelaDiscreto, -1, :]
    )
    # Faixa a partir da altura da janela
    for posicao_x in range(indexAlturaJanelaDiscreto, indexAlturaJanelaDiscreto +
no_altuJanela):
        # Antes da janela
        state2[posicao_x, -1, :indexLarguraJanelaDiscreto] = (
            (1 + R_L4) * state1[posicao_x, -2, :indexLarguraJanelaDiscreto] -
            R_L4 * state0[posicao_x, -1, :indexLarguraJanelaDiscreto]
        )
        # Janela
        state2[posicao_x, -1, indexLarguraJanelaDiscreto:indexLarguraJanelaDiscreto +
no_largJanela] = (
            (1 + R_Janela) * state1[posicao_x, -2,
indexLarguraJanelaDiscreto:indexLarguraJanelaDiscreto +
no_largJanela] -
            R_Janela * state0[posicao_x, -1,

```

```

indexLarguraJanelaDiscreto:indexLarguraJanelaDiscreto + no_largJanela]
    )
    # Depois da janela
    state2[posicao_x, -1, indexLarguraJanelaDiscreto + no_largJanela:] = (
        (1 + R_L4) * state1[posicao_x, -2, indexLarguraJanelaDiscreto + no_largJanela:]
-
        R_L4 * state0[posicao_x, -1, indexLarguraJanelaDiscreto + no_largJanela:]
    )
    # Faixa de parede abaixo da janela
    state2[indexAlturaJanelaDiscreto + no_altuJanela:, -1, :] = (
        (1 + R_L4) * state1[indexAlturaJanelaDiscreto + no_altuJanela:, -2, :] -
        R_L4 * state0[indexAlturaJanelaDiscreto + no_altuJanela:, -1, :]
    )

else:
    state2[:, -1, :] = (1 + R_L4) * state1[:, -2, :] - R_L4 * state0[:, -1, :]

# Parede L5 (Frente)
if paredePorta == "L5":
    # Faixa de parede acima da porta
    state2[0:indexAlturaPortaDiscreto, :, 0] = (
        (1 + R_L5) * state1[0:indexAlturaPortaDiscreto, :, 1] -
        R_L5 * state0[0:indexAlturaPortaDiscreto, :, 0]
    )
    # Faixa a partir da altura da porta
    for posicao_x in range(indexAlturaPortaDiscreto, noxParede):
        # Antes da porta
        state2[posicao_x, :indexLarguraPortaDiscreto, 0] = (
            (1 + R_L5) * state1[posicao_x, :indexLarguraPortaDiscreto, 1] -
            R_L5 * state0[posicao_x, :indexLarguraPortaDiscreto, 0]
        )
        # Porta
        state2[posicao_x, indexLarguraPortaDiscreto:indexLarguraPortaDiscreto +

```

```

no_largPorta, 0] = (
    (1 + R_Porta) * state1[posicao_x,
        indexLarguraPortaDiscreto:indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta,
1] -
    R_Porta * state0[posicao_x,
indexLarguraPortaDiscreto:indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta, 0]
)
# Depois da porta
state2[posicao_x, indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta:, 0] = (
    (1 + R_L5) * state1[posicao_x, indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta:, 1] -
    R_L5 * state0[posicao_x, indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta:, 0]
)
else:
    state2[:, :, 0] = (1 + R_L5) * state1[:, :, 1] - R_L5 * state0[:, :, 0]

# Parede L6 (Fundo)
if paredePorta == "L6":
    # Faixa de parede acima da porta
    state2[0:indexAlturaPortaDiscreto, :, -1] = (
        (1 + R_L6) * state1[0:indexAlturaPortaDiscreto, :, -2] -
        R_L6 * state0[0:indexAlturaPortaDiscreto, :, -1]
    )
    # Faixa a partir da altura da porta
    for posicao_x in range(indexAlturaPortaDiscreto + 1, noxParede):
        # Antes da porta
        state2[posicao_x, :indexLarguraPortaDiscreto, -1] = (
            (1 + R_L6) * state1[posicao_x, :indexLarguraPortaDiscreto, -2] -
            R_L6 * state0[posicao_x, :indexLarguraPortaDiscreto, -1]
        )
        # Porta
        state2[posicao_x, indexLarguraPortaDiscreto:indexLarguraPortaDiscreto +
no_largPorta, -1] = (
            (1 + R_Porta) * state1[posicao_x,

```

```

indexLarguraPortaDiscreto:indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta, -2] -
    R_Porta * state0[posicao_x,
indexLarguraPortaDiscreto:indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta, -1]
    )
# Depois da porta
state2[posicao_x, indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta:, -1] = (
    (1 + R_L6) * state1[posicao_x, indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta:, -2] -
    R_L6 * state0[posicao_x, indexLarguraPortaDiscreto + no_largPorta:, -1]
    )
else:
    state2[:, :, -1] = (1 + R_L6) * state1[:, :, -2] - R_L6 * state0[:, :, -1]

# Atualização dos estados
state0, state1 = state1.copy(), state2.copy()

# Registro da pressão nos sensores
vetor_S1.append(state2[indices_sensores[0]])
vetor_S2.append(state2[indices_sensores[1]])
vetor_S3.append(state2[indices_sensores[2]])
print("sensores pronto")

# Debug periódico
print("passo")
print(t, "-> ", t / time * 100, "%")
vetor_t_SI.append(t)

# Gráfico da pressão no sensor 1
plt.figure()
plt.plot(time_steps, vetor_S1, label="Sensor 1")
plt.xlabel("Tempo [s]")
plt.ylabel("Pressão [Pa]")
plt.grid()
plt.legend()

```

```
plt.show()

# Exportar resultados
titulo_e_ext =
f'sala{id_sala}_{comp_P:.1f}x{larg_P:.1f}x{altu_P:.1f}_{fa}Hz_a_K{k}'.replace(".", "e")
+ ".txt"
with open(titulo_e_ext, "w") as file:
    for vetor in [vetor_t_SI, vetor_S1, vetor_S2, vetor_S3]:
        file.write(" ".join(map(str, vetor)) + "\n")

print("The End")
```