

**Universidade Federal de São Carlos**  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Departamento de Física

João Pedro Vilela Jabur

**QUALIDADE ACÚSTICA E INTELIGIBILIDADE DA FALA EM SALAS DE AULA  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

São Carlos  
2025

João Pedro Vilela Jabur

**QUALIDADE ACÚSTICA E INTELIGIBILIDADE DA FALA EM SALAS DE AULA  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Trabalho Final de Curso apresentado à Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Física, como requisito necessário para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Física

**Orientador:** Prof. Dr. Cláudio Antônio Cardoso

São Carlos  
2025

Jabur, João Pedro Vilela

Qualidade acústica e inteligibilidade da fala em salas de aula da Universidade Federal de São Carlos / João Pedro Vilela Jabur -- 2025.  
64f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos  
Orientador (a): Cláudio Antônio Cardoso  
Banca Examinadora: Cláudio Antônio Cardoso, Érico Masiero, Carlos Alberto De Francisco  
Bibliografia

1. Acústica de salas. I. Jabur, João Pedro Vilela. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180

## FOLHA DE APROVAÇÃO

João Pedro Vilela Jabur

Trabalho Final de Curso apresentado à Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Física, como requisito necessário para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Física. São Carlos, 05 de dezembro de 2025.

Orientador(a)

---

Prof. Dr. Cláudio Antônio Cardoso  
Universidade Federal de São Carlos

Examinador(a)

---

Prof. Dr. Érico Masiero  
Universidade Federal de São Carlos

Examinador(a)

---

Prof. Dr. Carlos Alberto De Francisco  
Universidade Federal de São Carlos



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe, Regina, e ao meu pai, Jorge, pelo apoio durante os anos de graduação e pela garantia do meu estudo durante a vida. Tive a sorte de ser filho de dois engenheiros que sempre fizeram de tudo para garantir as melhores condições de estudo e vida para mim, além de promoverem meu interesse pela ciência e engenharia.

Agradeço à minha avó, Célia, por todo o cuidado e atenção durante a vida, especialmente nos anos de estudo remoto durante a pandemia.

Agradeço à minha companheira Flávia, por todo o amor e momentos incríveis que vivemos nesses anos. Sem você o caminho até aqui, além de muito mais difícil, não faria sentido.

Agradeço ao meu amigo João Vitor, por todo o apoio desde o primeiro ano da graduação, tanto pela parceria nos estudos quanto nos momentos de descontração.

Agradeço ao professor Cardoso por proporcionar esse estudo e por promover a área de acústica no Departamento de Física.

## RESUMO

A inteligibilidade da fala é um fator de grande impacto para o aprendizado em ambientes educacionais. Para que a comunicação seja eficaz em aulas expositivas, é necessário que estes locais estejam acusticamente adequados, permitindo o pleno desenvolvimento do processo de ensino e aprendizagem. Neste trabalho, foram caracterizadas três salas de aula com soluções acústicas distintas nos prédios de Aulas Teóricas (ATs) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar): celulose projetada (AT5), forro de fibra (AT10) e ausência de tratamento (AT9). A metodologia baseou-se na medição da resposta ao impulso de cada sala, e, a partir do pós-processamento computacional, foram calculados os principais parâmetros objetivos especificados pela norma ISO 3382 para a avaliação da qualidade acústica e inteligibilidade da fala, como Tempo de Reverberação ( $T_{60}$ ), Clareza ( $C_{50}$ ), Definição ( $D_{50}$ ) e o Índice de Transmissão da Fala (STI). Os resultados obtidos mostraram uma disparidade clara: a sala sem tratamento (AT9) foi considerada altamente reverberante, com  $T_{60}$  médio superior a 1,6 s, enquanto as salas tratadas apresentaram tempos significativamente mais curtos. Conseqüentemente, a AT9 caracterizou-se como uma sala de baixa clareza e definição, com valores de  $C_{50}$  consistentemente negativos (abaixo de -4 dB). Dentre as soluções acústicas, o forro de fibra, presente no AT10, mostrou-se o mais equilibrado e eficiente, apresentando bom controle da reverberação em baixas e médias frequências. A solução de celulose projetada presente no AT5 apresentou um desempenho satisfatório em médias e altas frequências, mas com desempenho inferior em bandas graves. Em relação ao STI, as salas tratadas apresentaram resultados entre 0,730 e 0,740, enquadradas na categoria “Bom”, enquanto o AT9 ( $STI \approx 0,600$ ) situou-se no limite inferior da mesma categoria. Conclui-se que parte das salas de aulas presentes no Campus São Carlos apresentam indicativos negativos quanto a inteligibilidade da fala. Assim, a qualidade acústica das salas de aula deve ser um critério na busca pelo aprimoramento da infraestrutura institucional.

## ABSTRACT

Speech intelligibility is a factor of great impact on learning in educational environments. For communication to be effective in lecture-based classes, these spaces must be acoustically adequate, allowing for the full development of the teaching and learning process. In this work, three classrooms with distinct acoustic solutions were characterized in the Theoretical Class Buildings (ATs) at the Federal University of São Carlos (UFSCar): sprayed cellulose (AT5), fiber ceiling tiles (AT10), and no treatment (AT9). The methodology was based on measuring each room's impulse response, and, through computational post-processing, the main objective parameters specified by ISO 3382 for assessing acoustic quality and speech intelligibility were calculated, such as Reverberation Time ( $T_{60}$ ), Clarity ( $C_{50}$ ), Definition ( $D_{50}$ ), and the Speech Transmission Index (STI). The results revealed a clear disparity: the untreated room (AT9) was considered highly reverberant, with an average  $T_{60}$  exceeding 1.6 s, while the treated rooms exhibited significantly shorter reverberation times. Consequently, AT9 was characterized as a room with low clarity and definition, with consistently negative  $C_{50}$  values (below  $-4$  dB). Among the acoustic solutions, the fiber ceiling (AT10) proved to be the most balanced and efficient, providing good reverberation control at low and mid frequencies. The sprayed cellulose solution in AT5 showed satisfactory performance at mid and high frequencies, though inferior performance in low-frequency bands. Regarding STI, the treated rooms presented results between 0.730 and 0.740, classified as "Good", whereas AT9 (STI 0.600) was positioned at the lower limit of the same category. It is concluded that some classrooms on the São Carlos campus do not provide adequate conditions for speech intelligibility. Therefore, the acoustic quality of classrooms should be a criterion in efforts to improve institutional infrastructure.

## LISTA DE FIGURAS

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | Resposta ao impulso normalizada característica de um recinto em Pa. . . . .  | 4  |
| 2  | Função de energia instantânea $10\log(h(t)^2)$ e curva de Schroeder para um sinal impulsivo com filtro de frequência de 1000 Hz em unidades de nível de pressão sonora (NPS). . . . .  | 7  |
| 3  | Curva de Schroeder e reta de ajuste no intervalo de 20 dB para um sinal impulsivo com filtro de frequência de 1000 Hz. Representação da Faixa dinâmica considerando um nível de pressão sonora equivalente do ruído de fundo de 43 dB. . . . .   | 8  |
| 4  | Distribuição espectral dos componentes da fala: relação entre frequência (Hz) e nível de pressão sonora (dB) (Klangpornkun <i>et al.</i> , 2013). . . . .  | 18 |
| 5  | Planta baixa da sala de aula 111 do AT5 e posições dos postos de medição: fonte sonora ( $F_{1-2}$ ) e receptores ( $R_{1-4}$ ). . . . .   | 21 |
| 6  | Planta baixa da sala de aula do AT9 na configuração 1 e posições dos postos de medição: fonte sonora ( $F_{1-2}$ ) e receptores ( $R_{1-4}$ ). . . . .   | 22 |
| 7  | Planta baixa da sala de aula do AT9 na configuração 2 e posições dos postos de medição: fonte sonora ( $F_{1-2}$ ) e receptores ( $R_{1-4}$ ). . . . .   | 23 |
| 8  | Planta baixa da sala de aula 229 do AT10 e posições dos postos de medição: fonte sonora ( $F_{1-2}$ ) e receptores ( $R_{1-4}$ ). . . . .  | 24 |
| 9  | Resposta ao impulso juntamente com a envoltória (curva de Schroeder) para o sinal filtrado em duas bandas de oitava, 250 Hz (a) e 4000 Hz (b). . . . .   | 26 |
| 10 | Função de resposta ao impulso $h(t)$ em unidades de pressão sonora ( $a_1, b_1, c_1$ ) e nível de pressão sonora em decibéis ( $a_2, b_2, c_2$ ). As figuras $a_1$ e $a_2$ se referem à sala do AT5, as figuras $b_1$ e $b_2$ se referem ao AT9 e a $c_1$ e $c_2$ se referem à sala do AT10. . . . . | 27 |
| 11 | Resposta ao impulso juntamente com a envoltória (curva de Schroeder) para o sinal filtrado na banda de 2000 Hz para duas das salas de aula estudadas: AT5 (a) e AT9 na configuração fonte-receptor 1 (b). . . . .  | 28 |
| 12 | Envoltória da $h(t)$ (curva de Schroeder) e ajuste linear para estimativa do valor do $T_{60}$ na banda de 2000 Hz para duas das salas de aula estudadas: AT5 (a) e AT9 na configuração fonte-receptor 1 (b). . . . .  | 29 |
| 13 | Diagrama do fluxo de desenvolvimento desde do procedimento experimental até a obtenção dos parâmetros apresentados. . . . .  | 29 |
| 14 | Valores de SNR com ventiladores desligados para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas. . . . .  | 33 |
| 15 | Valores de SNR com ventiladores ligados para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas. . . . .   | 34 |
| 16 | Valores de $T_{60}$ para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas. . . . .   | 43 |
| 17 | Valores de $C_{50}$ para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas. . . . .   | 44 |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 18 | Valores de $D_{50}$ para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas.  | 45 |
| 19 | Valores de $U_{50}$ para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas.  | 45 |
| 20 | Valores de $U_{50}$ (ventiladores ligados) para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas. . . . .   | 46 |
| 21 | Valores do parâmetro de IF (%) para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas. . . . .   | 46 |
| 22 | Valores do parâmetro de IF (%) (ventiladores ligados) para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas. . . . .  | 47 |
| 23 | Resposta ao impulso juntamente com a envoltória (curva de Schroeder) para o sinal filtrado em cada frequência central em banda de oitava. Cada subfigura apresenta as 4 medidas (AT5, AT9-1, AT9-2, AT10) para a respectiva frequência. | 52 |
| 24 | Curva de Schroeder e ajuste linear para o intervalo de -5 a -25 dB, onde o valor de T60 é obtido e a partir do cálculo do T20. Resultado referente à medição na posição F1R1 da sala do AT5 . . . . .                                   | 53 |
| 25 | Curva de Schroeder e ajuste linear para o intervalo de -5 a -25 dB, onde o valor de T60 é obtido e a partir do cálculo do T20. Resultado referente à medição na posição F1R1 da sala do AT9 (Configuração 1). . . . .                   | 54 |
| 26 | Curva de Schroeder e ajuste linear para o intervalo de -5 a -25 dB, onde o valor de T60 é obtido e a partir do cálculo do T20. Resultado referente à medição na posição F1R1 da sala do AT9 (Configuração 2). . . . .                   | 55 |
| 27 | Curva de Schroeder e ajuste linear para o intervalo de -5 a -25 dB, onde o valor de T60 é obtido e a partir do cálculo do T20. Resultado referente à medição na posição F1R1 da sala do AT10. . . . .                                   | 56 |
| 28 | Sinais anecoicos para cada uma das 7 frequências centrais da banda de oitava. .   | 57 |
| 29 | Sinais após a operação de convolução para 12 das 14 frequências de modulação referente ao sinal modulado de 1000 Hz. Foi utilizado como $h(t)$ , nesse caso, o resultado para a banda de 1000 Hz da medição F1R1 do AT10. . . . .       | 58 |

## LISTA DE TABELAS

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Coeficientes $\alpha_k$ e $\beta_k$ por banda de frequência . . . . .   | 17 |
| 2  | Valores de jnd para os parâmetros acústicos analisados (Brandão, 2018). . . . .   | 17 |
| 3  | Soluções acústicas predominantes utilizadas por cada prédio de Aulas Teóricas (AT) do Campus São Carlos da UFSCar. . . . .                              | 20 |
| 4  | Escala de avaliação qualitativa dos valores para o Tempo de Reverberação ( $T_{60}$ ) por sala de aula (ABNT, 1973). . . . .                            | 31 |
| 5  | Escala de avaliação qualitativa estabelecida para a Claridade ( $C_{50}$ ) (Fajt; Krhen; Marušić, 2014). . . . .  | 31 |
| 6  | Escala de avaliação qualitativa estabelecida para a Definição ( $D_{50}$ ) (Custódio; Gerges, 2006). . . . .  | 31 |
| 7  | Escala de avaliação qualitativa estabelecida para a Relação Sinal-Ruído (SNR) (ASHA, 2005) (ANSI/ASA, 2010). . . . .                                    | 32 |
| 8  | Classificação da inteligibilidade da fala para o índice STI (Commission <i>et al.</i> , 2003) (ABNT, 2017a) (ABNT, 2017b). . . . .                      | 32 |
| 9  | Valores de SNR (dB) obtidos para cada sala em cada banda de oitava. . . . .   | 33 |
| 10 | Valores de $T_{60}$ (s) para AT5 em cada banda de oitava. . . . .   | 35 |
| 11 | Valores de $C_{50}$ (dB) e $D_{50}$ para AT5 em cada banda de oitava. . . . .   | 35 |
| 12 | Valores de $U_{50}$ (dB) para AT5 em cada banda de oitava (Ventiladores desligados). . . . .  | 36 |
| 13 | Valores de $U_{50}$ (dB) para AT5 em cada banda de oitava (ventiladores ligados). . . . .   | 36 |
| 14 | Valores dos coeficientes de absorção sonora do material celulose projetada, modelo CELBAR Sprayon 50 mm por banda de frequência (Hupalo, 2017). . . . . | 37 |
| 15 | Valores de $T_{60}$ (s) para AT10 em cada banda de oitava. . . . .  | 37 |
| 16 | Valores de $C_{50}$ (dB) e $D_{50}$ para AT10 em cada banda de oitava. . . . .  | 38 |
| 17 | Valores de $U_{50}$ (dB) para AT10 em cada banda de oitava (ventiladores desligados). . . . .   | 38 |
| 18 | Valores de $U_{50}$ (dB) para AT10 em cada banda de oitava (ventiladores ligados). . . . .  | 39 |
| 19 | Valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos para o revestimento de material fibroso presente no AT10. . . . .                                   | 39 |
| 20 | Valores de $T_{60}$ (s) para AT9 nas duas configurações em cada banda de oitava. . . . .  | 40 |
| 21 | Valores de $C_{50}$ (dB) e $D_{50}$ para AT9 (Configuração 1) em cada banda de oitava. . . . .  | 40 |
| 22 | Valores de $C_{50}$ (dB) e $D_{50}$ para AT9 (Config 2) em cada banda de oitava. . . . .  | 41 |
| 23 | Valores de $U_{50}$ (dB) para AT9 nas duas configurações em cada banda de oitava(ventiladores desligados). . . . .                                      | 41 |
| 24 | Valores de $U_{50}$ (dB) para AT9 nas duas configurações em cada banda de oitava (ventiladores ligados). . . . .  | 42 |
| 25 | Valores de STI medidos nos diferentes impulsos para as configurações AT10, AT5, AT9 - Config 1 e AT9 - Config 2. . . . .                                | 43 |

# SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>  | <b>3</b>  |
| 2.1      | Propagação do ruído em recintos . . . . .                                      | 3         |
| 2.2      | Resposta ao impulso e SLIT . . . . .   | 4         |
| 2.3      | Parâmetros Objetivos e de Inteligibilidade da Fala (IF) . . . . .              | 5         |
| 2.3.1    | Tempo de reverberação ( $T_{20}$ , $T_{30}$ , $T_{60}$ ) . . . . .             | 5         |
| 2.3.2    | Clareza ( $C_{50}$ e $C_{80}$ ) e Definição ( $D_{50}$ e $D_{80}$ ) . . . . .  | 9         |
| 2.3.3    | Relação Sinal-Ruído (SNR) . . . . .  | 11        |
| 2.3.4    | Useful to Detrimental Ratio ( $U_{50}$ ) . . . . .                             | 12        |
| 2.3.5    | Speech Transmission Index (STI) . . . . .                                      | 13        |
| 2.4      | Just Noticeable Difference (jnd) . . . . .                                     | 17        |
| 2.5      | Características do espectro da fala . . . . .                                  | 18        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA</b>   | <b>20</b> |
| 3.1      | Descrição das salas de aula estudadas . . . . .                                | 20        |
| 3.2      | Procedimento de medição e equipamentos . . . . .                               | 24        |
| 3.3      | Desenvolvimento . . . . .  | 25        |
| 3.4      | Crêterios de avaliação . . . . .   | 30        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>   | <b>33</b> |
| 4.1      | Ruído de fundo . . . . .   | 33        |
| 4.2      | Parâmetros relacionados à resposta ao impulso . . . . .                        | 34        |
| 4.2.1    | AT5 . . . . .  | 34        |
| 4.2.2    | AT10 . . . . .   | 37        |
| 4.2.3    | AT9 . . . . .  | 39        |
| 4.2.4    | Comparativo . . . . .  | 42        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES</b>  | <b>48</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>   | <b>49</b> |
|          | <b>APÊNDICES</b>   | <b>52</b> |
|          | Apêndice A – Conteúdo complementar ao desenvolvimento do tempo de reverberação | 52        |
|          | Apêndice B – Conteúdo complementar ao desenvolvimento do STI . . . . .         | 57        |

# 1 INTRODUÇÃO

A qualidade acústica de ambientes educacionais é um pilar fundamental para a eficácia dos processos de ensino e aprendizagem. A principal via de transmissão de conhecimento em salas de aula expositivas é a comunicação oral. Portanto, a clareza com que a fala do professor chega ao aluno impacta diretamente a capacidade de concentração, o nível de compreensão e a retenção do conteúdo. Esse conceito é conhecido como inteligibilidade da fala e é amplamente estudado no âmbito da qualidade de ensino e bem estar dos alunos em diferentes faixas etárias. Nesse contexto, o estudo conduzido por (Valente *et al.*, 2012), constatou que aspectos acústicos negativos, como alto tempo de reverberação e baixa relação-sinal ruído, impactam negativamente a atenção de crianças às atividades em sala.

Uma qualidade acústica baixa em sala de aula impacta também o bem estar dos alunos, como mostra o estudo de (Astolfi *et al.*, 2019). A partir da análise de salas com diferentes níveis de qualidade acústica, constatou-se uma relação direta entre a piora dos parâmetros relacionados à inteligibilidade da fala e uma percepção reduzida de diversão e de satisfação consigo mesmos por parte dos alunos em idade infantil. Além disso, foi evidenciado que o nível de tratamento acústico das escolas pode ser um elemento que evidencia desigualdades socioeconômicas. Escolas localizadas em bairros de maior renda média tendem a apresentar melhores condições acústicas e, conseqüentemente, maior bem-estar entre os alunos, se comparadas com escolas localizadas em bairros de menor renda média (Astolfi *et al.*, 2019). Portanto, a qualidade acústica de uma sala de aula se mostra como um fator relevante no contexto de um esforço para a diminuição da desigualdade de condições nos ambientes de ensino.

Apesar da sua relevância, o tratamento acústico é frequentemente negligenciado em projetos de infraestrutura educacional. Na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), os diferentes prédios de Aulas Teóricas (ATs) espalhados pelo Campus de São Carlos foram construídos em diferentes épocas, nas quais distintas soluções acústicas foram empregadas. Dentre os tratamentos acústicos encontrados, há a celulose projetada, predominante em prédios mais antigos, e o forro de fibra, predominante no AT10. Paralelamente, existem salas que operam sem qualquer tipo de tratamento acústico dedicado, principalmente em prédios mais novos, como o AT7, AT8 e AT9. Diante disso, busca-se compreender objetivamente o desempenho acústico dos diferentes cenários presentes nos ATs e o impacto das diferentes soluções na inteligibilidade da fala.

A relevância deste trabalho reside na geração de um diagnóstico técnico inédito sobre um aspecto da infraestrutura de ensino da instituição. Dessa forma, este estudo busca fornecer subsídios concretos para a gestão da universidade a partir da avaliação da qualidade acústica por meio de parâmetros objetivos padronizados pela norma ISO 3382. Através desse diagnóstico, será possível identificar salas críticas que necessitam de intervenção e avaliar a eficácia das soluções já implementadas. Tendo em vista a busca pelo avanço da infraestrutura educacional da instituição, são discutidas orientações para escolhas assertivas visando o tratamento acústico

em projetos futuros.

O diagnóstico consistiu na caracterização acústica de salas de aula para cada uma das soluções predominantes presentes no Campus São Carlos. Assim, foram realizadas medições *in loco* para obter as respostas ao impulso, métodos computacionais para tratamento dos dados obtidos e cálculo de alguns dos mais relevantes parâmetros acústicos objetivos no contexto de acústica de salas. Após isso, foi realizada a comparação dos resultados obtidos com os valores recomendados por normas técnicas e pela literatura especializada e a comparação de desempenho entre as diferentes situações analisadas.

A escolha dos parâmetros acústicos para a caracterização das salas foi baseada na análise de normas técnicas especializadas e trabalhos de autores que desenvolveram parâmetros úteis e amplamente utilizados na caracterização da condição acústica de um recinto. Entre as normas, destaca-se a ISO 3382-2 (ABNT, 2017b) e IEC 60268-16 (Commission *et al.*, 2003), que definem os parâmetros de tempo de reverberação e Speech Transmission Index. Em relação aos trabalhos de referência, destaca-se Sabine, para o tempo de reverberação, (Reichardt; Alim; Schmidt, 1974), para a Claridade e Definição acústicas e (Bradley, J., 1991), para o Useful to Detrimental Ratio. De forma conjunta, os parâmetros citados são capazes de caracterizar a condição acústica de uma sala de aula de forma ampla e completa (Brandão, 2018).

Na seção 2 são apresentados os fundamentos teóricos que definem as características da propagação sonora em ambientes fechados e a estrutura conceitual dos parâmetros acústicos desenvolvidos na avaliação das salas. A seção seguinte descreve a metodologia utilizada para a obtenção dos resultados, desde a descrição do objeto de estudo e procedimento de coleta de dados até o seu desenvolvimento para obtenção dos resultados finais. Por fim, busca-se apresentar os resultados juntamente com a análise e avaliação para cada uma das salas estudadas, bem como a comparação entre os valores obtidos para cada uma delas.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Propagação do ruído em recintos

A propagação sonora em um recinto difere fundamentalmente daquela observada em um ambiente aberto. Enquanto em campo livre a onda se propaga sem interferências, em um recinto, o som emitido por uma fonte sofre múltiplas interações com as superfícies que delimitam e compõem o ambiente, como cadeiras, paredes, teto e piso. Essas interações promovem fenômenos de reflexão, absorção e difração das ondas sonoras que compõem o ruído. Dessa forma, a energia sonora chega ao receptor, seja um ouvinte ou um microfone, por diversos caminhos e em instantes de tempo distintos (Bistafa, 2018).

Na perspectiva do receptor, o som direto da fonte, sem sofrer reflexões, é o primeiro sinal a ser captado, seguido pelo som vindo de reflexões com os componentes do ambiente. O sinal que chega ao receptor logo nos primeiros milissegundos após a chegada do som direto é conhecido como ruído de reflexões precoces ou campo direto. Já o ruído que chega em instantes de tempo com maior ordem de grandezas é proveniente de reflexões tardias, chamado de campo reverberante (Bistafa, 2018). Essa energia sonora que permanece no ambiente e decai ao longo do tempo, após a interrupção da fonte, é definida como cauda reverberante devido ao aspecto causado pela evolução da amplitude sonora ao longo do tempo, como mostrada pela Figura 1.

A reflexão das ondas sonoras nos componentes e limites do recinto é acompanhada pela absorção do som durante a interação com os objetos. Quando uma onda sonora incide sobre uma parede, parte de sua energia é refletida de volta ao ambiente, enquanto a outra parte é absorvida. Portanto, a energia inicial da onda, após a interação, pode ser dividida entre a componente refletida e absorvida, que por sua vez, é composta pela parcela dissipada e transmitida para o interior do objeto. A dissipação ocorre principalmente pela transformação em calor no interior do material e a eficiência do processo de absorção é quantificada pelo seu coeficiente de absorção sonora  $\alpha$ , que varia dependendo de sua composição (Bistafa, 2018).

A constante interação das ondas sonoras com o ambiente, portanto, gera o sinal percebido pelo receptor em uma sala, formada pela combinação entre o ruído do campo direto e reverberante. Para que a acústica de uma sala esteja adequada e agradável ao ouvido humano, é necessário um balanço adequado entre a energia do campo direto e reverberante. Caso uma sala seja excessivamente eficiente em absorver o som, gerando um sinal com pouca energia na cauda reverberante, o volume sonoro dentro do recinto seria baixo, o que demanda um maior esforço de emissão sonora. No caso de uma sala de aula, o esforço seria realizado pelo professor por meio de suas cordas vocais, o que poderia gerar problemas de saúde a longo prazo. Do mesmo modo, caso a sala não apresente um tratamento adequado, a energia contida na cauda reverberada será excessiva e com uma dissipação prolongada, causando grandes problemas para a inteligibilidade da fala.

O balanço da contribuição entre os dois campos será mensurado de diferentes formas

pelos parâmetros objetivos apresentados nesta seção. O mais amplamente utilizado para a caracterização acústica de salas é o Tempo de reverberação ( $T_{60}$ ), que mede o tempo em que o ruído demora para decair 60 decibéis, e está relacionado diretamente com a dimensão da cauda reverberante. Com isso, dependendo da aplicação em que um recinto for utilizado, haverá diferentes valores adequados para a contribuição do campo reverberante (Bistafa, 2018).

Como exemplo, para o caso de uma sala destinada para a música, é desejável um maior  $T_{60}$  e, constantemente, uma maior contribuição do campo reverberante se comparado com uma sala de aula. Isso ocorre pois muitos instrumentos têm sua identidade sonora relacionada à reverberação gerada pelo seu sinal. Já no caso de uma sala de aula, o mais importante é garantir a inteligibilidade da fala e uma intensidade adequada por todo o ambiente, o que significa uma menor contribuição do campo reverberante se comparado com a sala de música.

## 2.2 Resposta ao impulso e SLIT

A propagação de um sinal sonoro partindo de uma fonte até um receptor, como discutido anteriormente, será influenciada pela disposição dos componentes, tipos de materiais e estruturas presentes em um recinto. Esses fatores serão responsáveis por caracterizar a forma com que o sinal sonoro irá se comportar após a emissão pela fonte. Esse comportamento é definido pela Resposta ao Impulso da Sala (RIS), e sua forma temporal é mostrada pela Figura 1, em unidades de pressão sonora normalizada. A RIS pode ser obtida a partir da emissão de um sinal impulsivo, ou seja, um sinal curto no tempo e de um amplo espectro de frequências, como o produzido pelo estouro de um balão.

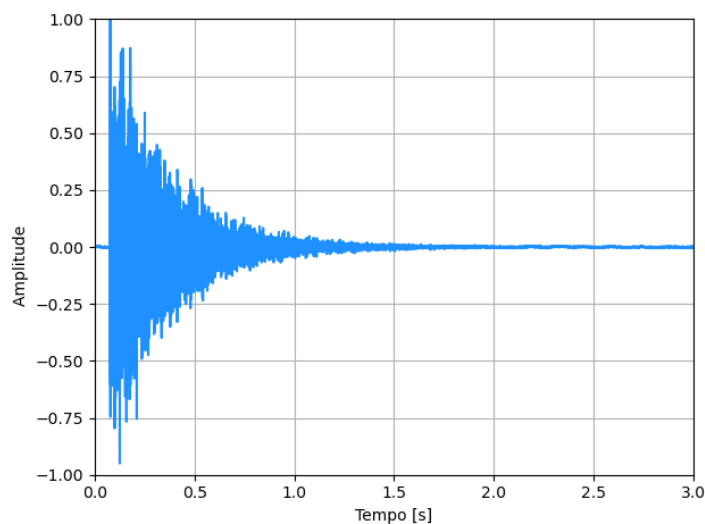


Figura 1: Resposta ao impulso normalizada característica de um recinto em Pa.

Um conceito de grande relevância para o estudo da propagação do ruído em recintos é a linearidade, o que garante o princípio de superposição acústica. Isso significa que a resposta da sala a diferentes sinais, como a voz do professor, alunos e ruído do ventilador, é formada pela soma dos sinais individuais. A sala não gera sinais distintos daqueles propagados pelas

fontes, mas apenas impõem aos sinais as interações com o ambiente. Expandindo esse conceito, tem-se o Sistema Linear Invariante no Tempo (SLIT). Se a configuração fonte-receptor presente em uma sala apresentar a manutenção das configurações de geometria, clima, materiais e disposição, ela pode ser considerada uma SLIT, preservando as condições de linearidade (Brandão, 2018).

A partir disso, a função temporal que caracteriza a RIS, denotada como  $h(t)$ , tem um papel fundamental na estruturação de parâmetros objetivos em acústica de salas, visto que em um SLIT, a RIS é capaz de descrever todas as características da sala (Bradley, John S, 1986b). Assim, conhecendo a  $h(t)$ , é possível determinar o sinal captado pelo receptor a partir de um sinal original emitido da fonte, sem a necessidade de medi-lo experimentalmente. Nesse caso, o sinal captado será o resultado da operação de convolução entre o sinal emitido e a  $h(t)$ , como mostrado a seguir (Brandão, 2018):

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

onde  $x(t)$  é o sinal da fonte e  $y(t)$  o sinal captado pelo receptor.

### 2.3 Parâmetros Objetivos e de Inteligibilidade da Fala (IF)

Para que seja possível estudar a qualidade acústica de uma sala relacionando-a com diferentes aspectos sensoriais e de inteligibilidade da sala, são definidos parâmetros acústicos objetivos. A partir deles é possível relacionar de forma direta grandezas objetivas relacionadas à estrutura das salas, como a função de resposta ao impulso  $h(t)$  e o nível de pressão sonora equivalente do ruído de fundo, com aspectos relevantes para a inteligibilidade da fala e conforto sonoro, como características de modulação e tempo de interpretação do som pelo aparelho auditivo humano. Nesta seção é apresentada a formulação teórica de alguns dos parâmetros objetivos mais relevantes para a determinação da qualidade acústica de uma sala de aula.

#### 2.3.1 Tempo de reverberação ( $T_{20}$ , $T_{30}$ , $T_{60}$ )

O tempo de reverberação ( $T_{60}$ ) consiste no tempo em que o nível de pressão sonora decresce 60 dB na resposta ao impulso sonoro. Dentre todos os parâmetros objetivos estudados e medidos para o estudo acústico de um recinto, o tempo de reverberação é o mais amplamente utilizado e que mais fornece informações acerca da experiência subjetiva sentida por uma pessoa em uma sala. De forma objetiva, é um parâmetro crucial na análise da condição acústica de um recinto, visto que a inteligibilidade da fala está diretamente ligada a um baixo  $T_{60}$ . Porém, apesar de apresentar uma capacidade de análise quantitativa ampla, não é possível obter uma análise acústica completa apenas com o tempo de reverberação. A experiência auditiva de seres humanos presentes em uma sala é complexa e subjetiva, o que faz com que sejam demandados diversos parâmetros objetivos para a sua completa análise quantitativa. De forma análoga ao

$T_{60}$ , existem também o  $T_{20}$  e  $T_{30}$ , que correspondem ao tempo que o nível de pressão sonora decresce 20 dB e 30 dB, respectivamente, em relação ao impulso sonoro.

De acordo com Sabine (Everest, 2022) (Young, 1959), o tempo de reverberação na parte interna de um recinto pode ser relacionado diretamente com seu volume ( $V$ ) e coeficiente de absorção ( $\bar{\alpha}$ ), como mostra a relação abaixo:

$$T_{60} = \frac{0,161V}{S\bar{\alpha}} \quad (2)$$

onde  $S$  é a área de absorção considerada em  $m^2$ . Dessa forma, é possível estimar o coeficiente de absorção de materiais utilizados para tratamento acústico a partir da medição do tempo de reverberação do recinto. O coeficiente de absorção ( $\bar{\alpha}$ ) pode ser obtido a partir da relação entre o somatório dos produtos das áreas de absorção individuais ( $S_i$ ) e coeficientes de absorção correspondentes às áreas ( $\alpha_i$ ) e a área total absorvedora ( $S$ ), como mostra a Equação 3. Como uma sala geralmente apresenta diferentes superfícies absorvedoras compostas de diferentes materiais e, conseqüentemente, diferentes coeficientes de absorção, busca-se obter um coeficiente médio da sala para a estimativa do tempo de reverberação.

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \cdot \sum_i S_i \alpha_i \quad (3)$$

A Equação 3 também pode ser usada para prever os valores do coeficiente de absorção de um material desconhecido utilizado como revestimento. Considere um revestimento de material desconhecido presente no teto de uma sala em que há o interesse em caracterizá-lo. Nesse caso, o coeficiente de absorção médio da sala será dado por:

$$S\bar{\alpha} = S_{\text{teto}} \cdot \alpha_{\text{teto}} + S_{\text{outros}} \cdot \alpha_{\text{outros}} \quad (4)$$

onde os valores de  $\alpha_{\text{outros}}$  poderão ser obtidos a partir dos valores de  $T_{60}$  para uma sala análoga, porém sem revestimento. Adicionalmente,  $S_{\text{teto}}$  consiste na área revestida e  $S_{\text{outros}}$  na área superficial onde não há revestimento. Substituindo na Equação 2, é possível obter uma relação direta para os valores dos coeficientes de absorção do revestimento  $\alpha_{\text{teto}}$ , como mostra a expressão a seguir:

$$\alpha_{\text{teto}} = \frac{\frac{0,161V}{T_{60}} - S_{\text{outros}} \cdot \alpha_{\text{outros}}}{S_{\text{teto}}} \quad (5)$$

De forma geral, o tempo de reverberação fornece um parâmetro quantitativo do tempo da resposta à um impulso. Dessa forma, para realizar sua medição é necessário que a fonte

tenha característica impulsiva, ou seja, apresente um som de curta duração, alta intensidade e de largo espectro. A medição deve ser realizada por um microfone especializado, onde será possível obter a função de resposta ao impulso  $h(t)$  da sala a partir do tratamento dado por meio de um software especializado.

Para que seja possível mensurar  $h(t)$  de forma correspondente a escala logarítmica dB, utiliza-se o valor de  $10\log(h(t)^2)$ , chamada de energia instantânea, como mostra o gráfico da Figura 2, onde é possível notar uma tendência clara de decaimento linear da amplitude sonora em relação ao tempo. A análise do decaimento linear pode ser realizada a partir da obtenção da função de envoltória, sendo possível de ser obtida a partir da chamada curva de Schroeder ou integral cumulativa invertida em tradução livre, mostrada pela Equação 6 (Schroeder, 1979).

$$E(t) = 10\log\left(\int_t^\infty h_f^2(\tau) d\tau\right) = 10\log\left(\int_\infty^t h_f^2(\tau) d(-\tau)\right) \quad (6)$$

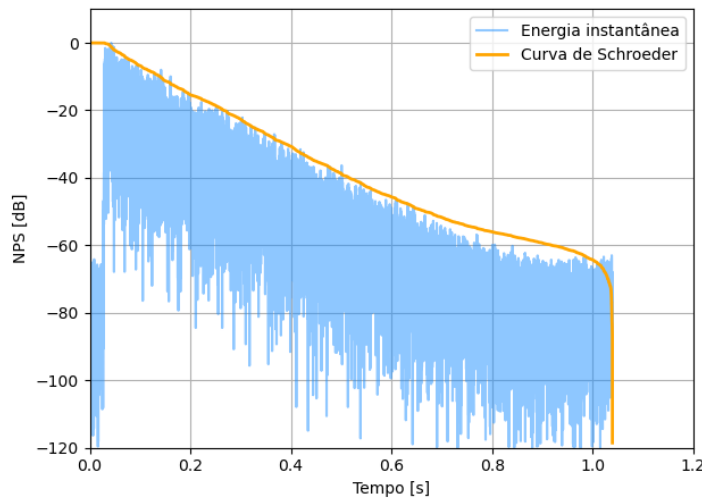


Figura 2: Função de energia instantânea  $10\log(h(t)^2)$  e curva de Schroeder para um sinal impulsivo com filtro de frequência de 1000 Hz em unidades de nível de pressão sonora (NPS).

A obtenção experimental do  $T_{60}$  a partir da curva de decaimento apresenta diversas dificuldades, sendo mais usual a escolha pela obtenção do  $T_{20}$  ou  $T_{30}$ , nesse caso. Isso se deve ao fato de que o cálculo da diminuição do nível de pressão sonora em relação ao tempo deve desconsiderar o ruído de fundo e outras incertezas presentes na curva de decaimento real. De forma objetiva, o decaimento deve ser considerado apenas 15 dB acima do nível estável de ruído de fundo. Além disso, deve ser desconsiderado uma margem de 5 dB após a emissão de ruído para descarte do decaimento das primeiras reflexões (Brandão, 2018). Assim, o intervalo de valores onde o tempo de reverberação pode ser medido é limitado, sendo chamado de faixa dinâmica (FD), definida a partir da Equação 7:

$$FD = NPS_m - NPS_f - 15\text{dB} - 5\text{dB} \quad (7)$$

Na equação acima,  $NPS_m$  consiste no nível de pressão sonora máximo produzido pelo impulso e  $NPS_f$  o nível de pressão sonora equivalente do ruído de fundo.

A curva de Schroeder apresenta um claro comportamento de decaimento linear nos primeiros segundos, como é possível notar na Figura 2. Essa característica se mantém até o alcance do nível do ruído de fundo presente no ambiente, o que restringe o intervalo da faixa dinâmica, como citado. Dessa forma, faz-se uma curva de ajuste para visualização do comportamento linear da curva de Schroeder e medição do tempo de reverberação a partir da curva de decaimento. Esse processo é ilustrado na Figura 3, onde considerou-se o  $NPS_f = 43dB$  e a margem de 15 dB entre o ruído de fundo e o início da faixa dinâmica.

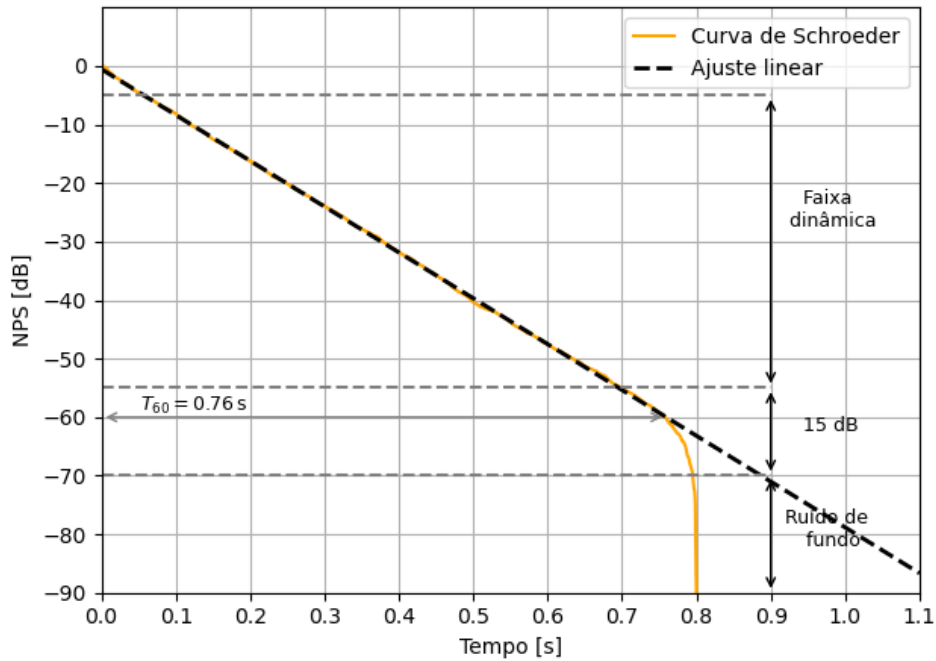


Figura 3: Curva de Schroeder e reta de ajuste no intervalo de 20 dB para um sinal impulsivo com filtro de frequência de 1000 Hz. Representação da Faixa dinâmica considerando um nível de pressão sonora equivalente do ruído de fundo de 43 dB.

Os diferentes parâmetros que caracterizam o tempo de reverberação,  $T_{60}$ ,  $T_{30}$  e  $T_{20}$  diferem entre si na característica da medição, mais precisamente no intervalo de ajuste da curva do comportamento linear da curva de Schroeder. Como mostram as Equações 8, 9, 10, o  $T_{20}$  consiste na obtenção do tempo de reverberação a partir de um ajuste no intervalo  $[-25; -5]$ , já o  $T_{30}$  no intervalo de  $[-35; -5]$  e o  $T_{60}$  no intervalo de  $[-65; -5]$ . Como indicado na Figura 3, onde é mostrado o ajuste no intervalo de 20 dB, mede-se o  $T_{60}$  extrapolando o ajuste para a queda de 60 dB.

$$T_{20} = 3(t_{-25} - t_{-5}) \quad (8)$$

$$T_{30} = 2(t_{-35} - t_{-5}) \quad (9)$$

$$T_{60} = t_{-65} - t_{-5} \quad (10)$$

### 2.3.2 Claridade ( $C_{50}$ e $C_{80}$ ) e Definição ( $D_{50}$ e $D_{80}$ )

Após a formulação do tempo de reverberação por Sabine (Beranek; Kopec, 1981), iniciou-se uma busca por quantificar de forma mais efetiva a percepção do som considerando as características sensoriais humanas. Assim, com início nos anos 1950, foram desenvolvidos os parâmetros de Clareza e Definição por pesquisadores alemães, com destaque para Thiele (Long, 2005) e Reichard, Alim e Schmidt (Reichardt; Alim; Schmidt, 1974). É possível definir os dois parâmetros citados como relacionados à razão entre a energia sonora inicial e útil para a compreensão humana e a energia sonora inútil ou prejudicial para a compreensão do sinal (Rossing, 2007).

A relação dos parâmetros com as características sensoriais humanas se baseia no conceito de que o cérebro humano apresenta um limite de tempo para distinção de sons. De acordo com (Haas, 1951), caso dois sinais sonoros distintos sejam captados com uma diferença menor que esse limite, eles são fundidos e compreendidos pelo cérebro como um sinal único. Portanto, para que o cérebro humano seja capaz de compreender sons distintos, deve haver uma diferença de tempo suficiente entre dois impulsos. Mais precisamente, não há uma diferença de compreensão brusca entre fusão e diferenciação de diferentes sons, mas uma faixa de intervalo de tempo intermediária em que o cérebro reconhece dois sinais distintos como um eco (Rossing, 2007).

Os limites citados, de acordo com (Haas, 1951), se estabelecem da seguinte forma: se a diferença de tempo da captação de dois sinais for menor que aproximadamente 35 ms, o cérebro realiza a fusão dos dois sons é percebida como um reforço sonoro com a direção da fonte bem estabelecida. Já se a diferença estiver entre aproximadamente 35 e 50 ms, o som é percebido como uma extensão, onde não há um considerável aumento da intensidade como no reforço, porém a percepção de direcionalidade não é afetada consideravelmente. Por fim, se a diferença de percepção for maior que aproximadamente 50 ms, os sinais são compreendidos de forma distinta, apresentando um comportamento de eco, o que afeta diretamente a inteligibilidade da fala.

A Clareza se difere da Definição por ser um parâmetro logarítmico, medido em decibéis, e, principalmente, por consistir na razão entre a energia contida nas primeiras reflexões do sinal e a energia contida nas reflexões tardias, onde os limites são de 50 ms e 80 ms para os parâmetros  $C_{50}$  e  $C_{80}$ . Já a Definição consiste na razão entre a energia contida nas primeiras reflexões e a energia total do sinal (Brandão, 2018). Os limites de 50 ms e 80 ms também são

usados para definir os parâmetros  $D_{50}$  e  $D_{80}$ . Apesar disso, o limite de 50 ms foi estabelecido inicialmente por Thiele (Long, 2005) durante a formulação da Definição justamente por representar o limiar da perturbação psicoacústica.

O limite de 80 ms aparece inicialmente na formulação da Claridade nos trabalhos de Reichard visando estabelecer a conexão com a percepção humana não apenas com a fala, mas também com a música. A conclusão para o estabelecimento do novo limite foi estabelecida a partir de resultados empíricos conduzidos durante a formulação do parâmetro da Claridade. Dessa forma, é estabelecido pela literatura que o limite de 50 ms é mais recomendado para o estudo da inteligibilidade da fala e o limite de 80 ms recomendado para o estudo da clareza da música (Reichardt, 1975).

As equações que definem os parâmetros descritos são mostradas abaixo (Brandão, 2018), onde os limites de 50 ms e 80 ms podem ser aplicados para os dois parâmetros. Apesar disso, faz-se a escolha por descrevê-los com os limites formulados originalmente pelos autores Thiele e Reichard, responsáveis pela descrição original da Definição e da Claridade, respectivamente.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50\text{ms}} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (11)$$

$$C_{80} = 10 \log \left( \frac{\int_0^{80\text{ms}} h^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} h^2(t) dt} \right) \quad (12)$$

O processo de medição direta da Claridade e Definição pode ser feito de forma idêntica ao tempo de reverberação. A partir da obtenção da função de resposta ao impulso ( $h(t)$ ) da sala de aula estudada, será possível obter o tempo de reverberação a Definição e Claridade, como descrevem as Equações 11 e 12. Também é possível obter uma relação direta entre a Claridade e a Definição considerando a Equação 13, que descreve a Claridade no limite de 50 ms, e a Equação 11.

$$C_{50} = 10 \log \left( \frac{\int_0^{50\text{ms}} h^2(t) dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} h^2(t) dt} \right) \quad (13)$$

Como mencionado anteriormente, a Claridade é obtida em termos da energia inicial e tardia, já a Definição, em termos da energia inicial e energia total. A relação entre essas grandezas é dada por:

$$\int_0^{\infty} h^2(t) dt = \int_0^{50\text{ms}} h^2(t) dt + \int_{50\text{ms}}^{\infty} h^2(t) dt \quad (14)$$

Ou seja, a energia total é a soma entre as energias inicial e tardia. Assim, a energia tardia

pode ser escrita em função dos outros dois termos:

$$\int_{50\text{ms}}^{\infty} h^2(t) dt = \int_0^{\infty} h^2(t) dt - \int_0^{50\text{ms}} h^2(t) dt \quad (15)$$

Substituindo a relação da Equação 15 em 13, temos:

$$C_{50} = 10 \log \left( \frac{\int_0^{50\text{ms}} h^2(t) dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} h^2(t) dt} \right) = 10 \log \left( \frac{\int_0^{50\text{ms}} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt - \int_0^{50\text{ms}} h^2(t) dt} \right) \quad (16)$$

Agora, com objetivo de introduzir o termo do  $D_{50}$ , divide-se o termo dentro do logaritmo na Equação 16 pela energia total:

$$C_{50} = 10 \log \left[ \left( \frac{\int_0^{50\text{ms}} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right) \left( \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) dt - \int_0^{50\text{ms}} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right)^{-1} \right] \quad (17)$$

A partir da Equação 11 e da simplificação do denominador, obtém-se a relação final entre a Claridade e a Definição:

$$C_{50} = 10 \log \left[ \left( \frac{\int_0^{50\text{ms}} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right) \left( 1 - \frac{\int_0^{50\text{ms}} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right)^{-1} \right] = 10 \log \left( \frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right). \quad (18)$$

### 2.3.3 Relação Sinal-Ruído (SNR)

A Relação sinal-ruído, em inglês *Signal-to-Noise Ratio*, consiste na medida quantitativa do sinal útil presente em um recinto durante uma atividade com emissão de sinal sonoro. De forma objetiva, se trata da relação entre a pressão sonora do sinal desejado e a potência do ruído de fundo. No caso da situação estudada, uma sala de aula, consiste na relação entre a pressão sonora provinda da fala do professor e o ruído de conversas paralelas, ventilador e ruído externo. Dessa forma, uma maior SNR está relacionada a uma maior inteligibilidade, visto que quanto menor for a relação, mais o sinal útil será mascarado pelo ruído de fundo (Bradley, John S, 1986a).

Para realizar a medição do SNR é preciso realizar a medição do ruído de fundo presente no recinto isoladamente. No caso das salas de aulas estudadas, é recomendável a medição do ruído de fundo com os ventiladores ligados e desligados. Assim, será possível estabelecer uma relação direta do impacto do ruído produzido pelos ventiladores na qualidade acústica das salas de aula. Posteriormente, deve-se realizar a medição do ruído com a inclusão do sinal útil.

Nesse caso, poderia ser uma fonte contínua de ruído calibrado para a dimensão espectral e de intensidade semelhante à presente na voz do professor durante a aula.

O cálculo da Relação sinal-ruído será uma relação entre os níveis de pressão sonoros equivalentes do sinal útil e do ruído de fundo em decibéis:

$$SNR = L_s - L_f \quad (19)$$

onde  $L_s$  é o nível de pressão sonora equivalente do sinal útil e  $L_f$  a pressão sonora equivalente do ruído de fundo. Durante a medição do sinal útil em sala, será obtido um nível equivalente ( $L_{s+f}$ ) referente a um sinal combinado entre o ruído rosa (útil) e o ruído de fundo. Para obter o nível equivalente apenas ao ruído rosa deve-se realizar a subtração logarítmica, dada pela Equação abaixo (Bistafa, 2018):

$$L_s = 10 \log \left( 10^{L_{s+f}/10} - 10^{L_f/10} \right) \quad (20)$$

A SNR se mostra um parâmetro fundamental visando uma análise satisfatória da qualidade acústica de um recinto, visto que se trata de um parâmetro objetivo capaz de mensurar o impacto do ruído de fundo na propagação de um sinal. A partir dele e da combinação com outros parâmetros, como a Claridade, é possível obter parâmetros relacionados diretamente com a inteligibilidade da fala, como será descrito a seguir. De qualquer forma, é possível encontrar relações diretas entre a SNR, a inteligibilidade da fala e qualidade de aprendizado de forma ampla na literatura. Como mostrado por (Klatte *et al.*, 2010), o bem-estar de crianças em sala de aula está ligado diretamente com uma SNR elevada.

#### 2.3.4 Useful to Detrimental Ratio ( $U_{50}$ )

De acordo com (Bradley, J., 1991), os parâmetros de Claridade ( $C_{50}$  e  $C_{80}$ ) e Definição ( $D_{50}$  e  $D_{80}$ ) apresentam, no geral, uma análise satisfatória na análise da inteligibilidade. Porém, foi constatado que a correlação entre os parâmetros citados e a inteligibilidade é consideravelmente afetada na presença de ruído de fundo. Por esse motivo, foi estabelecido o *Useful-To-Detrimental Ratio*, que consiste na combinação entre os parâmetros da Claridade ( $C_{50}$  e  $C_{80}$ ) e Relação Sinal-Ruído (SNR), definidos respectivamente pelas Equações 12 e 19 (Brandão, 2018). De acordo com (Bradley, J., 1991), o  $U_{50}$ , descrito pela Equação 21, apresentou grande correlação com a inteligibilidade da fala.

$$U_{50} = 10 \log \left[ \frac{10^{C_{50}/10}}{1 + (10^{C_{50}/10} + 1) \cdot 10^{-SNR/10}} \right] \quad (21)$$

O “Useful to detrimental ratio” ou Razão útil-prejudicial em tradução livre, busca ampliar o conceito contido na Clareza ( $C_{50}$ ) incluindo os efeitos do ruído de fundo (Bradley, John S, 1986a). Enquanto o  $C_{50}$  fornece a relação entre energia útil e prejudicial para a compreensão da fala, o  $U_{50}$  relaciona a grandeza com o impacto do ruído de fundo através da introdução do termo que inclui a relação sinal-ruído (SNR), definida como a relação entre a energia total do sinal (útil + prejudicial) com a energia do sinal do ruído de fundo.

Dessa forma, é evidente a relevância do  $U_{50}$  para a compreensão da qualidade acústica em uma sala de aula. Valores positivos demonstram que há maior energia referente ao sinal útil, como a voz do professor, se comparado com a energia referente ao ruído de fundo, onde valores elevados de  $U_{50}$  estão associados com um menor esforço dos indivíduos para a compreensão da fala (Bradley; Sato, 2008). Além disso, de acordo com (Cho, 2017), o  $U_{50}$  pode ser considerado tão efetivo para a análise da inteligibilidade quanto parâmetros mais robustos, como o STI, descrito a seguir.

A partir do  $U_{50}$ , foi desenvolvido por (Bradley, John S, 1986b) um parâmetro de “Inteligibilidade da Fala” (IF). Um parâmetro IF consiste da correlação entre um parâmetro objetivo e a inteligibilidade da fala obtida através de experimentos com pessoas no objeto de estudo. Para obtê-lo, é necessário conduzir medidas subjetivas com pessoas em uma variedade de salas, abrangendo diferentes condições acústicas. Posteriormente, é realizada a análise da relação estatística entre os resultados dos experimentos subjetivos, como o percentual de acerto de palavras e parâmetros acústicos objetivos conhecidos. Assim, com o ajuste experimental, é possível obter uma função que melhor descreva a relação entre os dados experimentais subjetivos e as métricas objetivas (Brandão, 2018). A função obtida por (Bradley, John S, 1986b) para a relação entre a IF (em percentual da inteligibilidade da fala) e o  $U_{50}$  é apresentada abaixo:

$$IF = -0,838U_{50}^2 + 1,027U_{50} + 99,420 \quad (22)$$

Através da função de ajuste entre dados subjetivos e medições objetivas, é possível obter um parâmetro de inteligibilidade da fala sem a necessidade de conduzir experimentos com pessoas em salas com diferentes condições acústicas. Porém, vale ressaltar que se trata de uma métrica obtida em parte por medidas subjetivas, portanto muitas vezes a correlação entre eles e os parâmetros objetivos pode não ser tão alta. Apesar de um parâmetro IF fornecer a possibilidade de estimar a inteligibilidade sem um experimento direto, os parâmetros objetivos são mais utilizados para a caracterização geral da qualidade acústica de uma sala, justamente por não depender de medidas subjetivas com indivíduos.

### 2.3.5 Speech Transmission Index (STI)

A modulação é um aspecto presente dos sinais de fala e refere-se à mudança de amplitude em relação ao tempo. O ruído referente a uma sílaba ou palavra apresenta a característica

da modulação, visto que as consoantes apresentam um ruído mais intenso e curto, enquanto as vogais apresentam um ruído mais prolongado e menos intenso. Um fator de grande relevância para a análise da inteligibilidade da fala em recintos é a preservação da energia das frequências de modulação da fala. A reverberação e o ruído de fundo presentes em um recinto tendem a diminuir a amplitude de modulação do ruído recebido pelos ouvintes. Isso tende a diminuir a diferença entre as amplitudes das consoantes e vogais longas no sinal recebido, o que prejudica a inteligibilidade da fala (Steeneken; Houtgast, 2002).

O Speech Transmission Index (STI) é um parâmetro estabelecido para a determinação da razão entre as frequências de modulação do impulso emitido e recebido. No caso de salas de aula, onde o foco é a análise de inteligibilidade da fala, é utilizado ruído de frequências de largura de 1 banda de oitava no intervalo de 125,00 Hz e 8000,00 Hz, presente no intervalo audível ao aparelho auditivo humano (Kuttruff; Vorländer, 2024). A partir disso, é realizada a modulação de cada uma das frequências presentes (7 ao todo), pelas frequências de 1 banda de oitava contidas nos intervalos de 0,63 Hz a 12,5 Hz. A escolha desse intervalo se deve à característica presente no ritmo da fala humana, onde as vogais prolongadas apresentam uma modulação lenta, entre os intervalos de aproximadamente 0,63 a 2 Hz e as consoantes apresentam uma modulação mais rápida, no intervalo de 4 a 12,5 Hz (Brandão, 2018).

A principal motivação para o desenvolvimento do STI nos trabalhos dos pesquisadores Herman J. M. Steeneken e Tammo Houtgast (Houtgast; Steeneken, 1985), foi o estabelecimento de um parâmetro para medição da inteligibilidade da fala que considerasse a característica da modulação (Steeneken; Houtgast, 2002). Anteriormente, muitas vezes eram realizados testes subjetivos envolvendo a sensibilidade de indivíduos para a estimativa da qualidade da fala em um recinto, o que gerava resultados pouco precisos e alto custo de realização. Além disso, testes de sensibilidade com pessoas não forneciam soluções para a melhoria da inteligibilidade da fala, visto que não havia a possibilidade de determinar o motivo para uma baixa qualidade acústica relatada pelos participantes (Steeneken; Houtgast, 2002).

A regulamentação da medição do STI é definida pela norma IEC 60268-16 (Commission *et al.*, 2003), que define os métodos direto e indireto. Em casos de medição experimental, recomenda-se o uso do método direto quando há a possibilidade de análise experimental do objeto estudado e para a garantia de maior precisão nos resultados obtidos. De acordo com a norma, deve-se utilizar 7 sinais de frequência centrados nas bandas de 1 oitava do intervalo de ruído audível (125,00 Hz e 8,00 kHz). Os sinais devem ser de característica anecoica, ou seja, sem a interferência das características do recinto (Brandão, 2018).

Cada um dos 7 sinais anecoicos deverão ser modulados nas 14 frequências centrais de banda de 1 oitava das frequências de modulação da fala (0,63 Hz a 12,5 Hz). Portanto, serão obtidos 98 sinais modulados  $x_{k,m}(t)$ , sendo  $k$  o índice do sinal anecoico  $x_k(t)$ . A expressão para obtenção do  $x_{k,m}(t)$  é descrita abaixo (Brandão, 2018):

$$x_{k,m}(t) = x_k(t) \sqrt{1 + m_x \cos(2\pi f_m t)}, \quad (23)$$

onde  $m_x$  é a amplitude do sinal modulado e  $f_m$  a frequência de modulação do sinal.

Após a obtenção dos sinais modulados, deve-se expor o ruído às características da sala, considerando o ruído de fundo e a reverberação. O sinal obtido ( $y_{k,m}(t)$ ) será o resultado de uma operação de convolução entre o sinal modulado ( $x_{k,m}(t)$ ) e a resposta ao impulso da sala ( $h(t)$ ), como mostra a Equação 1. Isso se deve ao fato de que toda a informação acerca da característica geométrica e de absorção de um recinto está contida na resposta ao impulso visto que a sala pode ser considerada um SLIT.

A partir dos sinais obtidos, o passo seguinte consiste na obtenção da intensidade do sinal variável no tempo, que pode ser obtida a partir do quadrado do valor RMS. Para os sinais anecoicos com e sem modulação, as intensidades são dadas pelas expressões abaixo (Kuttruff; Vorländer, 2024):

$$\bar{I}_{k,m-x} = (x_{k,m}(t)^{RMS})^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x_k^2(t) dt \quad (24)$$

$$\bar{I}_{k-x} = (x_k(t)^{RMS})^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x_k^2(t) dt \quad (25)$$

Além disso, a relação entre as duas grandezas é:

$$I_{k,m-x}(t) = \bar{I}_{k-x}[1 + m_x \cos(2\pi f_m t)], \quad (26)$$

sendo  $m_x$  a amplitude de modulação do sinal anecoico modulado. Para o sinal final  $y_{k,m}(t)$  a intensidade  $I_{k,m-y}(t)$  será dada pela seguinte relação com a intensidade do sinal anecoico (Kuttruff; Vorländer, 2024):

$$I_{k,m-y}(t) = \bar{I}_{k-x}[1 + m_y \cos(2\pi f_m t)], \quad (27)$$

Em seguida, os sinais dados nas Equações 26 e 27 são obtidos com o uso de um filtro passa-baixa com frequência de corte inferior a 100 Hz. Assim, é possível obter a envoltória energética  $I_{k,m-x_e}(t)$  e  $I_{k,m-y_e}(t)$ , dos sinais modulados  $I_{k,m-x}(t)$  e  $I_{k,m-y}(t)$ , respectivamente.

Assim, é possível obter as amplitudes de modulação do sinal anecoico ( $m_{x_{k,m}}$ ) e do sinal final obtido ( $m_{y_{k,m}}$ ) modulados, mostrados pelas Equações 28 e 29, respectivamente (Brandão, 2018).

$$m_{x_{k,m}} = \frac{2\sqrt{(\sum I_{k,m-x_e}(t) \sin(2\pi f_m t))^2 + (\sum I_{k,m-x_e}(t) \cos(2\pi f_m t))^2}}{\sum I_{k,m-x_e}(t)}; \quad (28)$$

$$m_{y_{k,m}} = \frac{2\sqrt{(\sum I_{k,m-y_e}(t) \sin(2\pi f_m t))^2 + (\sum I_{k,m-y_e}(t) \cos(2\pi f_m t))^2}}{\sum I_{k,m-y_e}(t)}. \quad (29)$$

A razão entre os índices de modulação é dado pela Equação 30. A norma define o valor de  $I_{a_k}$  como a intensidade do efeito de mascaramento e  $I_{r_k}$  como a intensidade do limiar de recepção da referida banda (Brandão, 2018).

$$m_{k,m} = \frac{m_{y_{k,m}}}{m_{x_{k,m}}} \cdot \frac{I_{k,m-y}(t)}{I_{k,m-y}(t) + I_{a_k} + I_{r_k}} \quad (30)$$

Além disso, a norma ainda define alguns valores relevantes para o cálculo final do STI. O primeiro deles é a relação sinal-ruído efetiva, dada pela Equação 31 (Brandão, 2018).

$$SNR_{\text{efetiva}_{k,m}} = 10 \log \left( \frac{m_{x_{k,m}}}{m_{x_{k,m}} - m_{y_{k,m}}} \right) \quad (31)$$

Adicionalmente, é definido o Índice de Transmissão (*Transmission Index*) ( $TI_{k,m}$ ), dado por (Brandão, 2018):

$$TI_{k,m} = \frac{SNR_{\text{efetiva}_{k,m}} + 15.0}{30.0} \quad (32)$$

No cálculo final do STI, porém, são considerados apenas a média aritmética dos  $TI_{k,m}$  correspondentes às frequências de modulação para cada frequência de banda de 1 oitava dos sinais anecoicos originais. Isso faz com que resulte 7 médias finais, definidas pela expressão abaixo (Brandão, 2018):

$$MTI_k = \frac{1}{14} \sum_{m=1}^{14} TI_{k,m}, \quad \text{com } k = \{1, 2, \dots, 7\} \quad (33)$$

Com isso, o STI pode ser obtido, como mostra a Equação 34. Nota-se que o STI é obtido através da combinação linear dos  $MTI_k$  obtidos pela Equação 33 (Brandão, 2018).

$$STI = \sum_{k=1}^7 \alpha_k MTI_k - \sum_{k=1}^6 \beta_k \sqrt{MTI_k MTI_{k+1}}, \quad (34)$$

Os valores para os parâmetros  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  são definidos pela norma ISO 3382-1, sendo obtidos de forma empírica por meio de estudos de Inteligibilidade da fala. Os valores utilizados para os resultados obtidos neste trabalho são mostrados na Tabela 1 (ISO3382-1:2009).

Tabela 1: Coeficientes  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  por banda de frequência

| (a) Valores de $\alpha_k$ |            | (b) Valores de $\beta_k$ |           |
|---------------------------|------------|--------------------------|-----------|
| Frequência (Hz)           | $\alpha_k$ | Frequência (Hz)          | $\beta_k$ |
| 125                       | 0,13       | 125–250                  | 0,11      |
| 250                       | 0,14       | 250–500                  | 0,12      |
| 500                       | 0,11       | 500–1000                 | 0,11      |
| 1000                      | 0,12       | 1000–2000                | 0,16      |
| 2000                      | 0,19       | 2000–4000                | 0,16      |
| 4000                      | 0,17       | 4000–8000                | 0,14      |
| 8000                      | 0,14       |                          |           |

## 2.4 Just Noticeable Difference (jnd)

Na análise comparativa dos parâmetros acústicos de diferentes recintos, a divergência numérica entre os parâmetros objetivos medidos não implica, necessariamente, em uma mudança auditiva percebida pelos usuários. Para contextualizar a relevância das variações encontradas entre as salas estudadas, utiliza-se o conceito de Just Noticeable Difference (jnd). Este índice quantifica a menor variação em um parâmetro acústico que pode ser detectada pelo sistema auditivo humano (Brandão, 2018).

A aplicação do jnd apresenta uma grande relevância para a análise dos valores dos parâmetros acústicos, pois estabelece um limiar de significância referente à audição humana. Se a diferença entre os valores de um determinado parâmetro medidos em dois ambientes distintos for inferior ao valor de jnd estabelecido para aquela grandeza, considera-se que não há diferença perceptível para os ouvintes, mesmo que os valores numéricos não sejam idênticos. Por outro lado, variações superiores ao jnd indicam uma alteração clara na percepção da qualidade acústica ou da inteligibilidade da fala. Além disso, é possível utilizar o jnd para validar a qualidade das medidas obtidas, visto que duas medidas realizadas nas mesmas condições devem apresentar valores inferiores ao jnd do parâmetro em questão para serem consideradas válidas.

Tabela 2: Valores de jnd para os parâmetros acústicos analisados (Brandão, 2018).

| Parâmetro | jnd          |
|-----------|--------------|
| $T_{60}$  | 5% da medida |
| $C_{50}$  | 1 dB         |
| $D_{50}$  | 0,05         |
| STI       | 0,03         |
| $U_{50}$  | 1 dB         |

De acordo com a norma ISO 3382-1, os valores de jnd variam conforme a natureza do parâmetro. Para o Tempo de Reverberação ( $T_{60}$ ), a percepção é relativa, sendo o jnd definido como uma porcentagem do valor medido. Já para parâmetros de energia como a Claridade ( $C_{50}$ )

e a Definição ( $D_{50}$ ), o jnd é estabelecido em valores absolutos. Para o Índice de Transmissão da Fala (STI), a norma IEC 60268-16 sugere um valor de referência para a percepção de mudanças na inteligibilidade.

## 2.5 Características do espectro da fala

A distribuição de energia e informação na fala não é uniforme ao longo do espectro de frequências audíveis, portanto determinadas faixas de frequências são mais relevantes que outras para definir a forma de um sinal sonoro. Para contextualizar a relevância de cada banda de frequência na compreensão das fala, é amplamente utilizada na audiolgia e na acústica a chamada “Speech Banana”, mostrada na Figura 4. Este gráfico sobrepõe a região de ocorrência dos fonemas e formantes da fala a um audiograma padrão, relacionando a frequência com o nível de pressão sonora (Klangpornkun *et al.*, 2013).

A região de baixas e médias frequências, tipicamente entre 250 Hz e 1000 Hz, concentra a maior parte da energia acústica da voz. Conforme ilustrado no gráfico, esta área engloba a frequência fundamental dos sons vozeados ( $F_0$ ) e as primeiras áreas formantes de vogais ( $F_1$  e  $F_2$ ). Do ponto de vista da acústica de salas, estas frequências são responsáveis pela percepção de volume e pela detecção da presença da voz. No entanto, apesar de carregarem a maior potência sonora, as vogais contribuem proporcionalmente menos para a inteligibilidade do discurso, servindo primariamente como portadoras do sinal.

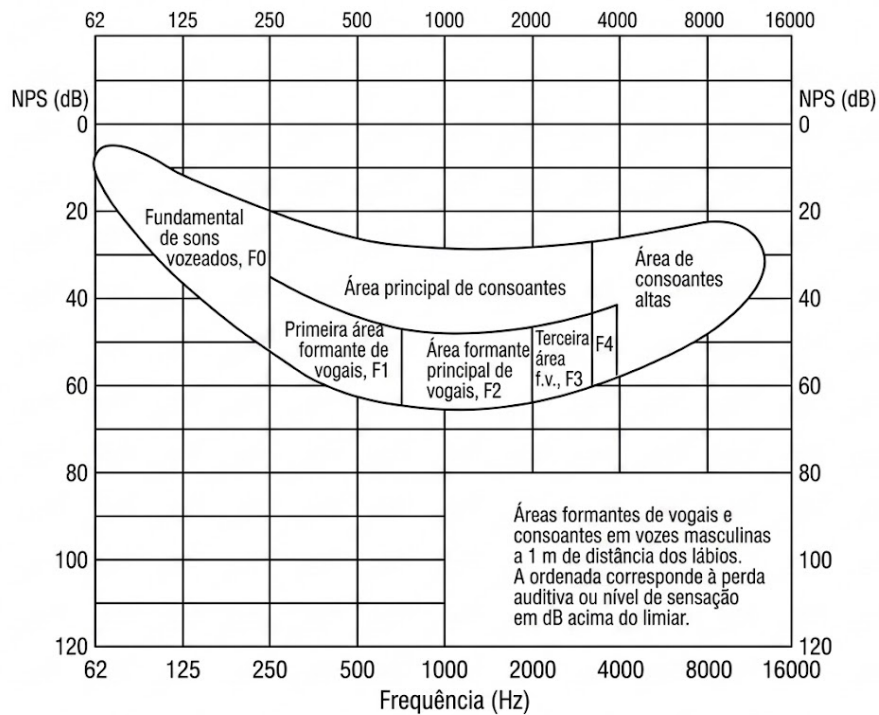


Figura 4: Distribuição espectral dos componentes da fala: relação entre frequência (Hz) e nível de pressão sonora (dB) (Klangpornkun *et al.*, 2013).

Em contrapartida, a região de altas frequências, estendendo-se de 2000 Hz a 8000 Hz, abriga a “área de consoantes altas” e formantes superiores ( $F_3$ ,  $F_4$ ). Como observado na Figura 4, estes componentes possuem níveis de pressão sonora significativamente menores em comparação às vogais. Contudo, é nesta região espectral que reside a maior parte da informação necessária para a distinção de palavras e, conseqüentemente, para a inteligibilidade. As consoantes sibilantes e fricativas, por serem sons de baixa energia e curta duração, são os primeiros componentes a serem mascarados por ruídos de fundo de baixa frequência ou absorvidos excessivamente em salas mal projetadas.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Descrição das salas de aula estudadas

A escolha das salas de aula que seriam objeto de estudo se deu a partir da análise das soluções acústicas presentes em cada prédio de Aulas Teóricas (ATs) do campus São Carlos da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Atualmente, existem 8 prédios destinados para aulas teóricas na UFSCar, utilizados para a grande maioria das aulas ministradas pelos cursos presenciais oferecidos pela instituição. A Tabela 3 mostra o revestimento acústico predominante em cada um dos ATs, onde é possível notar a existência de duas soluções distintas entre os prédios e uma situação de ausência de solução acústica.

Tabela 3: Soluções acústicas predominantes utilizadas por cada prédio de Aulas Teóricas (AT) do Campus São Carlos da UFSCar.

| Prédio de Aulas Teóricas (AT) | Solução acústica   |
|-------------------------------|--------------------|
| AT1                           | Celulose projetada |
| AT2                           | Celulose projetada |
| AT4                           | Celulose projetada |
| AT5                           | Celulose projetada |
| AT7                           | Não há             |
| AT8                           | Não há             |
| AT9                           | Não há             |
| AT10                          | Forro de fibra     |

A partir disso, fez-se a escolha por analisar as três situações distintas disponíveis, com as medições sendo realizadas em salas do AT5, AT9 e AT10. Dessa forma, é possível comparar o desempenho de salas de aula com dois revestimentos distintos (forro e celulose) e uma sala de aula sem revestimento acústico, com o intuito de mensurar a eficiência das soluções aplicadas e os efeitos negativos à acústica oriundos de uma sala sem revestimento.

Outro fator relevante para a escolha das salas de estudo são as dimensões. Procurou-se escolher salas em cada um dos ATs escolhidos com a capacidade entre 40 e 50 alunos, visto que esse é o limite de alunos estabelecido nos cursos pela maioria dos departamentos da instituição. Constatou-se que a maioria das salas dessa capacidade apresentam área disponível entre 60 e 70 m<sup>2</sup>, onde as dimensões de comprimento e largura variam entre diferentes ATs. Com base nessa análise, foram escolhidas as salas 229 do AT10, 111 do AT5 e 215 do AT9 como objeto de estudo.

A escolha das posições das fontes e receptores foram realizadas a partir das especificações presentes na norma ISO 3382-2 (**ISO3382-2:2008**), onde são definidos critérios mínimos para a posição, altura e quantidade de fontes e medição. Nesse sentido, são requisitados pelo menos 6 configurações fonte-receptor, porém recomenda-se duas posições de fontes para a garantia de resultados mais robustos. No trabalho em questão, fez-se a escolha pela utilização de 2 posições

de fonte e 4 posições de receptores para cada posição de fonte, totalizando 8 configurações de fonte-receptor por sala.

As Figuras 5 e 8 mostram a planta-baixa das salas escolhidas do AT5 e AT10, bem como as posições utilizadas para as fontes ( $F_{1-2}$ ) e receptores ( $R_{1-4}$ ). Já as Figuras 6 e 7 representam a planta-baixa da sala escolhida para medição no AT9 com duas disposições distintas de fonte-receptor. A sala em questão (AT9 215) apresenta a maior dimensão sendo a horizontal, ao contrário das salas escolhidas nos demais ATs, sendo essa uma característica geral dos projetos de salas de cada AT. Assim, fez-se a escolha pela realização de medições considerando a fonte em posições comuns aos professores durante a realização das aulas (Figura 6) e pela configuração com dimensões semelhantes às demais salas, com a direção fonte-receptor presente através da dimensão horizontal da sala (Figura 7).

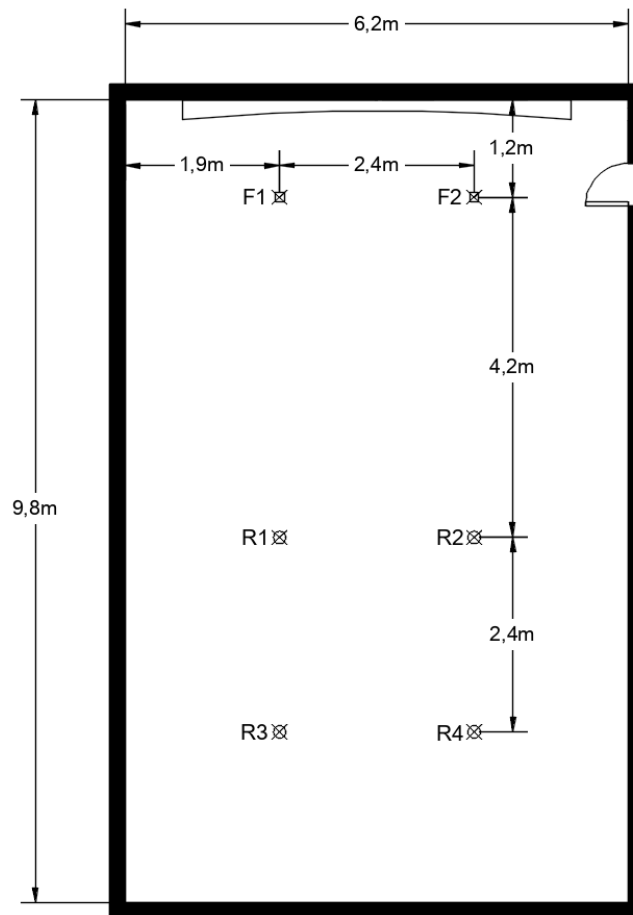


Figura 5: Planta baixa da sala de aula 111 do AT5 e posições dos postos de medição: fonte sonora ( $F_{1-2}$ ) e receptores ( $R_{1-4}$ ).

No caso de medições de parâmetros acústicos em salas de aula, a norma ISO 3382-2 especifica que as posições escolhidas para as fontes devem simular a atuação de um professor em aula. Assim, é determinada a altura de 1,5 m acima do solo para captação e a posição específica da fonte em relação às dimensões da sala pode ser de livre escolha, desde que se

restrinja a posições onde o professor costuma estar presente em aula. Nas medições em sala, foram definidas duas posições de fonte, localizadas à 1,2 m desde o centro da largura da sala tanto para a direita quanto para a esquerda, fazendo com que a distância entre as posições seja de 2,4 m. Além disso, foi estabelecido uma distância de 1,2 m da parede mais próxima.

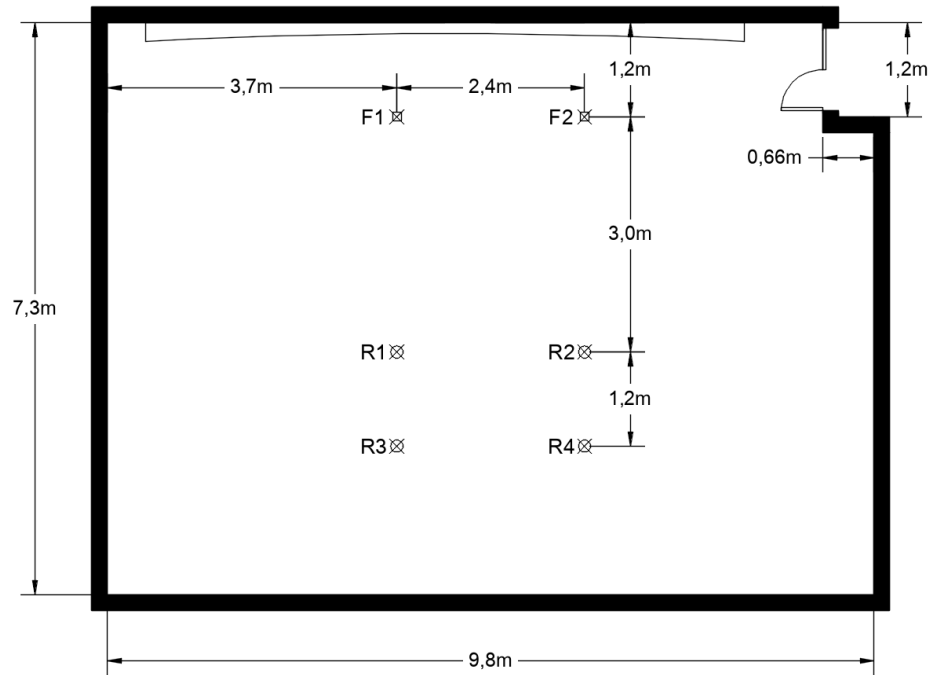


Figura 6: Planta baixa da sala de aula do AT9 na configuração 1 e posições dos postos de medição: fonte sonora ( $F_{1-2}$ ) e receptores ( $R_{1-4}$ ).

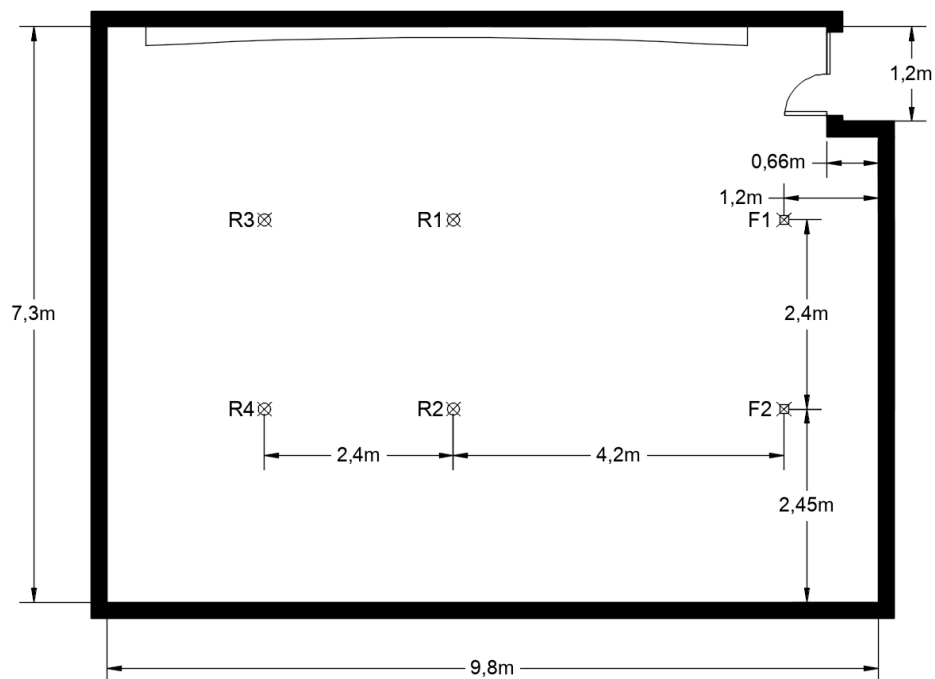


Figura 7: Planta baixa da sala de aula do AT9 na configuração 2 e posições dos postos de medição: fonte sonora ( $F_{1-2}$ ) e receptores ( $R_{1-4}$ ).

Em relação às posições dos receptores, foram definidos para o AT5, AT10 e AT9 (Configuração 2) distâncias de 4,2 m e 6,6 m a partir do mesmo eixo das fontes, totalizando 4 posições de captação. As dimensões de distância diferem no caso da sala do AT9 (Configuração 1) (Figura 6) devido a limitação da dimensão vertical de apenas 7,3 m em comparação aos 9,7 m e 9,8 m das demais salas. Como a norma ISO 3382-2 estabelece que os receptores e fontes devem permanecer à uma distância maior que 1 metro a qualquer superfície, foi necessário reduzir as distâncias dos receptores à fonte no caso do AT9 na configuração 1, onde foram estabelecidas as dimensões de 3,0 m e 4,2 m nos mesmos eixos das fontes.

A escolha de realizar as medições no AT9 com duas configurações fonte-receptor distintas se deu pela busca em preservar a tentativa de simulação do professor em sala (Configuração 1) e em preservar as dimensões utilizadas nas salas dos demais ATs (Configuração 2). Dessa forma, a partir dos resultados para cada configuração, busca-se discutir o impacto da distância da fonte ao receptor e da configuração de emissão do sinal útil na qualidade acústica de uma sala de aula.

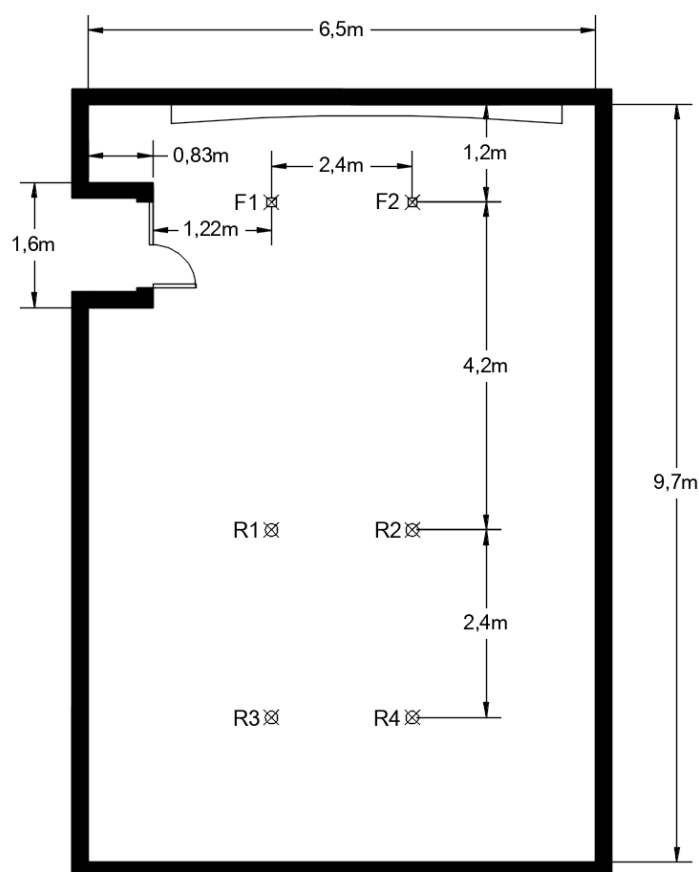


Figura 8: Planta baixa da sala de aula 229 do AT10 e posições dos postos de medição: fonte sonora ( $F_{1-2}$ ) e receptores ( $R_{1-4}$ ).

### 3.2 Procedimento de medição e equipamentos

A principal grandeza a ser medida na sala foi a Resposta ao Impulso ( $h(t)$ ), visto que a maior parte dos parâmetros utilizados para caracterizar a propagação sonora de um recinto provém dela. Para a excitação acústica dos recintos, optou-se pela utilização de um ruído impulsivo gerado pelo estouro de balões, devido ao fácil acesso, manipulação e custo. Além disso, essa técnica é documentada na literatura como uma alternativa viável, em que os requisitos para definição de um ruído impulsivo são atingidos. O estouro de balões produz um ruído de largo espectro e curtíssima duração, sendo caracterizado de forma inequívoca como um ruído impulsivo (Pätynen; Katz; Lokki, 2011). Contudo, o uso de estouro de balões apresenta uma limitação clara por não ser uma fonte completamente omnidirecional e pela baixa repetibilidade do nível de pico. Esses fatores podem comprometer a relação sinal-ruído (SNR) da medição, especialmente em bandas de frequências não médias, visto que o estouro tem uma maior tendência de omnidirecionalidade em frequências médias (Pätynen; Katz; Lokki, 2011).

Para a captação da resposta acústica, foram utilizado dois microfones de 1/2" calibrados e com pré-amplificador, modelo 46AE (GRAS Sound & Vibration, s.d.) com pré-amplificador acoplados a um módulo de aquisição de dados 4 canais dB4 (ACOEM), com modelo de software

de pós-processamento dBFA (ACOEM) (01dB-Metravib, 2008), que operou como interface de áudio para a digitalização da forma de onda. O software associado a esta interface foi utilizado estritamente para a captura do sinal e armazenamento do áudio da resposta impulsiva em arquivo digital. Além disso, foi utilizada uma caixa de som comercial comum para a produção do ruído útil do professor. Todo o pós-processamento, manipulação da resposta ao impulso e da extração dos parâmetros acústicos apresentados não foram realizados em software comercial, mas sim por meio de métodos computacionais, desenvolvidos em linguagem Python. Através disso, foram implementados para ler os arquivos de áudio, aplicar a filtragem digital em bandas de oitava e calcular os parâmetros objetivos com base nas formulações matemáticas descritas na seção de fundamentação teórica.

### 3.3 Desenvolvimento

O processo para a obtenção dos parâmetros objetivos se inicia a partir da manipulação do arquivo contendo o decaimento sonoro na sala. O decaimento proveniente de um ruído impulsivo, chamado de resposta ao impulso, é caracterizado por um pico de curta duração seguido por uma cauda reverberante que caracteriza como a sala reage a emissão de ruído, sendo constituído pelas reflexões do som nos elementos e limites. As Figuras 10 a1, b1 e c1 representam, respectivamente, a resposta ao impulso em  $Pa$  normalizado obtido a partir da captação do ruído impulsivo nas salas do AT5, AT9 e AT10. Através delas, é possível notar diretamente que a sala do AT9 apresenta uma característica mais reverberante em comparação com as outras salas estudadas, visto que a cauda reverberante é mais prolongada.

De forma complementar, as Figuras 10 a2, b2 e c2 representam a resposta ao impulso global em nível de pressão sonora (NPS), também chamada de curva de energia instantânea, para cada uma das salas estudadas. Os valores são obtidos a partir da queda em relação ao máximo valor de pressão sonora, por isso apresentam valores negativos. A curva de resposta ao impulso em dB possibilita visualizar a cauda reverberante de forma mais visual, além de determinar de forma mais eficiente sua duração a partir do comportamento linear da curva desde o impulso até alcançar o nível global de ruído de fundo. Assim como na curva em  $Pa$  normalizado, é possível notar uma maior duração do comportamento de decaimento linear na resposta ao impulso da sala do AT9, o que evidencia o impacto da ausência de revestimento acústico na reverberação da sala.

A função de resposta ao impulso na forma curva de decaimento relativo possibilita estudar a reverberação através de um comportamento linear, diferentemente da característica exponencial do decaimento em pressão sonora. Assim, utilizando a Equação 6, foi obtida a curva de Schroeder para cada banda de frequência de oitava. A Figura 9 mostra a combinação entre a curva de energia instantânea e a envoltória de Schroeder para a sala do AT10 para as frequências de 250 Hz (a) e 4000 Hz (b). Essas curvas correspondem à curva da Figura 10 (c2) após a aplicação do filtro passa-banda para as bandas de oitava.

A partir da análise da Figura 9 (b), correspondente ao decaimento de um ruído agudo

(4000 Hz), é possível constatar um decaimento suave e uma curva de energia instantânea menos densa em comparação com o decaimento do ruído grave da Figura 9 (a). Isso ocorre pois sinais de baixas frequências têm uma menor tendência de uma menor densidade de reflexões devido ao comprimento de onda mais elevado em relação aos sinais de alta frequência. Além disso, o decaimento mais suave para o sinal de 250 Hz indica que o valor máximo do nível de pressão sonora do ruído está mais próximo do nível equivalente de fundo, resultando em um achatamento da curva em valores de dB mais baixos.

Adicionalmente, o comportamento distinto das curvas de Schroeder evidencia a forte dependência de frequência da absorção acústica do recinto. O decaimento mais linear na banda de 4000 Hz indica um  $T_{60}$  significativamente mais curto. Essa característica é uma consequência da maior eficiência de absorção sonora dos materiais porosos e da absorção do ar, que se torna relevante em altas frequências. Em comparação, a inclinação mais suave na curva referente à banda de 250 Hz indica uma menor absorção do sinal, visto que os materiais de alvenaria convencionais são tipicamente mais reflexivos e menos eficientes na dissipação de energia em baixas frequências. Portanto, independente da solução acústica utilizada no recinto, há a tendência de uma maior absorção de sinal em altas frequências.

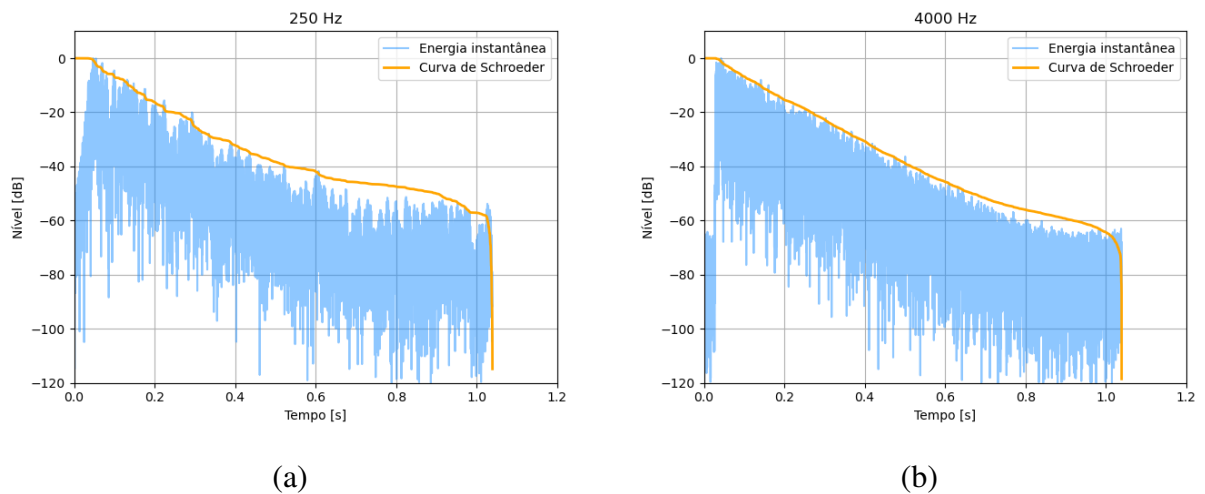
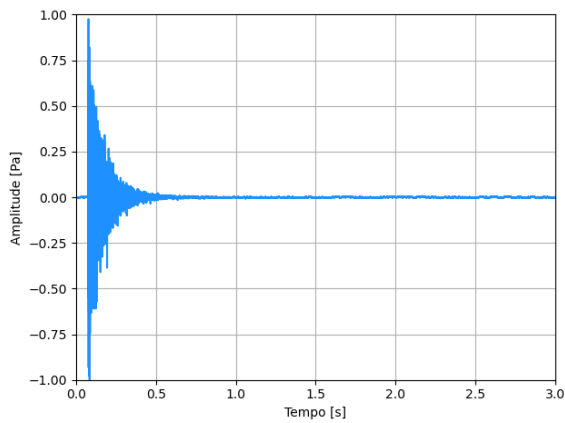
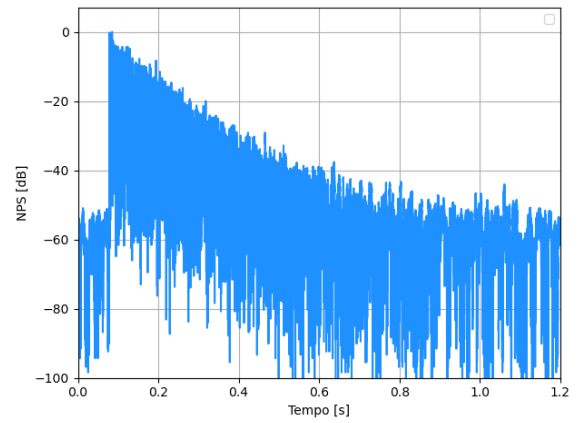


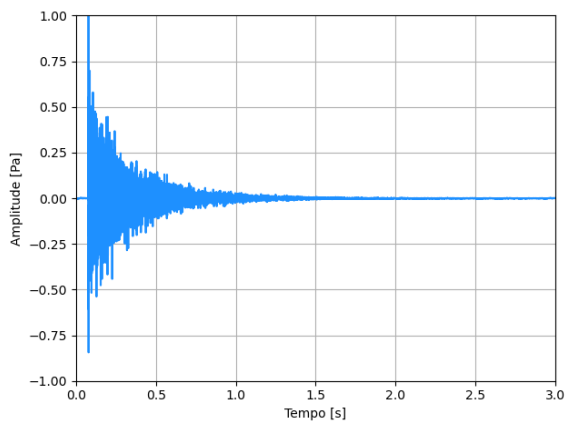
Figura 9: Resposta ao impulso juntamente com a envoltória (curva de Schroeder) para o sinal filtrado em duas bandas de oitava, 250 Hz (a) e 4000 Hz (b).



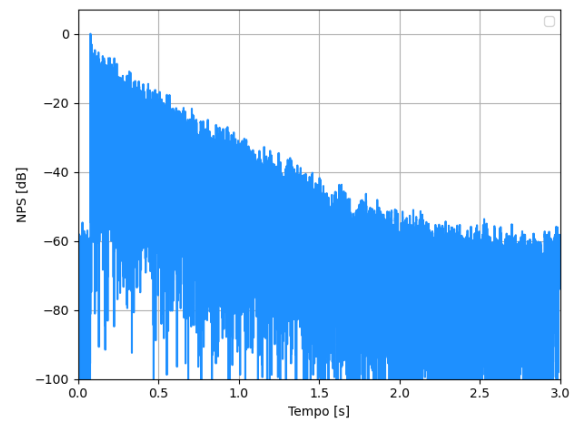
(a1)



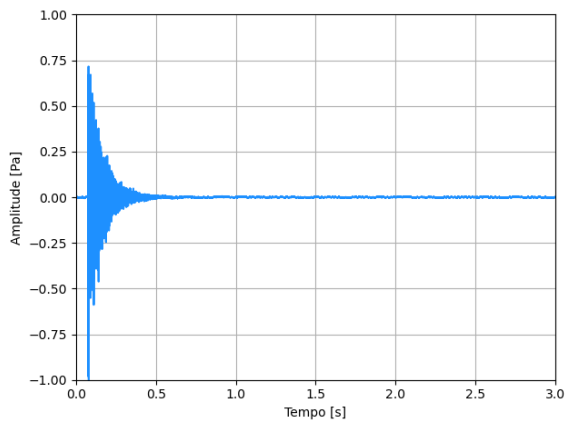
(a2)



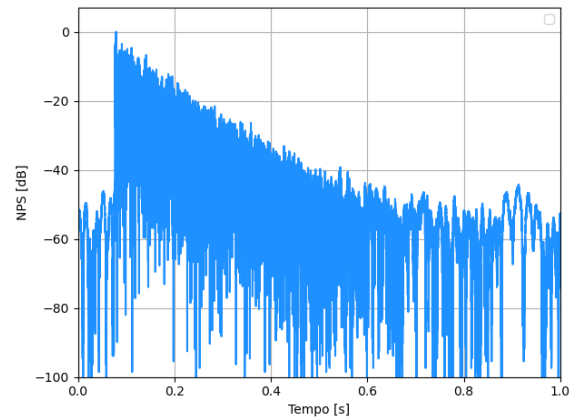
(b1)



(b2)



(c1)



(c2)

Figura 10: Função de resposta ao impulso  $h(t)$  em unidades de pressão sonora (a1, b1, c1) e nível de pressão sonora em decibéis (a2, b2, c2). As figuras a1 e a2 se referem à sala do AT5, as figuras b1 e b2 se referem ao AT9 e a c1 e c2 se referem à sala do AT10.

A comparação também pode ser feita para a resposta ao impulso e curva de Schroeder entre diferentes salas com revestimentos acústicos distintos. A Figura 11 mostra a característica do decaimento das salas do AT5 (a) e AT9 (b), medida com a configuração fonte-receptor 1.

A maior duração do decaimento linear do sinal no AT9, tendo mais que o dobro de duração se comparado ao AT5, evidencia o impacto negativo da ausência de revestimentos acústicos na duração da reverberação do sinal.

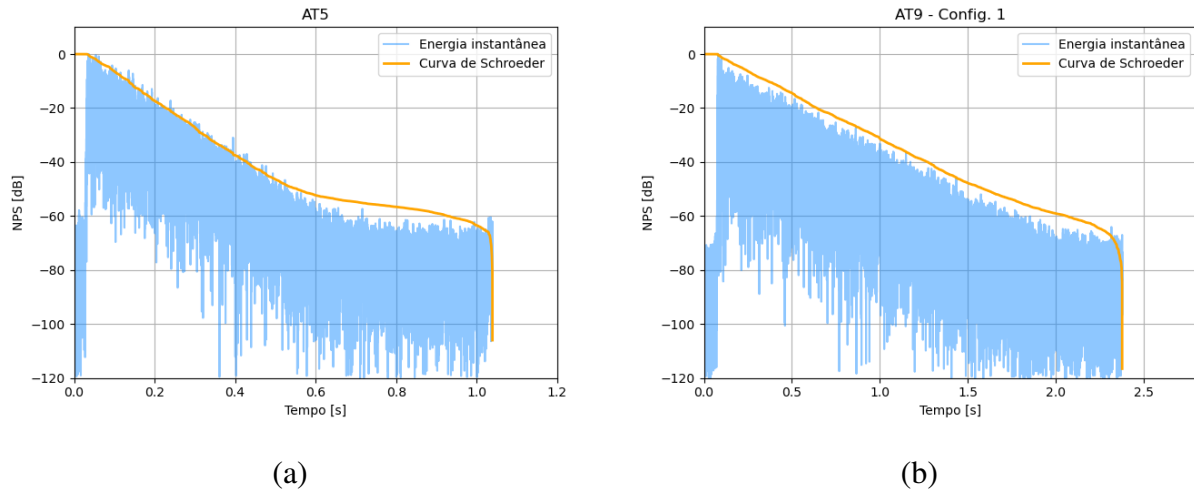


Figura 11: Resposta ao impulso juntamente com a envoltória (curva de Schroeder) para o sinal filtrado na banda de 2000 Hz para duas das salas de aula estudadas: AT5 (a) e AT9 na configuração fonte-receptor 1 (b).

Após a obtenção da curva de Schroeder, é possível utilizá-la para obter o  $T_{60}$  a partir do ajuste linear dentro do intervalo da faixa dinâmica. A Figura 12 mostra o ajuste linear, juntamente com o nível equivalente de fundo e a faixa dinâmica para o cálculo do tempo de reverberação para as respostas ao impulso das apresentadas na Figura 11. Para o caso do AT5, após considerar o NPS equivalente de fundo para a banda de 2000 Hz e as margens de transição de 15 dB e 5 dB, obteve-se uma faixa dinâmica entre 45 dB e 50 dB. Nesse caso, foi utilizado o método do  $T_{20}$  para a projeção do valor de  $T_{60}$  para garantir o mesmo método para todas as salas e bandas de frequências.

Para o AT9, constatou-se um menor NPS equivalente de fundo, o que proporcionou uma faixa dinâmica mais elevada e próxima de 60 dB. Em relação ao valor do  $T_{60}$ , obteve-se um valor quase 3 vezes maior para o AT9 ( $T_{60} = 1,74s$ ) em relação ao AT5 ( $T_{60} = 0,58s$ ), o que indica uma satisfatória eficiência do revestimento de celulose projetada, presente no AT5, para a redução do  $T_{60}$  na banda de 2000 Hz. De forma complementar, é mostrado no Apêndice A (Figuras 24, 25, 26 e 27), os gráficos referentes ao ajuste linear da envoltória de  $h(t)$ , além da representação da faixa dinâmica e do valor de  $T_{60}$  obtido para os 4 objetos de estudo em cada banda de oitava para a medição referente à posição fonte-receptor F1R1. O desenvolvimento foi o mesmo para as outras 7 configurações de medição mostradas nas Figuras 5, 8, 6 e 7.

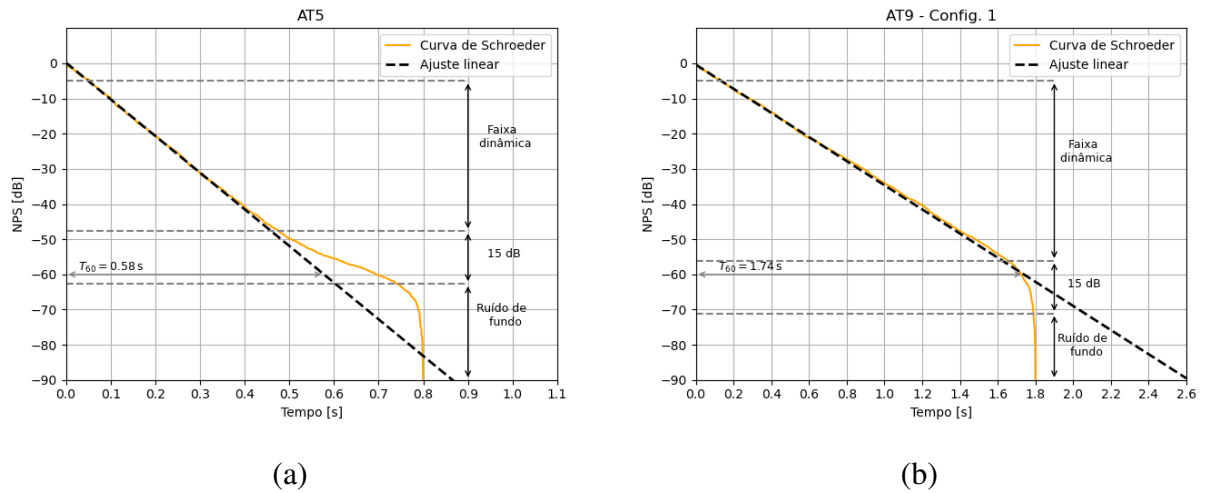


Figura 12: Envoltória da  $h(t)$  (curva de Schroeder) e ajuste linear para estimativa do valor do  $T_{60}$  na banda de 2000 Hz para duas das salas de aula estudadas: AT5 (a) e AT9 na configuração fonte-receptor 1 (b).

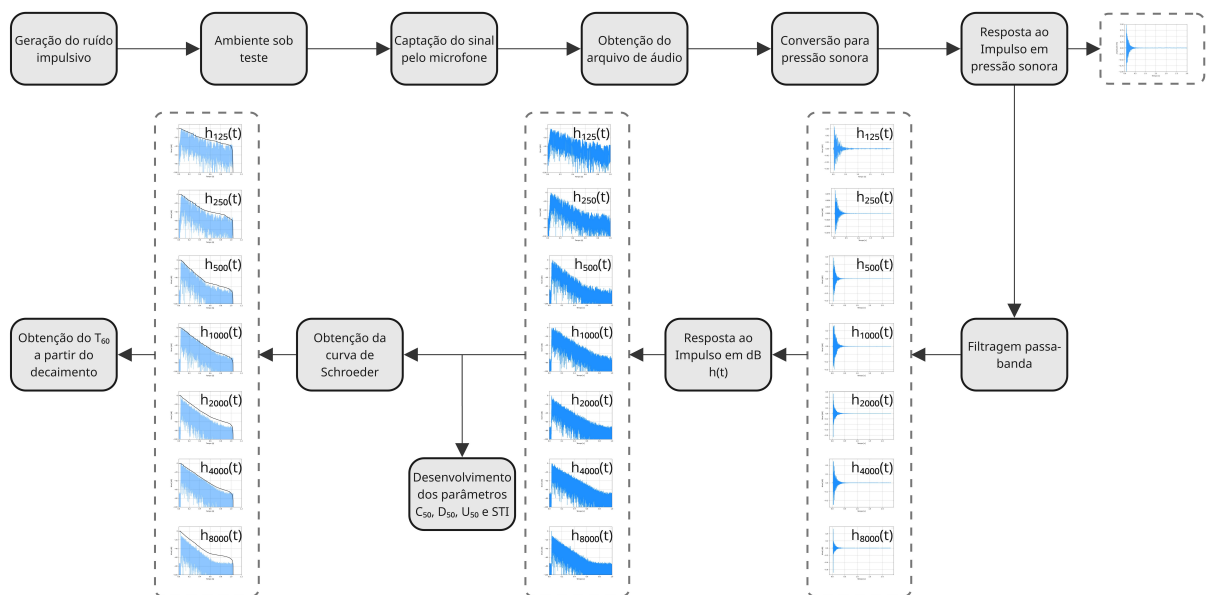


Figura 13: Diagrama do fluxo de desenvolvimento desde do procedimento experimental até a obtenção dos parâmetros apresentados.

Além do  $T_{60}$ , os parâmetros objetivos da Claridade ( $C_{50}$ ), Definição ( $D_{50}$ ), Useful to Detrimental Ratio ( $U_{50}$ ) e Speech Transmission Index (STI) são derivados da resposta ao impulso filtrada, denotada na seção 2 por  $h(t)$ . Dentre os parâmetros apresentados anteriormente, a exceção é a Relação Sinal-Ruído, que utiliza os valores de NPS equivalentes do ruído útil e de fundo, apesar de estar presente no cálculo do  $U_{50}$ . O diagrama da Figura 13 mostra de forma resumida e visual, o fluxo de desenvolvimento dos resultados desde a coleta experimental no ambiente de estudo expandido anteriormente. De forma complementar, é mostrado no Apêndice A (Figura 23), a função  $h(t)$  juntamente com a curva de Schroeder para cada uma das salas es-

tudadas em cada banda de oitava. O resultado se refere à medição F1R1 (fonte-receptor), porém o processo é análogo para as demais medições.

No desenvolvimento do cálculo do STI, após a obtenção das  $h(t)$  para cada banda de frequência, são gerados sinais anecoicos para cada banda de oitava. Após isso, esses sinais são modulados em 14 frequências de modulação e é realizada a operação de convolução entre estes sinais e a  $h(t)$ . Visando complementar o processo de desenvolvimento do STI, são mostrados no Apêndice B, os sinais anecoicos (Figura 28) gerados computacionalmente para o cálculo do STI. Além disso, são mostrados os sinais resultantes das operações de convolução entre o sinal anecoico da banda 1000 Hz modulado e a  $h(t)$  referente à banda de 1000 Hz da medição F1R1 do AT10.

### 3.4 Critérios de avaliação

A simples apresentação dos valores numéricos dos parâmetros objetivos, por si só, é insuficiente para um diagnóstico conclusivo da performance acústica de um recinto. O estabelecimento de critérios de avaliação claros é de fundamental importância, pois confere significado prático e contextualiza esses dados quantitativos. A partir dessa referência, é possível estabelecer classificação qualitativa em que é possível relacioná-la diretamente ao objetivo de uso do espaço, que, neste caso, consiste na garantia da inteligibilidade da fala e conforto acústico em salas de aula, visando o bem-estar dos alunos no ambiente de aprendizado. Com isso, a avaliação qualitativa possibilita uma maior compreensão do desempenho acústico de cada ambiente, permitindo uma comparação objetiva entre as diferentes soluções e a validação de sua eficácia.

A Tabela 4 mostra os intervalos de valores de Tempo de Reverberação e a respectiva categoria qualitativa utilizada para a avaliação dos valores obtidos. A referência utilizada foi a norma ABNT NBR 12179 (ABNT, 1973), em que os valores ideais para cada banda depende do volume do recinto. Os valores definidos na Tabela 4 foram definidos a partir do diagrama presente na norma de referência, presente também em (Bistafa, 2018). O valor de  $T_{60}$  ideal é definido para a banda de 500 Hz e os valores ideais para todo o intervalo de frequências são definidos com uma ponderação de 20% a partir do valor ideal.

As medidas de comprimento e largura para cada sala são mostrados pelas Figuras 5 (AT5), 8 (AT10) e 6 (AT9). As respectivas alturas são de 3,6m, 3,5m e 3,4m, totalizando um volume de 218,74m<sup>3</sup> para a sala do AT5, 240,09m<sup>3</sup> para a sala do AT9 e 216,03m<sup>3</sup> para a sala do AT10. Com isso, a partir da curva para salas de conferências presente no diagrama em (ABNT, 1973), foram estipulados, para a banda de 500 Hz, o valor de 0,58 s como ideal para a sala do AT9 e o valor de 0,54 s como ideal para as salas do AT5 e AT10.

Tabela 4: Escala de avaliação qualitativa dos valores para o Tempo de Reverberação ( $T_{60}$ ) por sala de aula (ABNT, 1973).

| Sala | Faixa de valores de $T_{60}$ (dB) | Classificação  |
|------|-----------------------------------|----------------|
| AT5  | $\leq 0,45$                       | Insatisfatório |
|      | 0,46 – 0,70                       | Satisfatório   |
|      | $\geq 0,71$                       | Insatisfatório |
| AT9  | $\leq 0,49$                       | Insatisfatório |
|      | 0,50 – 0,74                       | Satisfatório   |
|      | $\geq 0,75$                       | Insatisfatório |
| AT10 | $\leq 0,45$                       | Insatisfatório |
|      | 0,46 – 0,70                       | Satisfatório   |
|      | $\geq 0,71$                       | Insatisfatório |

Para os parâmetros de inteligibilidade da fala, a Claridade ( $C_{50}$ ) foi classificada segundo os critérios propostos por (Fajt; Krhen; Marušić, 2014), apresentados na Tabela 5. Esta referência estabelece uma escala qualitativa de cinco níveis, em que o Nível cresce de acordo com o valor do parâmetro. Para complementar o critério qualitativo, buscando o paralelo com o critério qualitativo para o STI, foram incluídas as categorias de "Muito ruim", "Ruim", "Regular", "Bom" e "Excelente" na escala de níveis de 1 a 5. A Definição ( $D_{50}$ ) foi avaliada conforme a Tabela 6, baseada em (Custódio; Gerges, 2006), que estipula uma classificação em apenas três níveis qualitativos.

Tabela 5: Escala de avaliação qualitativa estabelecida para a Claridade ( $C_{50}$ ) (Fajt; Krhen; Marušić, 2014).

| Faixa de valores de $C_{50}$ (dB) | Classificação        |
|-----------------------------------|----------------------|
| $\leq -9$                         | Nível 1 (Muito ruim) |
| -9 – -3                           | Nível 2 (Ruim)       |
| -3 – 3                            | Nível 3 (Regular)    |
| 3 – 9                             | Nível 4 (Bom)        |
| 9 – 13                            | Nível 5 (Excelente)  |

Tabela 6: Escala de avaliação qualitativa estabelecida para a Definição ( $D_{50}$ ) (Custódio; Gerges, 2006).

| Faixa de valores de $D_{50}$ | Classificação |
|------------------------------|---------------|
| $\leq 0,50$                  | Ruim          |
| 0,51 – 0,64                  | Regular       |
| $\geq 0,65$                  | Bom           |

O  $U_{50}$  é conceitualmente similar ao  $C_{50}$ , mas se diferencia por incluir a contribuição do ruído de fundo através do termo de SNR, tornando-o mais confiável para ambientes com ruído

de fundo mais elevado. Visto que não há uma escala internacionalmente padronizada para este parâmetro, foi adotado o mesmo critério qualitativo utilizado para o  $C_{50}$ , descrito pela Tabela 5. O  $U_{50}$  relaciona a parcela entre energia útil e prejudicial assim como no caso do  $C_{50}$ , porém, no caso do primeiro, é considerado a energia prejudicial do ruído de fundo, o que justifica a manutenção da escala qualitativa.

Adicionalmente, a Tabela 7 mostra o critério estabelecido para a Relação Sinal-Ruído (SNR). Embora a SNR não seja um parâmetro derivado da resposta ao impulso, mas sim da medição do nível de fala em relação ao ruído de fundo, também é possível estabelecer categorias de avaliação qualitativa a partir da análise de normas técnicas. O consenso na literatura, notavelmente em recomendações da ASHA (American Speech-Language-Hearing Association) (ASHA, 2005) e como base para a norma ANSI/ASA S12.60 (ANSI/ASA, 2010), é que uma SNR de +15 dB na posição do ouvinte é o alvo mínimo para garantir a inteligibilidade adequada para todos os alunos em uma sala de aula.

Tabela 7: Escala de avaliação qualitativa estabelecida para a Relação Sinal-Ruído (SNR) (ASHA, 2005) (ANSI/ASA, 2010).

| <b>Faixa de valores de SNR (dB)</b> | <b>Classificação</b> |
|-------------------------------------|----------------------|
| < 15                                | Insatisfatório       |
| ≥ 15                                | Satisfatório         |

Em relação à avaliação qualitativa para o STI, foi utilizada a escala desenvolvida e pela norma IEC 60268-16 (Commission *et al.*, 2003), mostrada na Tabela 8. Essa escala qualitativa é amplamente utilizada em projetos que se propõe a aferir a inteligibilidade de recintos.

Tabela 8: Classificação da inteligibilidade da fala para o índice STI (Commission *et al.*, 2003) (ABNT, 2017a) (ABNT, 2017b).

| <b>Faixa de valores STI</b> | <b>Classificação</b> |
|-----------------------------|----------------------|
| 0,00 – 0,30                 | Ruim                 |
| 0,30 – 0,45                 | Pobre                |
| 0,45 – 0,60                 | Regular              |
| 0,60 – 0,75                 | Bom                  |
| 0,75 – 1,00                 | Excelente            |

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Ruído de fundo

Em relação à análise do impacto do ruído de fundo nas salas estudadas, são apresentados na Tabela 9 e ilustrados no gráfico da Figura 14, os valores obtidos para a SNR para cada sala/configuração com os ventiladores ligados e desligados. Ao analisá-los, é evidente que o ruído de fundo sem os ventiladores não causa um grande impacto na Relação Sinal-Ruído, visto que todas as salas apresentaram valores classificados como “Bom” em todas as bandas analisadas. Isso se deve pelas características da localização dos prédios de aulas teóricas e do campus São Carlos da UFSCar. Como o campus consiste de uma área extensa localizada em uma região relativamente afastada das áreas de maior movimentação das cidades, não há muitos elementos causadores de ruído externo em situações normais, sem ocorrência de uma situação atípica, como corte de grama e obras. Além disso, como as medições foram realizadas no período noturno, sem a execução de muitas aulas regulares e movimentação de alunos, essas características são ainda mais acentuadas.

Tabela 9: Valores de SNR (dB) obtidos para cada sala em cada banda de oitava.

|                         | SNR (dB) |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 125Hz    | 250Hz | 500Hz | 1kHz  | 2kHz  | 4kHz  | 8kHz  |
| AT5 - Sem ventiladores  | 19,82    | 21,15 | 21,46 | 15,09 | 23,38 | 32,96 | 17,25 |
| AT5 - Com ventiladores  | 15,88    | 15,78 | 6,02  | 1,40  | 12,37 | 20,84 | 18,13 |
| AT9 - Sem ventiladores  | 23,99    | 28,44 | 29,76 | 32,33 | 30,38 | 28,40 | 23,99 |
| AT9 - Com ventiladores  | 15,08    | 10,91 | 7,08  | 10,92 | 5,84  | 11,55 | 14,98 |
| AT10 - Sem ventiladores | 27,10    | 28,37 | 29,80 | 26,21 | 35,04 | 38,87 | 20,13 |
| AT10 - Com ventiladores | 17,11    | 9,76  | 8,47  | 2,64  | 10,29 | 19,93 | 18,70 |

**Legenda:** ■ Satisfatório ■ Insatisfatório

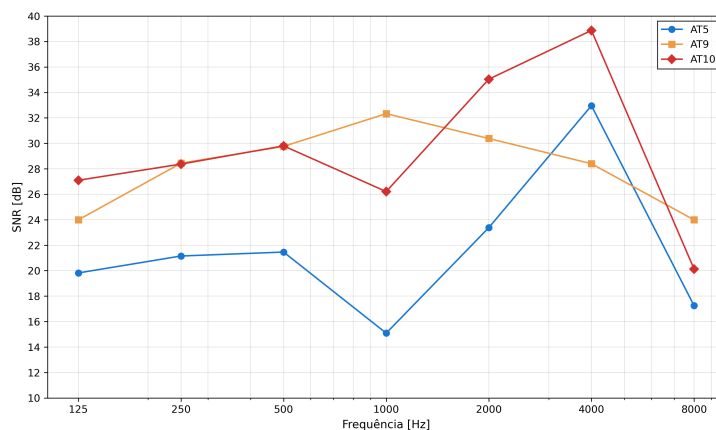


Figura 14: Valores de SNR com ventiladores desligados para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas.

A situação muda quando é analisado o resultado considerando o ruído de fundo dos ventiladores em sala. Através do gráfico da Figura 15, constata-se que nas 3 salas, há uma queda no valor da SNR em bandas de frequências médias, com destaque para a banda de 1000 Hz no AT5 e AT10, em que o valor de SNR atingiu valores consideravelmente baixos (1,40 e 2,64, respectivamente), sendo ambos classificados na categoria “Ruim” da escala utilizada e detalhada na Tabela 7. Esse comportamento acentuado de emissão de ruído em uma banda específica muitas vezes indica o mal funcionamento de um ou mais equipamentos. Se de fato for o caso para os ventiladores das duas salas, a manutenção dos equipamentos pode garantir uma considerável melhora no conforto acústico da sala.

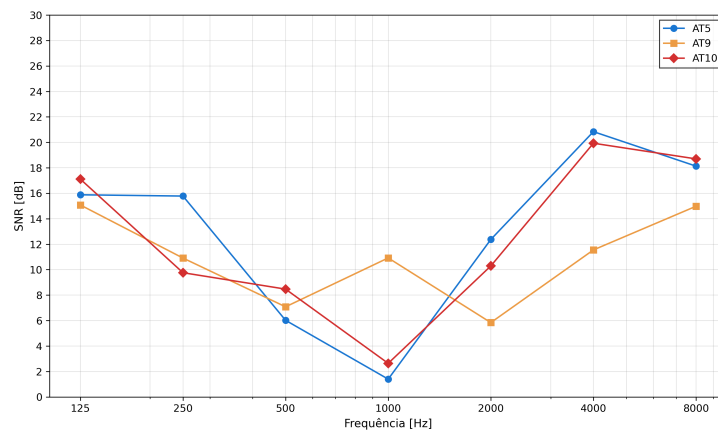


Figura 15: Valores de SNR com ventiladores ligados para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas.

## 4.2 Parâmetros relacionados à resposta ao impulso

### 4.2.1 AT5

A Tabela 10 apresenta os valores de Tempo de reverberação ( $T_{60}$ ) para a sala AT5, detalhados por ponto de medição (configuração fonte-receptor, detalhados na Figura 5) e por banda de oitava. A média dos valores medidos evidencia uma forte dependência de frequência, onde bandas baixas apresentam tempos de reverberação mais elevados. Conforme a legenda da própria tabela, estes valores foram classificados como “Insatisfatórios” de acordo com a Tabela 4. Para as bandas de frequência média-alta e alta, observa-se uma redução significativa do tempo de reverberação, com os valores médios de  $T_{60}$  estabilizando em valores classificados como “Satisfatórios” pela norma ABNT NBR 12179.

Tabela 10: Valores de  $T_{60}$  (s) para AT5 em cada banda de oitava.

|       | $T_{60}$ (s) |       |       |      |      |      |      |
|-------|--------------|-------|-------|------|------|------|------|
|       | 125Hz        | 250Hz | 500Hz | 1kHz | 2kHz | 4kHz | 8kHz |
| F1R1  | 1,23         | 0,95  | 0,72  | 0,67 | 0,56 | 0,62 | 0,55 |
| F1R2  | 1,14         | 0,96  | 0,72  | 0,66 | 0,54 | 0,61 | 0,52 |
| F2R1  | 1,22         | 1,21  | 0,69  | 0,63 | 0,55 | 0,63 | 0,55 |
| F2R2  | 1,10         | 1,01  | 0,74  | 0,62 | 0,52 | 0,60 | 0,53 |
| F1R3  | 1,25         | 1,15  | 0,74  | 0,63 | 0,54 | 0,65 | 0,60 |
| F1R4  | 1,03         | 1,02  | 0,74  | 0,66 | 0,55 | 0,65 | 0,56 |
| F2R3  | 1,10         | 1,04  | 0,74  | 0,67 | 0,57 | 0,62 | 0,57 |
| F2R4  | 1,24         | 1,01  | 0,72  | 0,62 | 0,58 | 0,64 | 0,56 |
| Média | 1,16         | 1,04  | 0,73  | 0,65 | 0,55 | 0,63 | 0,56 |

**Legenda:** ■ Satisfatório ■ Insatisfatório

De forma análoga, a Tabela 11 mostra os valores obtidos para a Claridade ( $C_{50}$ ) e Definição ( $D_{50}$ ), em que é expresso um comportamento inverso ao do  $T_{60}$ , como esperado. Em 125 Hz, obtiveram-se os piores índices, com  $C_{50}$  de -5,77 dB e  $D_{50}$  de 0,24 (24%), classificados como “Ruim” pela escala utilizada nas tabelas 5 e 6. É apresentada uma melhora consistente nos valores a partir da banda de 1000 Hz com o  $C_{50}$  tornando-se positivo e o  $D_{50}$  atingindo 0,53 (53%), o que demonstra que a maior parte da energia sonora no sinal é utilizada para a compreensão da fala.

Tabela 11: Valores de  $C_{50}$  (dB) e  $D_{50}$  para AT5 em cada banda de oitava.

|       | $C_{50}$ (dB) |       |       |       |       |       |      | $D_{50}$ (%) |       |       |      |      |      |      |
|-------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--------------|-------|-------|------|------|------|------|
|       | 125Hz         | 250Hz | 500Hz | 1kHz  | 2kHz  | 4kHz  | 8kHz | 125Hz        | 250Hz | 500Hz | 1kHz | 2kHz | 4kHz | 8kHz |
| F1R1  | -9,31         | -2,17 | -3,23 | -0,69 | 0,42  | 1,92  | 2,99 | 0,10         | 0,38  | 0,32  | 0,46 | 0,52 | 0,61 | 0,67 |
| F1R2  | -8,78         | 0,61  | 0,14  | 2,02  | 0,66  | -0,67 | 3,41 | 0,12         | 0,53  | 0,51  | 0,61 | 0,54 | 0,46 | 0,69 |
| F2R1  | -8,04         | -3,30 | -2,85 | -0,51 | -0,97 | 0,56  | 2,36 | 0,14         | 0,32  | 0,34  | 0,47 | 0,44 | 0,53 | 0,63 |
| F2R2  | -11,14        | -6,97 | -2,41 | -1,78 | 1,07  | 1,62  | 3,60 | 0,07         | 0,17  | 0,36  | 0,40 | 0,56 | 0,59 | 0,70 |
| F1R3  | -1,87         | 0,28  | -0,36 | 1,60  | 2,97  | 3,53  | 3,68 | 0,39         | 0,52  | 0,48  | 0,59 | 0,66 | 0,69 | 0,70 |
| F1R4  | -2,74         | 0,19  | -0,66 | 0,96  | 0,97  | 0,82  | 1,93 | 0,35         | 0,51  | 0,46  | 0,55 | 0,56 | 0,55 | 0,61 |
| F2R3  | -0,22         | 2,64  | -2,33 | 0,27  | 1,12  | -1,42 | 2,79 | 0,49         | 0,65  | 0,37  | 0,52 | 0,56 | 0,42 | 0,66 |
| F2R4  | -4,06         | 0,47  | -0,19 | 2,03  | 0,31  | 1,53  | 2,61 | 0,28         | 0,53  | 0,49  | 0,61 | 0,52 | 0,59 | 0,65 |
| Média | -5,77         | -1,03 | -1,49 | 0,49  | 0,82  | 0,99  | 2,92 | 0,24         | 0,45  | 0,42  | 0,53 | 0,55 | 0,55 | 0,66 |

**Legenda:** ■ Nível 4 (Bom) ■ Nível 3 (Regular) ■ Nível 2 (Ruim) ■ Nível 1 (Muito ruim)

A tendência evidenciada na Tabela 11 também pode ser observada na Tabela 12, que mostra os resultados para o Useful to Detrimental Ratio ( $U_{50}$ ). Nesse caso, é considerado o impacto do ruído de fundo da sala através da SNR para os ventiladores desligados, o que não muda a tendência de melhora da Claridade a partir da banda de 1000 Hz, mas evidencia um elevado valor para a banda de 8000 Hz. Assim, é possível evidenciar que a energia da banda apresenta uma maior participação na energia útil quando o impacto do ruído de fundo é analisado. Já o resultado do  $U_{50}$  considerando o ruído de fundo dos ventiladores, mostrado pela Tabela 13,

evidencia o incremento da participação da energia prejudicial nas 3 bandas mais centrais, com destaque para a banda de 1000 Hz, que apresentou uma queda de quase 3 dB.

Tabela 12: Valores de  $U_{50}$  (dB) para AT5 em cada banda de oitava (Ventiladores desligados).

|       | $U_{50}$ (dB) |       |       |       |       |       |      |
|-------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|       | 125Hz         | 250Hz | 500Hz | 1kHz  | 2kHz  | 4kHz  | 8kHz |
| F1R1  | -9,36         | -2,23 | -3,27 | -0,93 | 0,37  | 1,92  | 2,75 |
| F1R2  | -8,83         | 0,53  | 0,08  | 1,68  | 0,61  | -0,67 | 3,16 |
| F2R1  | -8,09         | -3,35 | -2,89 | -0,75 | -1,01 | 0,55  | 2,14 |
| F2R2  | -11,19        | -7,01 | -2,46 | -2,00 | 1,02  | 1,61  | 3,34 |
| F1R3  | -1,94         | 0,21  | -0,42 | 1,28  | 2,91  | 3,52  | 3,41 |
| F1R4  | -2,81         | 0,12  | -0,72 | 0,67  | 0,92  | 0,81  | 1,73 |
| F2R3  | -0,30         | 2,54  | -2,38 | 0,00  | 1,07  | -1,42 | 2,56 |
| F2R4  | -4,12         | 0,40  | -0,25 | 1,70  | 0,27  | 1,53  | 2,39 |
| Média | -5,83         | -1,10 | -1,54 | 0,33  | 0,77  | 0,98  | 2,69 |

**Legenda:** ■ Bom ■ Regular ■ Ruim

Tabela 13: Valores de  $U_{50}$  (dB) para AT5 em cada banda de oitava (ventiladores ligados).

|       | $U_{50}$ (dB) |       |       |       |       |       |      |
|-------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|       | 125Hz         | 250Hz | 500Hz | 1kHz  | 2kHz  | 4kHz  | 8kHz |
| F1R1  | -9,43         | -2,35 | -4,59 | -4,39 | -0,08 | 1,83  | 2,79 |
| F1R2  | -8,90         | 0,37  | -1,64 | -2,58 | 0,14  | -0,74 | 3,20 |
| F2R1  | -8,16         | -3,47 | -4,25 | -4,25 | -1,41 | 0,48  | 2,18 |
| F2R2  | -11,26        | -7,11 | -3,85 | -5,22 | 0,53  | 1,53  | 3,38 |
| F1R3  | -2,05         | 0,05  | -2,06 | -2,83 | 2,28  | 3,41  | 3,46 |
| F1R4  | -2,91         | -0,04 | -2,32 | -3,24 | 0,43  | 0,74  | 1,76 |
| F2R3  | -0,43         | 2,32  | -3,78 | -3,70 | 0,57  | -1,48 | 2,60 |
| F2R4  | -4,21         | 0,23  | -1,92 | -2,57 | -0,19 | 1,45  | 2,43 |
| Média | -5,92         | -1,25 | -3,05 | -3,60 | 0,29  | 0,90  | 2,72 |

**Legenda:** ■ Bom ■ Regular ■ Ruim

É possível estabelecer um paralelo claro entre os resultados apresentados e a análise da solução acústica na sala do AT5, em que é utilizado, predominantemente, o revestimento de celulose projetada em partes das paredes das salas. A Tabela 14 apresenta os valores do coeficiente de absorção do modelo de celulose projetada CELBAR Sprayon 50 mm, em que é possível notar uma maior eficiência na absorção de frequências altas e médias. Mesmo assim, não é possível explicar os resultados inferiores para a banda de 500 Hz apenas pelo revestimento utilizado na sala, visto que a celulose apresenta uma boa capacidade de absorção acústica. De forma complementar, é utilizado na sala uma cobertura de forro de vinil, o que pode apresentar um impacto considerável nos resultados, tendo em vista a maior eficiência de absorção para altas frequências em materiais desse tipo (ABNT, 1973).

Tabela 14: Valores dos coeficientes de absorção sonora do material celulose projetada, modelo CELBAR Sprayon 50 mm por banda de frequência (Hupalo, 2017).

| Frequência (Hz) | Coefficiente de absorção ( $\alpha$ ) |
|-----------------|---------------------------------------|
| 125             | 0,26                                  |
| 250             | 0,68                                  |
| 500             | 1,05                                  |
| 1000            | 1,10                                  |
| 2000            | 1,03                                  |
| 4000            | 0,98                                  |

#### 4.2.2 AT10

As tabelas abaixo apresentam os resultados para a sala do AT10 de forma análoga aos apresentados anteriormente para o AT5. Nesse caso, a solução acústica empregada é o forro de fibra no teto da sala, porém as especificações mais minuciosas em relação ao tipo do material não foram obtidas. Ao analisar os resultados obtidos para o  $T_{60}$ , nota-se um comportamento atípico: inicia-se elevado em 125 Hz (0,86 s), demonstra uma queda para os valores mais baixos em 250 Hz 500 Hz e 1000 Hz, atingindo valores considerados “Satisfatórios” de acordo com a norma de referência. Após isso, a tendência é invertida, o  $T_{60}$  volta a subir nas bandas subsequentes, atingindo 0,71 s em 2 kHz e 0,73 s em 4 kHz, valores que foram classificados como “Insatisfatórios”, antes de decair novamente em 8 kHz (0,60 s).

Tabela 15: Valores de  $T_{60}$  (s) para AT10 em cada banda de oitava.

|       | $T_{60}$ (s) |       |       |      |      |      |      |
|-------|--------------|-------|-------|------|------|------|------|
|       | 125Hz        | 250Hz | 500Hz | 1kHz | 2kHz | 4kHz | 8kHz |
| F1R1  | 0,87         | 0,63  | 0,53  | 0,65 | 0,67 | 0,74 | 0,63 |
| F1R2  | 0,70         | 0,50  | 0,52  | 0,63 | 0,68 | 0,70 | 0,58 |
| F2R1  | 0,78         | 0,58  | 0,43  | 0,60 | 0,73 | 0,73 | 0,60 |
| F2R2  | 0,82         | 0,52  | 0,50  | 0,63 | 0,69 | 0,71 | 0,60 |
| F1R3  | 0,91         | 0,58  | 0,56  | 0,68 | 0,71 | 0,74 | 0,61 |
| F1R4  | 0,58         | 0,54  | 0,53  | 0,61 | 0,72 | 0,72 | 0,56 |
| F2R3  | 1,18         | 0,65  | 0,52  | 0,64 | 0,70 | 0,76 | 0,59 |
| F2R4  | 1,07         | 0,65  | 0,51  | 0,62 | 0,70 | 0,72 | 0,59 |
| Média | 0,86         | 0,58  | 0,51  | 0,63 | 0,71 | 0,73 | 0,60 |

**Legenda:** ■ Satisfatório ■ Insatisfatório

A Tabela 16, referente ao valores de  $C_{50}$  e  $D_{50}$ , mostra uma correlação com o  $T_{60}$  nas baixas frequências, iniciando com valores negativos de Claridade e valores abaixo de 50% para a Definição até a banda de 250 Hz. Após isso, os valores crescem consideravelmente atingindo a classificação de “Regular” e “Bom”. Notavelmente, mesmo nas bandas onde o  $T_{60}$  foi classificado como “Insatisfatório” (2000 Hz e 4000 Hz), os parâmetros associados à inteligibilidade se mantêm em níveis favoráveis, com o  $D_{50}$  registrando 0,66 (66%) e 0,59 (59%), respectiva-

mente, e o  $U_{50}$ , apresentado na Tabela 17, registrando o valor de 2,99 na banda de 2000 Hz. De modo geral, o  $U_{50}$  sem considerar os ventiladores segue o comportamento da Claridade, como esperado, enquanto o  $U_{50}$  com os ventiladores ligados (Tabela 18) apresentou uma piora significativa na banda de 1000 Hz, atingindo o nível qualitativo “Ruim”. Apesar da manutenção da categoria de classificação, destaca-se também as quedas dos valores obtidos nas bandas de 250 Hz, 500 Hz e 2000 Hz.

Tabela 16: Valores de  $C_{50}$  (dB) e  $D_{50}$  para AT10 em cada banda de oitava.

|       | $C_{50}$ (dB) |       |       |       |      |       |      | $D_{50}$ (%) |       |       |      |      |      |      |
|-------|---------------|-------|-------|-------|------|-------|------|--------------|-------|-------|------|------|------|------|
|       | 125Hz         | 250Hz | 500Hz | 1kHz  | 2kHz | 4kHz  | 8kHz | 125Hz        | 250Hz | 500Hz | 1kHz | 2kHz | 4kHz | 8kHz |
| F1R1  | -2,44         | -1,52 | -1,11 | -1,68 | 2,32 | -0,71 | 2,49 | 0,36         | 0,41  | 0,44  | 0,40 | 0,63 | 0,46 | 0,64 |
| F1R2  | -7,23         | -3,34 | 2,08  | 1,39  | 1,94 | 2,21  | 4,33 | 0,16         | 0,32  | 0,62  | 0,58 | 0,61 | 0,62 | 0,73 |
| F2R1  | -5,02         | -3,12 | 1,25  | -0,57 | 2,62 | 2,02  | 3,61 | 0,24         | 0,33  | 0,57  | 0,47 | 0,64 | 0,61 | 0,70 |
| F2R2  | -3,53         | -6,78 | -0,13 | 2,70  | 2,17 | -0,20 | 1,28 | 0,31         | 0,17  | 0,49  | 0,65 | 0,62 | 0,49 | 0,57 |
| F1R3  | -1,03         | 0,55  | 2,25  | 0,06  | 3,62 | 1,08  | 2,49 | 0,44         | 0,53  | 0,63  | 0,50 | 0,70 | 0,56 | 0,64 |
| F1R4  | -4,89         | -0,77 | 1,78  | 1,79  | 4,21 | 3,29  | 4,26 | 0,24         | 0,46  | 0,60  | 0,60 | 0,72 | 0,68 | 0,73 |
| F2R3  | 1,46          | -1,25 | 3,54  | 4,16  | 3,14 | 2,14  | 6,36 | 0,58         | 0,43  | 0,69  | 0,72 | 0,67 | 0,62 | 0,81 |
| F2R4  | -1,12         | 3,93  | 3,99  | 3,19  | 3,90 | 3,59  | 4,17 | 0,44         | 0,71  | 0,71  | 0,68 | 0,71 | 0,70 | 0,72 |
| Média | -2,98         | -1,54 | 1,71  | 1,38  | 2,99 | 1,68  | 3,62 | 0,35         | 0,42  | 0,59  | 0,58 | 0,66 | 0,59 | 0,69 |

**Legenda:** ■ Nível 4 (Bom) ■ Nível 3 (Regular) ■ Nível 2 (Ruim) ■ Nível 1 (Muito ruim)

Tabela 17: Valores de  $U_{50}$  (dB) para AT10 em cada banda de oitava (ventiladores desligados).

|       | $U_{50}$ (dB) |       |       |       |      |       |      |
|-------|---------------|-------|-------|-------|------|-------|------|
|       | 125Hz         | 250Hz | 500Hz | 1kHz  | 2kHz | 4kHz  | 8kHz |
| F1R1  | -2,46         | -1,54 | -1,11 | -1,70 | 2,32 | -0,71 | 2,38 |
| F1R2  | -7,24         | -3,35 | 2,07  | 1,37  | 1,94 | 2,21  | 4,17 |
| F2R1  | -5,03         | -3,13 | 1,24  | -0,59 | 2,62 | 2,02  | 3,48 |
| F2R2  | -3,54         | -6,78 | -0,14 | 2,67  | 2,16 | -0,20 | 1,18 |
| F1R3  | -1,05         | 0,54  | 2,24  | 0,04  | 3,62 | 1,08  | 2,37 |
| F1R4  | -4,90         | -0,78 | 1,77  | 1,76  | 4,21 | 3,29  | 4,11 |
| F2R3  | 1,44          | -1,26 | 3,52  | 4,12  | 3,14 | 2,13  | 6,14 |
| F2R4  | -1,13         | 3,90  | 3,97  | 3,16  | 3,89 | 3,59  | 4,02 |
| Média | -3,11         | -1,55 | 1,57  | 1,33  | 2,99 | 1,68  | 3,48 |

**Legenda:** ■ Bom ■ Regular ■ Ruim

Ao analisar o conjunto de dados, fica evidente que a solução acústica empregada (forro de fibra) possui uma performance de absorção fortemente dependente da frequência, em que é apresentado um resultado consideravelmente mais satisfatório para as bandas de 500 Hz se comparado com a solução de celulose projetada do AT5. A característica do comportamento dos valores de  $T_{60}$ , com o mínimo em 500 Hz e elevação nas bandas de 2000 Hz e 4000 Hz, sugere que o coeficiente de absorção do material fibroso utilizado do teto da sala é elevado nas frequências médias (em torno de 500 Hz) e perde eficiência em frequências mais altas.

Tabela 18: Valores de  $U_{50}$  (dB) para AT10 em cada banda de oitava (ventiladores ligados).

|       | $U_{50}$ (dB) |       |       |       |      |       |      |
|-------|---------------|-------|-------|-------|------|-------|------|
|       | 125Hz         | 250Hz | 500Hz | 1kHz  | 2kHz | 4kHz  | 8kHz |
| F1R1  | -2,58         | -2,24 | -2,08 | -4,50 | 1,34 | -0,79 | 2,33 |
| F1R2  | -7,33         | -3,96 | 0,71  | -2,21 | 1,01 | 2,09  | 4,11 |
| F2R1  | -5,13         | -3,75 | 0,00  | -3,63 | 1,60 | 1,91  | 3,42 |
| F2R2  | -3,65         | -7,30 | -1,20 | -1,38 | 1,21 | -0,28 | 1,15 |
| F1R3  | -1,18         | -0,33 | 0,85  | -3,16 | 2,45 | 0,98  | 2,33 |
| F1R4  | -5,00         | -1,54 | 0,46  | -1,95 | 2,94 | 3,15  | 4,05 |
| F2R3  | 1,26          | -1,99 | 1,88  | -0,56 | 2,05 | 2,02  | 6,06 |
| F2R4  | -1,26         | 2,57  | 2,23  | -1,09 | 2,68 | 3,45  | 3,97 |
| Média | -3,11         | -2,32 | 0,36  | -2,31 | 1,91 | 1,57  | 3,43 |

**Legenda:** ■ Bom ■ Regular ■ Ruim

Portanto, a partir da comparação da evolução dos valores do  $T_{60}$  com o comportamento dos valores dos parâmetros associados à inteligibilidade, nota-se um comportamento distinto, na qual mesmo com o  $T_{60}$  subindo para valores classificados como “Ruim” nas bandas de 2000 Hz e 4000 Hz, os parâmetros  $C_{50}$  e  $D_{50}$  permanecem bons. Isso indica que, embora a reverberação seja mais longa nessas faixas, a relação entre a energia útil e a energia prejudicial ainda é suficiente para garantir uma boa clareza para a fala.

A partir da análise descrita na seção 2.3.1, condensado na Equação 5, foi possível estimar os valores dos tempos de reverberação para o revestimento do revestimento de fibra da sala do AT10, mostrados pela Tabela 19. Os valores obtidos refletem fortemente os valores conhecidos para revestimentos de lã mineral (Knauf Insulation, 2024), confirmando a hipótese da presença de revestimento fibroso no AT10. Como base para a obtenção dos valores de  $S_{\text{outros}}$ , foram utilizados os valores médios obtidos para o  $T_{60}$  na sala do AT9 como um modelo para a absorção média de uma sala sem revestimento.

Tabela 19: Valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos para o revestimento de material fibroso presente no AT10.

| Frequência (Hz) | Coefficiente de absorção ( $\alpha$ ) |
|-----------------|---------------------------------------|
| 125             | 0,47                                  |
| 250             | 0,77                                  |
| 500             | 0,89                                  |
| 1000            | 0,66                                  |
| 2000            | 0,55                                  |
| 4000            | 0,50                                  |

### 4.2.3 AT9

A Tabela 20 sumariza os valores de  $T_{60}$  para a sala AT9, que não possui tratamento acústico, nas duas configurações de fonte-receptor utilizadas, detalhadas nas Figuras 6 e 7. Os

resultados demonstram tempos de reverberação consideravelmente elevados em todas as bandas de frequência, nas quais nenhuma banda atingiu valores sequer “Regulares” pela norma utilizada. É notável a consistência dos resultados entre a Configuração 1 e a Configuração 2, com médias de  $T_{60}$  quase idênticas, indicando uma condição de reverberação precária por todo o recinto. Assim como nas outras duas salas analisadas, obteve-se valores menores para frequências mais elevadas devido à característica de absorção do ar e de materiais de alvenaria, como citado anteriormente. Apesar disso, apenas os materiais comuns utilizados para a formação da sala não são suficientes para diminuir o Tempo de reverberação para valores satisfatórios.

Tabela 20: Valores de  $T_{60}$  (s) para AT9 nas duas configurações em cada banda de oitava.

|       | $T_{60}$ (s) - Config. 1 |       |       |      |      |      |      | $T_{60}$ (s) - Config. 2 |       |       |      |      |      |      |
|-------|--------------------------|-------|-------|------|------|------|------|--------------------------|-------|-------|------|------|------|------|
|       | 125Hz                    | 250Hz | 500Hz | 1kHz | 2kHz | 4kHz | 8kHz | 125Hz                    | 250Hz | 500Hz | 1kHz | 2kHz | 4kHz | 8kHz |
| F1R1  | 2,18                     | 2,01  | 1,83  | 1,79 | 1,65 | 1,44 | 1,02 | 2,24                     | 1,96  | 1,95  | 1,79 | 1,67 | 1,50 | 1,01 |
| F1R2  | 2,01                     | 2,07  | 2,10  | 1,81 | 1,65 | 1,45 | 1,04 | 2,22                     | 1,87  | 1,88  | 1,75 | 1,65 | 1,53 | 1,03 |
| F2R1  | 2,48                     | 1,99  | 1,87  | 1,74 | 1,66 | 1,47 | 1,02 | 2,19                     | 2,03  | 1,97  | 1,77 | 1,73 | 1,45 | 1,02 |
| F2R2  | 2,49                     | 2,17  | 2,00  | 1,76 | 1,63 | 1,44 | 0,96 | 2,09                     | 2,14  | 1,98  | 1,80 | 1,65 | 1,46 | 1,06 |
| F1R3  | 1,94                     | 1,95  | 1,93  | 1,79 | 1,67 | 1,48 | 1,00 | 2,35                     | 2,18  | 2,03  | 1,78 | 1,68 | 1,53 | 1,07 |
| F1R4  | 1,86                     | 2,11  | 2,06  | 1,70 | 1,65 | 1,48 | 1,05 | 2,00                     | 2,09  | 1,90  | 1,71 | 1,62 | 1,49 | 1,05 |
| F2R3  | 2,46                     | 2,14  | 2,14  | 1,70 | 1,64 | 1,48 | 1,02 | 2,21                     | 2,10  | 1,95  | 1,75 | 1,70 | 1,43 | 1,02 |
| F2R4  | 1,87                     | 2,01  | 1,97  | 1,73 | 1,61 | 1,46 | 0,99 | 1,99                     | 2,00  | 2,06  | 1,73 | 1,65 | 1,45 | 1,05 |
| Média | 2,16                     | 2,06  | 1,99  | 1,75 | 1,64 | 1,46 | 1,01 | 2,16                     | 2,05  | 1,97  | 1,76 | 1,67 | 1,48 | 1,04 |

Legenda: ■ Satisfatório ■ Insatisfatório

Ao partir para a análise dos parâmetros relacionados com a inteligibilidade da fala, a condição acústica precária da sala sem revestimento é ainda mais evidenciada. As Tabelas 21 e 22 apresentam os valores obtidos e a média do  $C_{50}$  e  $D_{50}$  para as configurações de fonte-receptor 1 e 2, respectivamente. Nas duas situações, a condição de classificação “Ruim”, é predominante em quase todas as bandas analisadas, sendo a banda de 8000 Hz a única exceção, apresentando valores considerados “Regulares” para a Claridade, considerando a referência utilizada.

Tabela 21: Valores de  $C_{50}$  (dB) e  $D_{50}$  para AT9 (Configuração 1) em cada banda de oitava.

|       | $C_{50}$ (dB) |        |       |       |       |       |       | $D_{50}$ (%) |       |       |      |      |      |      |
|-------|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|------|------|------|------|
|       | 125Hz         | 250Hz  | 500Hz | 1kHz  | 2kHz  | 4kHz  | 8kHz  | 125Hz        | 250Hz | 500Hz | 1kHz | 2kHz | 4kHz | 8kHz |
| F1R1  | -7,88         | -7,23  | -6,58 | -4,52 | -3,80 | -4,77 | -0,60 | 0,14         | 0,16  | 0,18  | 0,26 | 0,29 | 0,25 | 0,47 |
| F1R2  | -11,12        | -11,42 | -8,20 | -7,61 | -5,03 | -3,71 | -1,73 | 0,07         | 0,07  | 0,13  | 0,15 | 0,24 | 0,30 | 0,40 |
| F2R1  | -10,32        | -9,57  | -9,20 | -8,48 | -7,77 | -7,14 | -2,91 | 0,09         | 0,10  | 0,11  | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,34 |
| F2R2  | -7,74         | -5,78  | -5,55 | -4,29 | -4,11 | -1,62 | 2,19  | 0,14         | 0,21  | 0,22  | 0,27 | 0,28 | 0,41 | 0,62 |
| F1R3  | -3,18         | -8,55  | -7,21 | -3,26 | -7,30 | -4,55 | 0,29  | 0,32         | 0,12  | 0,16  | 0,32 | 0,16 | 0,26 | 0,52 |
| F1R4  | -5,97         | -7,80  | -9,22 | -6,41 | -5,17 | -5,29 | -2,97 | 0,20         | 0,14  | 0,11  | 0,19 | 0,23 | 0,23 | 0,34 |
| F2R3  | -2,57         | -3,36  | -3,81 | -5,78 | -3,43 | -2,57 | -0,13 | 0,36         | 0,32  | 0,29  | 0,21 | 0,31 | 0,36 | 0,49 |
| F2R4  | -5,79         | -6,13  | -6,79 | -4,79 | -4,11 | -3,25 | -0,63 | 0,21         | 0,20  | 0,17  | 0,25 | 0,28 | 0,32 | 0,46 |
| Média | -6,82         | -7,48  | -7,07 | -5,64 | -5,09 | -4,11 | -0,81 | 0,19         | 0,16  | 0,17  | 0,22 | 0,24 | 0,29 | 0,45 |

Legenda: ■ Nível 4 (Bom) ■ Nível 3 (Regular) ■ Nível 2 (Ruim) ■ Nível 1 (Muito ruim)

Tabela 22: Valores de  $C_{50}$  (dB) e  $D_{50}$  para AT9 (Config 2) em cada banda de oitava.

|       | $C_{50}$ (dB) |        |        |       |       |       |       | $D_{50}$ (%) |       |       |      |      |      |      |
|-------|---------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|------|------|------|------|
|       | 125Hz         | 250Hz  | 500Hz  | 1kHz  | 2kHz  | 4kHz  | 8kHz  | 125Hz        | 250Hz | 500Hz | 1kHz | 2kHz | 4kHz | 8kHz |
| F1R1  | -7,68         | -10,20 | -7,12  | -5,38 | -4,56 | -4,04 | -0,11 | 0,15         | 0,09  | 0,16  | 0,22 | 0,26 | 0,28 | 0,49 |
| F1R2  | -9,29         | -8,07  | -6,28  | -6,06 | -6,01 | -5,45 | -1,22 | 0,11         | 0,13  | 0,19  | 0,20 | 0,20 | 0,22 | 0,43 |
| F2R1  | -9,74         | -5,16  | -5,75  | -4,83 | -4,66 | -2,58 | 1,43  | 0,10         | 0,23  | 0,21  | 0,25 | 0,26 | 0,36 | 0,58 |
| F2R2  | -8,80         | -4,79  | -5,35  | -4,21 | -5,38 | -3,24 | -1,06 | 0,12         | 0,25  | 0,23  | 0,27 | 0,22 | 0,32 | 0,44 |
| F1R3  | -6,99         | -7,98  | -8,88  | -4,10 | -3,51 | -3,68 | -0,78 | 0,17         | 0,14  | 0,11  | 0,28 | 0,31 | 0,30 | 0,46 |
| F1R4  | -9,31         | -4,51  | -4,08  | -2,95 | -2,79 | -1,99 | 1,11  | 0,10         | 0,26  | 0,28  | 0,34 | 0,34 | 0,39 | 0,56 |
| F2R3  | -12,38        | -9,60  | -10,64 | -5,39 | -4,56 | -3,31 | -0,48 | 0,04         | 0,10  | 0,08  | 0,22 | 0,26 | 0,32 | 0,47 |
| F2R4  | -12,74        | -6,58  | -8,07  | -9,01 | -6,04 | -4,50 | -2,23 | 0,05         | 0,18  | 0,13  | 0,11 | 0,20 | 0,26 | 0,37 |
| Média | -9,87         | -7,11  | -7,02  | -5,24 | -4,69 | -3,60 | -0,42 | 0,10         | 0,17  | 0,17  | 0,24 | 0,26 | 0,31 | 0,48 |

**Legenda:** ■ Nível 4 (Bom) ■ Nível 3 (Regular) ■ Nível 2 (Ruim) ■ Nível 1 (Muito ruim)

Os valores obtidos se mantêm próximos para as duas configurações com exceção da banda de 125 Hz, que apresentou um resultado “Muito ruim” (abaixo de -9,00 dB) para a configuração 2. Isso se deve ao fato de que frequências mais baixas apresentam um maior impacto dos modos de vibração da sala por apresentarem maiores comprimentos de onda, o que gera uma maior probabilidade de desvio entre medições análogas em diferentes posições da sala. Em relação à Definição, os valores obtidos para todas as bandas apresentaram uma relação menor que 50%, o que significa que a maior parte da energia do sinal está na categoria de energia prejudicial para a inteligibilidade da fala. Os resultados para  $U_{50}$ , mostrados pelas Tabelas 23 (sem ventiladores) e 24 (com ventiladores) também foram classificados, em quase a totalidade, na categoria “Ruim”, em que o impacto do ruído de fundo sem considerar os ventiladores não apresentou um grande impacto para o recinto em questão. Em relação ao resultado para os ventiladores ligados, é possível notar uma queda significativa em quase todas as bandas, com exceção da banda de 125 Hz.

Tabela 23: Valores de  $U_{50}$  (dB) para AT9 nas duas configurações em cada banda de oitava(ventiladores desligados).

|       | $U_{50}$ - Config. 1 (dB) |        |       |       |       |       |       | $U_{50}$ - Config. 2 (dB) |        |        |       |       |       |       |
|-------|---------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|       | 125Hz                     | 250Hz  | 500Hz | 1kHz  | 2kHz  | 4kHz  | 8kHz  | 125Hz                     | 250Hz  | 500Hz  | 1kHz  | 2kHz  | 4kHz  | 8kHz  |
| F1R1  | -7,90                     | -7,24  | -6,58 | -4,53 | -3,81 | -4,78 | -0,63 | -7,70                     | -10,20 | -7,13  | -5,38 | -4,56 | -4,04 | -0,14 |
| F1R2  | -11,14                    | -11,43 | -8,21 | -7,61 | -5,03 | -3,72 | -1,76 | -9,31                     | -8,08  | -6,28  | -6,06 | -6,01 | -5,46 | -1,25 |
| F2R1  | -10,34                    | -9,57  | -9,20 | -8,48 | -7,78 | -7,15 | -2,94 | -9,76                     | -5,17  | -5,75  | -4,84 | -4,66 | -2,59 | -0,81 |
| F2R2  | -7,76                     | -5,79  | -5,55 | -4,29 | -4,11 | -1,63 | 2,15  | -8,82                     | -4,80  | -5,35  | -4,21 | -5,38 | -3,25 | -1,09 |
| F1R3  | -3,20                     | -8,56  | -7,22 | -3,27 | -7,31 | -4,56 | 0,25  | -7,01                     | -7,99  | -8,88  | -4,11 | -3,52 | -3,69 | -2,26 |
| F1R4  | -6,00                     | -7,80  | -9,23 | -6,41 | -5,18 | -5,30 | -2,99 | -9,33                     | -4,52  | -4,09  | -2,95 | -2,79 | -2,00 | 1,39  |
| F2R3  | -2,60                     | -3,36  | -3,81 | -5,78 | -3,44 | -2,58 | -0,17 | -14,40                    | -9,61  | -10,65 | -5,39 | -4,56 | -3,32 | 1,07  |
| F2R4  | -5,82                     | -6,14  | -6,80 | -4,80 | -4,11 | -3,26 | -0,66 | -12,76                    | -6,59  | -8,07  | -9,01 | -6,05 | -4,51 | -0,51 |
| Média | -6,85                     | -7,49  | -7,08 | -5,65 | -5,10 | -4,12 | -0,85 | -9,86                     | -7,12  | -7,03  | -5,24 | -4,69 | -3,61 | -0,45 |

**Legenda:** ■ Bom ■ Regular ■ Ruim ■ Nível 1 (Muito ruim)

Tabela 24: Valores de  $U_{50}$  (dB) para AT9 nas duas configurações em cada banda de oitava (ventiladores ligados).

|       | $U_{50}$ - Config. 1 (dB) |        |        |       |       |       |       | $U_{50}$ - Config. 2 (dB) |        |        |       |       |       |       |
|-------|---------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|---------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|       | 125Hz                     | 250Hz  | 500Hz  | 1kHz  | 2kHz  | 4kHz  | 8kHz  | 125Hz                     | 250Hz  | 500Hz  | 1kHz  | 2kHz  | 4kHz  | 8kHz  |
| F1R1  | -8,03                     | -7,63  | -7,51  | -4,98 | -5,17 | -5,16 | -0,85 | -7,84                     | -10,57 | -8,04  | -5,81 | -5,87 | -4,44 | -0,38 |
| F1R2  | -11,26                    | -11,79 | -9,08  | -8,00 | -6,31 | -4,12 | -1,96 | -9,44                     | -8,46  | -7,22  | -6,48 | -7,23 | -5,83 | -1,45 |
| F2R1  | -10,47                    | -9,94  | -10,06 | -8,86 | -8,93 | -7,49 | -3,11 | -9,88                     | -5,60  | -6,71  | -5,28 | -5,96 | -3,03 | 1,11  |
| F2R2  | -7,89                     | -6,21  | -6,52  | -4,75 | -5,45 | -2,11 | 1,84  | -8,95                     | -5,24  | -6,33  | -4,67 | -6,64 | -3,66 | -1,30 |
| F1R3  | -3,37                     | -8,94  | -8,13  | -3,75 | -8,47 | -4,95 | 0,01  | -7,14                     | -8,37  | -9,75  | -4,57 | -4,90 | -4,09 | -1,02 |
| F1R4  | -6,14                     | -8,19  | -10,08 | -6,82 | -6,44 | -5,67 | -3,17 | -9,46                     | -4,96  | -5,13  | -3,45 | -4,24 | -2,46 | 0,81  |
| F2R3  | -2,77                     | -3,84  | -4,87  | -6,20 | -4,83 | -3,02 | -0,40 | -14,51                    | -9,97  | -11,48 | -5,82 | -5,87 | -3,73 | -0,73 |
| F2R4  | -5,96                     | -6,55  | -7,72  | -5,24 | -5,45 | -3,68 | -0,88 | -12,88                    | -6,99  | -8,96  | -9,39 | -7,27 | -4,89 | -2,45 |
| Média | -6,99                     | -7,88  | -8,00  | -6,07 | -6,38 | -4,53 | -1,07 | -10,01                    | -7,52  | -7,95  | -5,68 | -6,00 | -4,02 | -0,68 |

Legenda: ■ Bom ■ Regular ■ Ruim ■ Nível 1 (Muito ruim)

A análise conjunta dos dados da sala AT9 ilustra de forma inequívoca o impacto da ausência total de tratamento acústico. As superfícies reflexivas, formada apenas de materiais de alvenaria, como concreto e gesso, e materiais de ensino, como a madeira do quadro, não proveem dissipação de energia suficientes, apresentando um impacto positivo mínimo em bandas de frequência mais elevadas. Isso resulta em tempos de reverberação que excedem largamente qualquer critério de conforto ou inteligibilidade. Os valores de  $D_{50}$  muito abaixo de 50% e os valores de  $C_{50}$  consistentemente negativos indicam que a energia sonora tardia, prejudicial à inteligibilidade da fala, supera massivamente a energia sonora útil. Esta condição torna a sala acusticamente inadequada para qualquer atividade que dependa da inteligibilidade da fala, como aulas, reuniões e conferências.

#### 4.2.4 Comparativo

Nesta seção são apresentados os resultados para os parâmetros da Relação Sinal-Ruído (SNR) e do Speech Transmission Index (STI), além da comparação entre os resultados dos outros parâmetros apresentados anteriormente para cada uma das salas estudadas. Assim, é possível apresentar uma perspectiva mais visual acerca das diferentes características acústicas dos objetos de estudo.

A Tabela 25 apresenta os resultados obtidos para o STI em cada uma das salas e em cada uma das configurações fonte-receptor utilizadas. As salas do AT10 e AT5 apresentaram médias parecidas (0,740 e 0,731, respectivamente), situando-as na categoria “Bom” de inteligibilidade mostrada na Tabela 8. As duas configurações fonte-receptor utilizadas para o estudo da sala do AT9 apresentaram valores ainda mais próximos (0,606 e 0,604), situado no limite da categoria “Bom” e próximo da “Regular”.

Tabela 25: Valores de STI medidos nos diferentes impulsos para as configurações AT10, AT5, AT9 - Config 1 e AT9 - Config 2.

|       | AT10  | AT5   | AT9 - Config. 1 | AT9 - Config. 2 |
|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|
| F1R1  | 0,735 | 0,733 | 0,608           | 0,607           |
| F1R2  | 0,735 | 0,739 | 0,607           | 0,604           |
| F2R1  | 0,738 | 0,714 | 0,595           | 0,611           |
| F2R2  | 0,745 | 0,738 | 0,612           | 0,606           |
| F1R3  | 0,738 | 0,745 | 0,611           | 0,598           |
| F1R4  | 0,746 | 0,734 | 0,604           | 0,605           |
| F2R3  | 0,741 | 0,722 | 0,603           | 0,599           |
| F2R4  | 0,743 | 0,728 | 0,609           | 0,601           |
| Média | 0,740 | 0,731 | 0,606           | 0,604           |

Os resultados evidenciam que, apesar das diferenças observadas em suas curvas de  $T_{60}$  e outros parâmetros associados à inteligibilidade por banda de frequência, ambas as soluções acústicas (forro de fibra na AT10 e celulose projetada na AT5) são suficientes para garantir um nível aceitável de inteligibilidade da fala. Em contrapartida, a sala AT9 (sem tratamento) apresenta um desempenho drasticamente inferior e, apesar de ter a inteligibilidade da fala classificada como “Bom” dentro dos parâmetros da norma IEC 60268-16, o valor obtido é consideravelmente inferior ao das outras salas estudadas, o que evidencia uma perda significativa da compreensão da fala.

Expandindo a comparação entre as salas estudadas, o gráfico da Figura 16 apresenta uma comparação direta do Tempo de reverberação médio em função da frequência para as três salas estudadas. A disparidade entre a sala AT9, sem tratamento acústico, e as salas AT5 e AT10, com revestimentos, é imediatamente aparente. As curvas da AT9 para as diferentes configurações são praticamente idênticas e estão situadas em um patamar muito superior em comparação às outras salas. Este comportamento confirma a condição acusticamente precária e altamente reverberante da sala sem revestimento, cujos valores de  $T_{60}$  decaem suavemente, influenciados principalmente pela absorção do ar e da alvenaria em altas frequências.

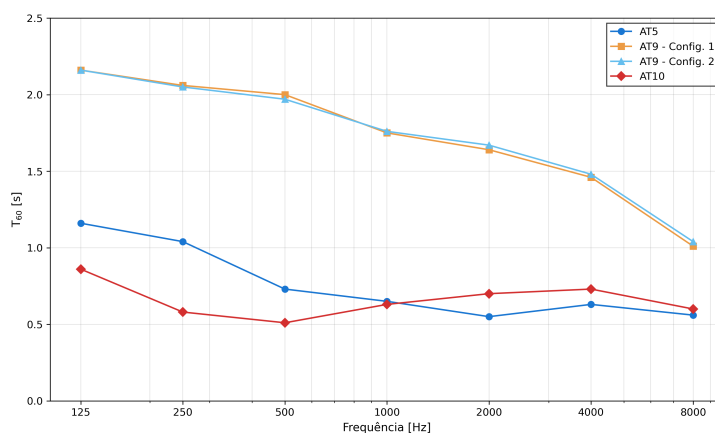


Figura 16: Valores de  $T_{60}$  para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas.

Em contraste, as salas tratadas AT5 e AT10 demonstram a eficácia de suas respectivas soluções acústicas, embora com perfis de absorção distintos. A sala AT5 exibe um  $T_{60}$  elevado nas bandas mais baixas, mas decai acentuadamente a partir da banda de 500 Hz, se mantendo em um patamar mais baixo que o AT10 em frequências mais elevadas. Já a sala do AT10, apresentou um patamar mais satisfatório em frequências mais baixas, o que indica uma maior eficiência da solução de forro de fibra justamente em bandas menos atenuadas por materiais comuns de alvenaria. Assim, é possível concluir que uma combinação entre os dois revestimentos, com forro de fibra do modelo do AT10 no teto e celulose projetada em parte das paredes, minimizaria o  $T_{60}$  no recinto em todo o espectro.

Uma comparação clara entre as duas salas pode ser feita a partir dos valores de coeficiente de absorção obtidos. A Tabela 14, referente ao revestimento de celulose do AT5, apresenta valores, no geral, mais elevados que os apresentados pela Tabela 19, referente aos valores estimados dos coeficientes de absorção para o AT10. Apesar disso, o resultado acústico obtido pelo AT10 foi considerado, em muitos aspectos, superior ao do AT5. Isso se explica pelo fato da espessura dos revestimentos, que tem um impacto significativo nos valores dos coeficientes de absorção. Os valores apresentados pela Tabela 14 se referem a um revestimento de 50 mm, porém a espessura do revestimento em sala do AT5 é provavelmente inferior.

O gráfico da Figura 17 consiste no gráfico análogo para a Claridade, em que é possível notar um comportamento inversamente correlacionado ao observado para o  $T_{60}$ . A sala não tratada, AT9 (Config. 1 e 2), demonstra um desempenho de clareza extremamente deficiente. Suas curvas, novamente quase sobrepostas, situam-se na região negativa do gráfico em quase todo o espectro, com valores positivos alcançados apenas na banda de 8000 Hz. Em contrapartida, a curva do AT10 apresenta valores negativos apenas nas duas primeiras bandas e permanece acima da curva do AT5 em 6 das 7 bandas analisadas, sendo a exceção a banda de 250 Hz, apesar dos valores permanecerem próximos.

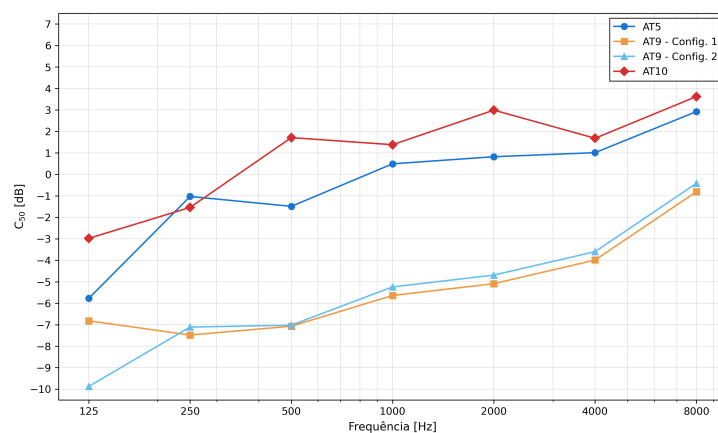


Figura 17: Valores de  $C_{50}$  para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas.

Um comportamento quase idêntico ao anterior é observado no gráfico de comparação da Definição (Figura 18) e do  $U_{50}$  com os ventiladores desligados (19), com o AT10 superando o

AT5 na proporção de energia útil em relação à tardia em todas as bandas com exceção da banda de 250 Hz. De forma análoga, as duas curvas referentes à sala do AT9 permanecem em valores consideravelmente inferiores com proporção de energia prejudicial maior que a útil em todas as bandas. Em comparação com a Figura 20, referente ao  $U_{50}$  calculado com os valores de SNR para os ventiladores ligados, nota-se uma considerável contribuição dos ventiladores para perda de qualidade sonora nas frequências médias.

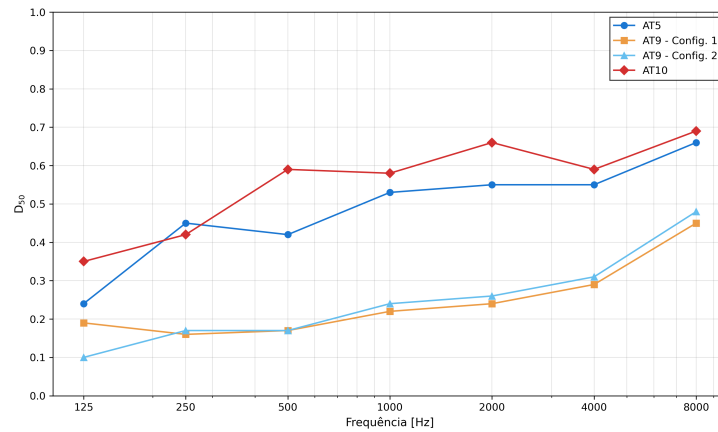


Figura 18: Valores de  $D_{50}$  para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas.

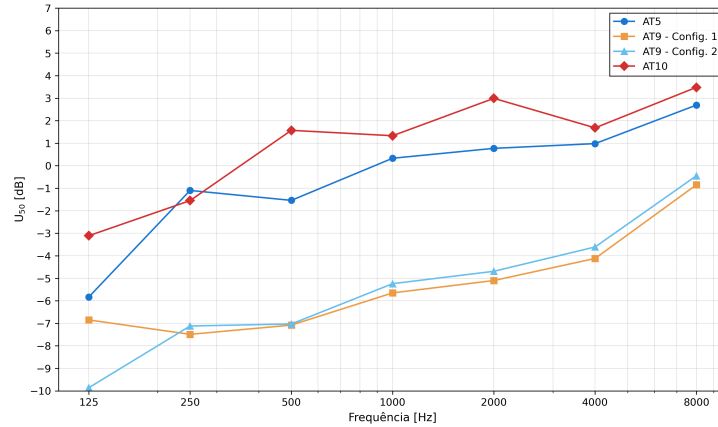


Figura 19: Valores de  $U_{50}$  para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas.

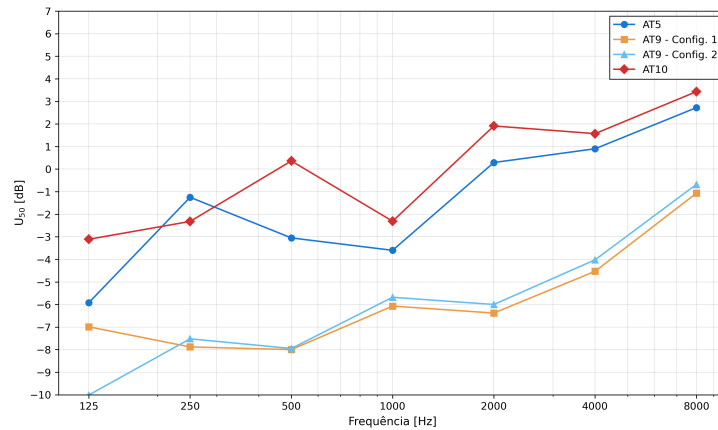


Figura 20: Valores de  $U_{50}$  (ventiladores ligados) para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas.

Por fim, as Figuras 21 e 22 mostram os valores obtidos do parâmetro IF ligado ao  $U_{50}$  (descrito pela Equação 22) para as salas de estudo com os ventiladores desligados e ligados, respectivamente. É possível notar que a sala do AT5 alcança o patamar de mais de 95 % de IF em 4 bandas de frequência, comparada com 3 do AT10 e 1 do AT9. Destaca-se, mais uma vez, o desempenho elevado do AT10 na banda de 500 Hz e o desempenho baixo do AT9 em praticamente todo o espectro, com exceção da banda de 8000 Hz. Nessa banda, a sala do AT9 conseguiu um desempenho tão satisfatório quanto as outras. Além disso, é possível notar que o ruído produzido pelos ventiladores afetou a inteligibilidade da fala mais intensamente na banda de 1000 Hz, porém não se notou um tão impacto relevante nas bandas de 2000 Hz e 4000 Hz.

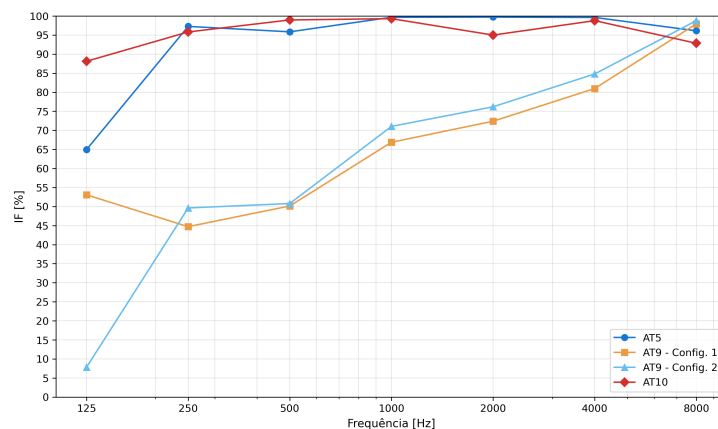


Figura 21: Valores do parâmetro de IF (%) para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas.

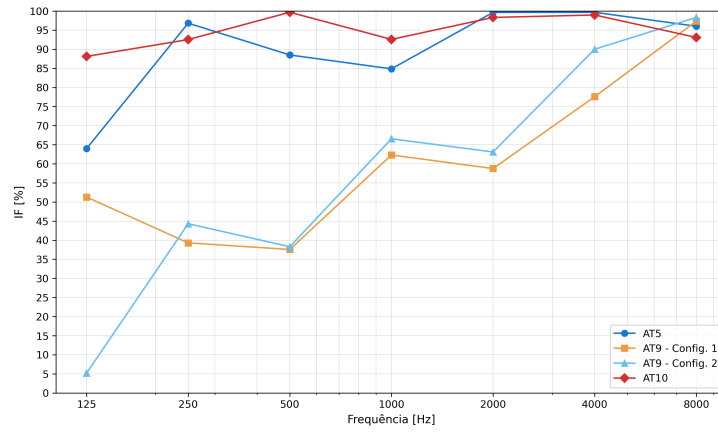


Figura 22: Valores do parâmetro de IF (%) (ventiladores ligados) para cada banda de oitava para cada uma das situações estudadas.

## 5 CONCLUSÕES

Neste estudo foram caracterizados os três diferentes tratamentos acústicos predominantes utilizados nos prédios de Aulas Teóricas (ATs) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), sendo eles os revestimentos de celulose projetada, forro de fibra e ausência de tratamento. Através de medições experimentais em salas de aula, tratamento da medição e desenvolvimento de diferentes parâmetros objetivos relacionados à inteligibilidade da fala, foi possível discutir a qualidade acústica das salas de aula a partir da perspectiva de sua atividade final, as aulas expositivas.

Os resultados obtidos evidenciam uma predominante fragilidade acústica presente nas salas de aula da universidade, principalmente nos ambientes em que o tratamento acústico foi negligenciado. Atualmente, o campus sede da instituição localizado em São Carlos apresenta três prédios destinados a aulas expositivas sem revestimento acústico algum. Entre eles, está o AT9, em que uma de suas salas foi objeto de estudo deste trabalho. Foi constatado a precariedade acústica presente, visto que o ambiente apresentou um desempenho bastante insatisfatório em quase todos os parâmetros acústicos desenvolvidos e em todo o espectro de frequências analisadas. Nesse sentido, destaca-se a baixa proporção entre energia útil e prejudicial à inteligibilidade da fala obtida na sala e o impacto causado pelo ruído produzido pelos ventiladores.

Dentre as soluções acústicas presentes, destaca-se como mais positivo o tratamento por forro de fibra do AT10. A sala em questão obteve o melhor desempenho dentre as estudadas, permitindo evidenciar sua efetividade na melhoria sonora, principalmente na redução da reverberação em médias e baixas frequências, uma característica mais incomum entre revestimentos de menor custo. Em comparação, a solução acústica de celulose projetada, predominante na maioria dos ATs do campus, apresentou um desempenho ligeiramente inferior, porém satisfatório, principalmente quando se trata de médias e altas frequências.

Em relação ao parâmetro mais robusto para predição da inteligibilidade da fala em recintos, o STI, as salas de aula do campus estudado foram enquadradas na categoria “Bom” da escala qualitativa da norma IEC 60269-16, apresentando valores medianos e no limite inferior da escala. Buscando aprimorar o desempenho acústico das salas de aula a partir de uma perspectiva de melhora da infraestrutura institucional, recomenda-se a utilização combinada de soluções especializadas para altas e baixas frequências. Conclui-se, portanto, que as salas de aula com a presença de tratamento da UFSCar apresentam um desempenho satisfatório em grande parte do espectro analisado. Em relação às salas sem tratamento, constatou-se uma condição acústica inadequada para a atividade destinada e, em geral, um desempenho consideravelmente inferior às salas com tratamento.

## REFERÊNCIAS

01DB-METRAVIB. **dBFA software suite: Frequency Analysis and much more – User Manual**. Limonest, France, jul. 2008. Version 4.9.

ABNT. **ABNT NBR 12179: Acústica – Tratamento acústico em recintos fechados**. Rio de Janeiro: [s. n.], 1973. Reimpressão, 1988.

ABNT. **ABNT NBR ISO 3382-1: Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas: Parte 1: Salas de espetáculos**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2017.

ABNT. **ABNT NBR ISO 3382-2: Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas: Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2017.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools (ANSI/ASA S12.60-2010)**. New York, NY: [s. n.], 2010.

AMERICAN SPEECH-LANGUAGE-HEARING ASSOCIATION. **Acoustics in Educational Settings: A Technical Report**. Rockville, MD, 2005.

ASTOLFI, Arianna *et al.* Influence of classroom acoustics on noise disturbance and well-being for first graders. **Frontiers in Psychology**, Frontiers Media SA, v. 10, p. 2736, 2019.

BERANEK, Leo L; KOPEC, John W. Wallace C. Sabine, acoustical consultant. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 69, n. 1, p. 1–16, 1981.

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. [S. l.]: Editora Blucher, 2018.

BRADLEY, John S. Predictors of speech intelligibility in rooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 80, n. 3, p. 837–845, 1986.

BRADLEY, John S. Speech intelligibility studies in classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 80, n. 3, p. 846–854, 1986.

BRADLEY, John S; SATO, Hiroshi. The intelligibility of speech in elementary school classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, AIP Publishing, v. 123, n. 4, p. 2078–2086, 2008.

BRADLEY, JS. A comparison of three classical concert halls. **The journal of the acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 89, n. 3, p. 1176–1192, 1991.

BRANDÃO, Eric. **Acústica de salas: projeto e modelagem**. [S. l.]: Editora Blucher, 2018.

CHO, Young-Ji. Comparison of two types of combined measures, STI and U50, for predicting speech intelligibility in classrooms. **Archives of Acoustics**, Polish Academy of Sciences, Institute of Fundamental Technological Research . . . , 2017.

COMMISSION, International Electrotechnical *et al.* Sound System Equipment-Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. **IEC 60268-16 Ed. 3.0**, 2003.

CUSTÓDIO, Marcelo Felipe; GERGES, Samir NY. Qualidade sonora através de ensaios experimentais em centro de convenções multiuso. **ENTAC. Rio de Janeiro**, 2006.

EVEREST, F Alton. **Master handbook of acoustics**. [S. l.: s. n.], 2022.

FAJT, Siniša; KRHEN, Miljenko; MARUŠIĆ, Tončo. Method of evaluating the quality of room acoustics based on energy relations of sound. **Tehnički glasnik**, Sveučilište Sjever, v. 8, n. 3, p. 222–228, 2014.

GRAS SOUND & VIBRATION. **GRAS 46AE 1/2” CCP Free-field Standard Microphone Set**. [S. l.: s. n.]. Disponível em:  
<https://www.grasacoustics.com/products/product/140-46ae>. Acesso em: 10 dez. 2025.

HAAS, Helmut. Über den Einfluß eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache. **Acta Acustica united with Acustica**, European Acoustics Association, v. 1, n. 2, p. 49–58, 1951.

HOUTGAST, Tammo; STEENEKEN, Herman JM. A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 77, n. 3, p. 1069–1077, 1985.

HUPALO, Cristiane. **Reverberação nas Salas do ISEP**. 2017. Diss. (Mestrado) – Instituto Politecnico do Porto (Portugal).

KLANGPORNKUN, Nittayapa *et al.* Predictions from “speech banana” and audiograms: Assessment of hearing deficits in Thai hearing loss patients. *In: ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA*, 1. PROCEEDINGS of Meetings on Acoustics. [S. l.: s. n.], 2013. v. 20, p. 060004.

KLATTE, Maria *et al.* Effects of classroom acoustics on performance and well-being in elementary school children: A field study. **Environment and Behavior**, Sage Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 42, n. 5, p. 659–692, 2010.

KNAUF INSULATION. **Rocksilk R RS100**. Knauf Insulation Ltd. 2024. Disponível em:  
[https://knauf.com/en-GB/p/product/rocksilk-r-rs100-26367\\_4206](https://knauf.com/en-GB/p/product/rocksilk-r-rs100-26367_4206). Acesso em: 4 nov. 2025.

KUTTRUFF, Heinrich; VORLÄNDER, Michael. **Room acoustics**. [S. l.]: Crc Press, 2024.

LONG, Marshall. **Architectural acoustics**. [S. l.]: Elsevier, 2005.

PÄTYNEN, Jukka; KATZ, Brian FG; LOKKI, Tapio. Investigations on the balloon as an impulse source. **The Journal of the Acoustical Society of America**, AIP Publishing, v. 129, n. 1, e127–e133, 2011.

REICHARDT, Walter. Definition und Messgrundlage eines objektiven Masses zur Ermittlung der Grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit bei Musikdarbietung. **Acustica**, v. 32, p. 126–137, 1975.

REICHARDT, Walter; ALIM, O Abdel; SCHMIDT, W. Abhängigkeit der grenzen zwischen brauchbarer und unbrauchbarer durchsichtigkeit von der art des musikmotives, der nachhallzeit und der nachhalleinsatzzeit. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 7, n. 4, p. 243–264, 1974.

ROSSING, Thomas. **Springer handbook of acoustics**. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2007.

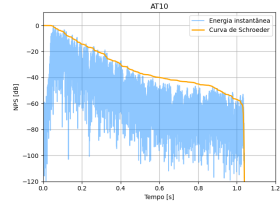
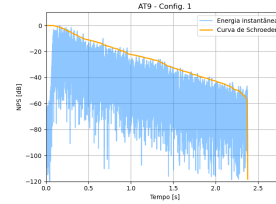
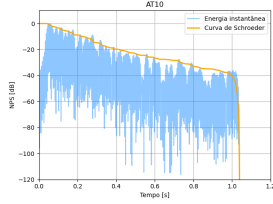
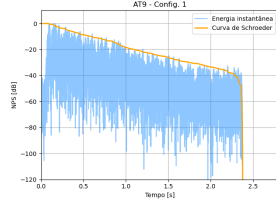
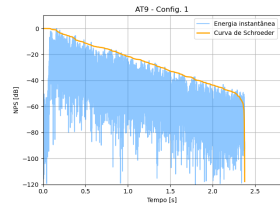
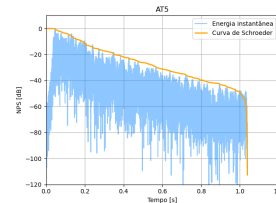
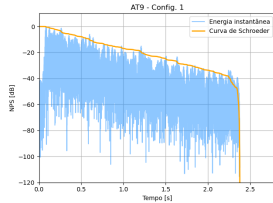
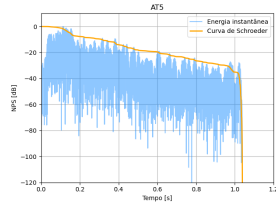
SCHROEDER, Manfred R. Integrated-impulse method measuring sound decay without using impulses. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 66, n. 2, p. 497–500, 1979.

STEENEKEN, Herman JM; HOUTGAST, Tammo. Basics of the STI measuring method. *In: PAST, Present, and Future of the Speech Transmission Index*, International Symposium on STI, The Netherlands. [S. l.: s. n.], 2002. p. 13–44.

VALENTE, Daniel L *et al.* Experimental investigation of the effects of the acoustical conditions in a simulated classroom on speech recognition and learning in children. **The Journal of the Acoustical Society of America**, AIP Publishing, v. 131, n. 1, p. 232–246, 2012.

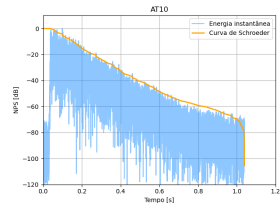
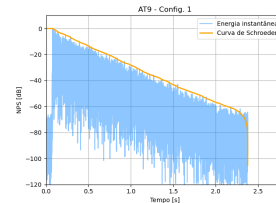
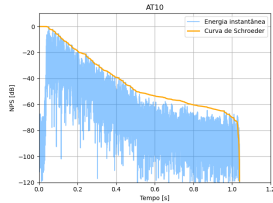
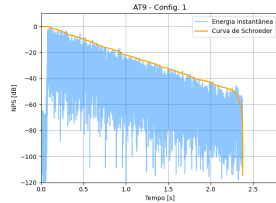
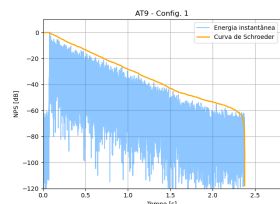
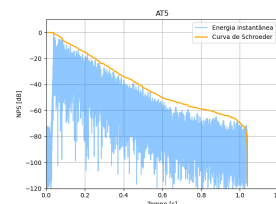
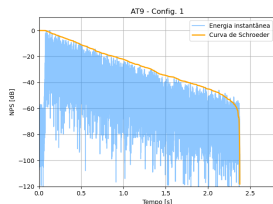
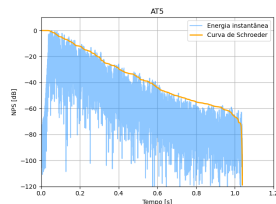
YOUNG, Robert W. Sabine reverberation equation and sound power calculations. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 31, n. 7, p. 912–921, 1959.

# APÊNDICE A – CONTEÚDO COMPLEMENTAR AO DESENVOLVIMENTO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO



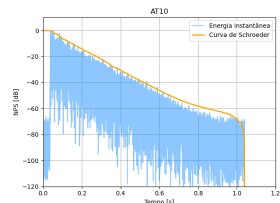
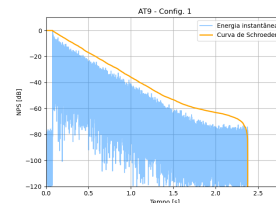
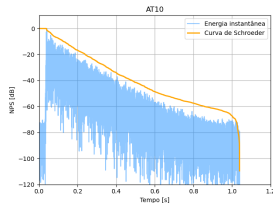
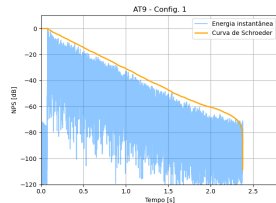
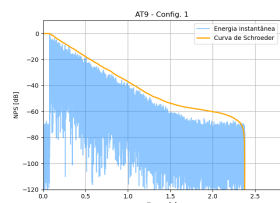
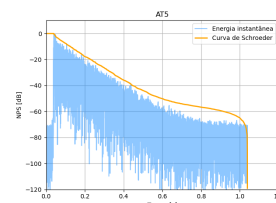
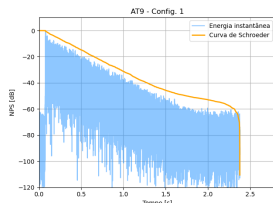
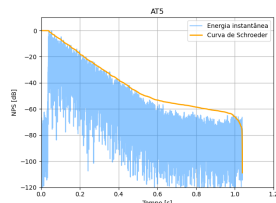
(a) 125 Hz

(b) 250 Hz



(c) 500 Hz

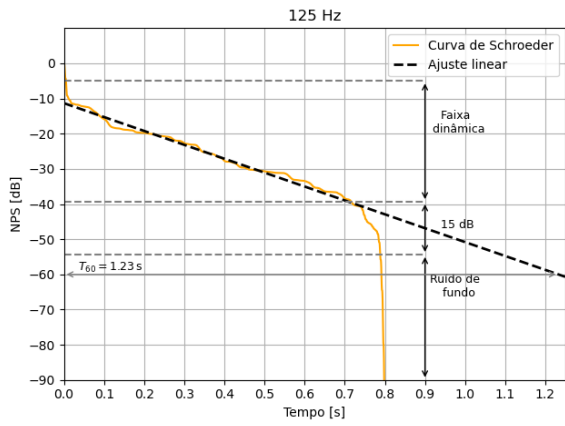
(d) 1000 Hz



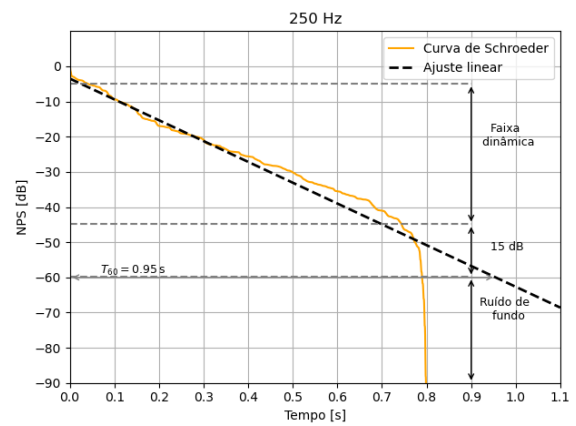
(e) 2000 Hz

(f) 4000 Hz

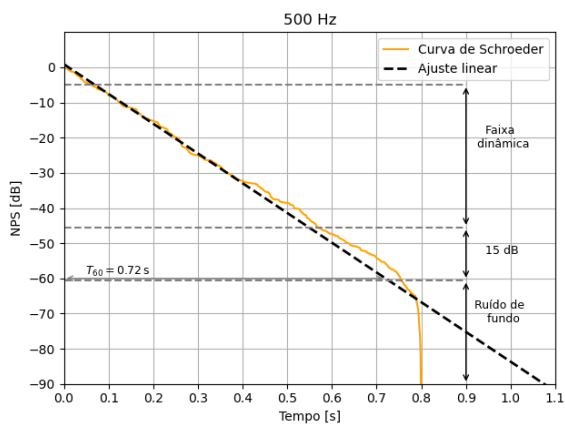
Figura 23: Resposta ao impulso juntamente com a envoltória (curva de Schroeder) para o sinal filtrado em cada frequência central em banda de oitava. Cada subfigura apresenta as 4 medidas (AT5, AT9-1, AT9-2, AT10) para a respectiva frequência.



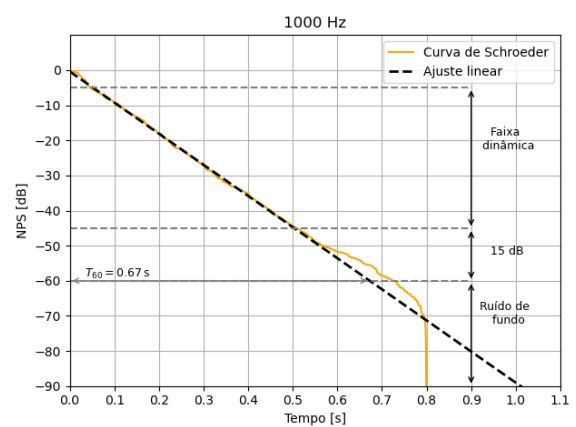
(a)



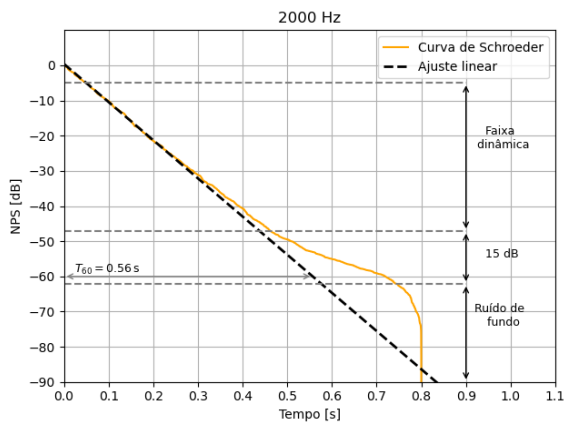
(b)



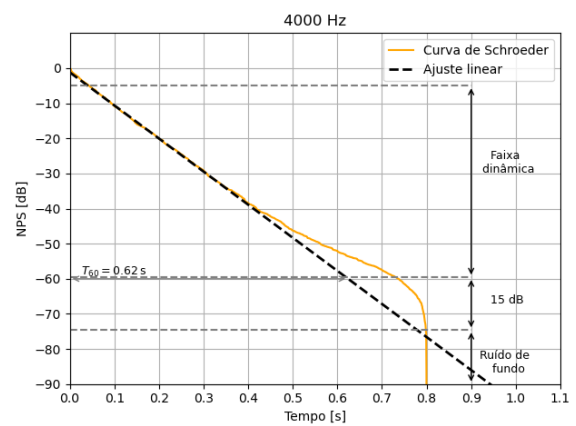
(c)



(d)

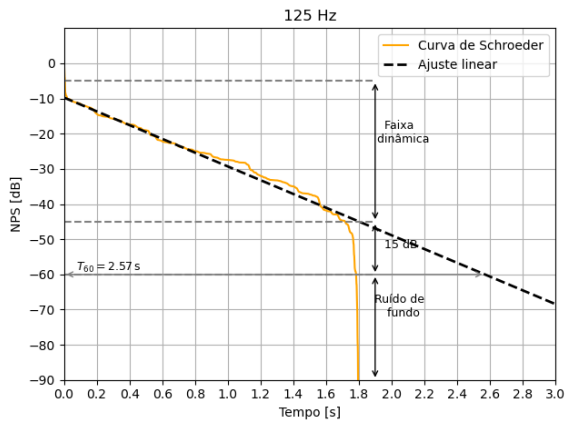


(e)

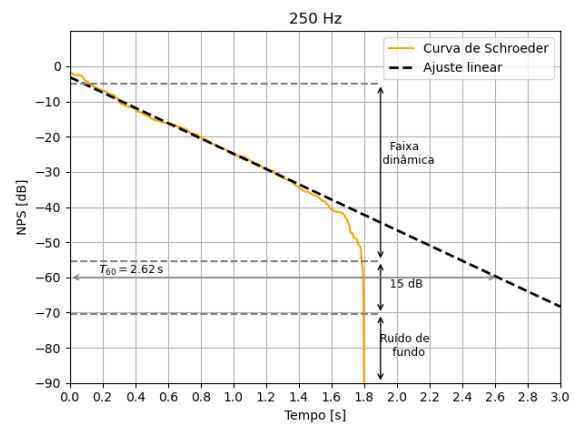


(f)

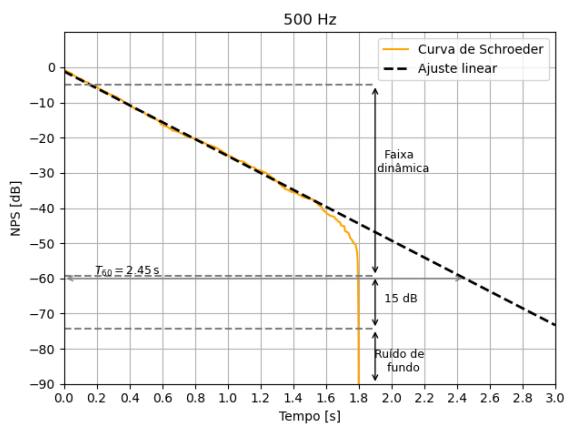
Figura 24: Curva de Schroeder e ajuste linear para o intervalo de -5 a -25 dB, onde o valor de  $T_{60}$  é obtido e a partir do cálculo do  $T_{20}$ . Resultado referente à medição na posição F1R1 da sala do AT5



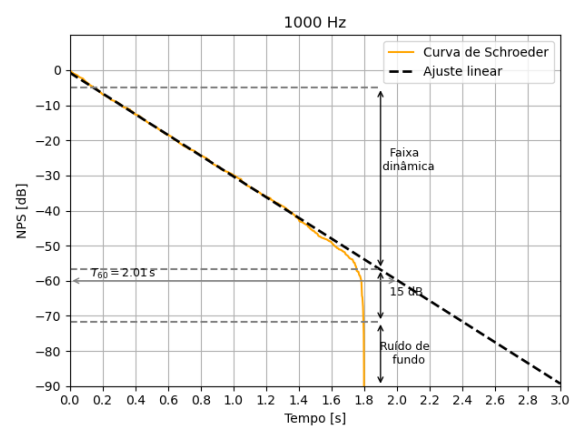
(a)



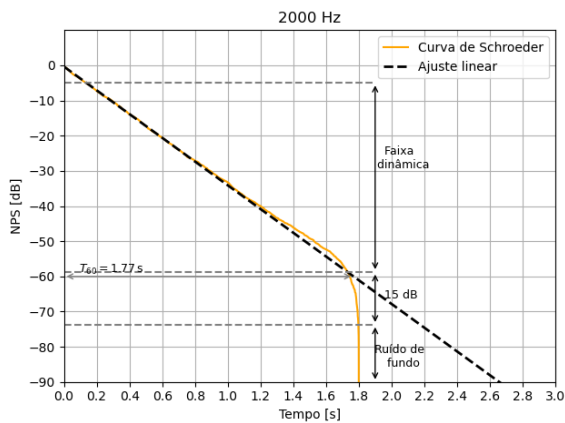
(b)



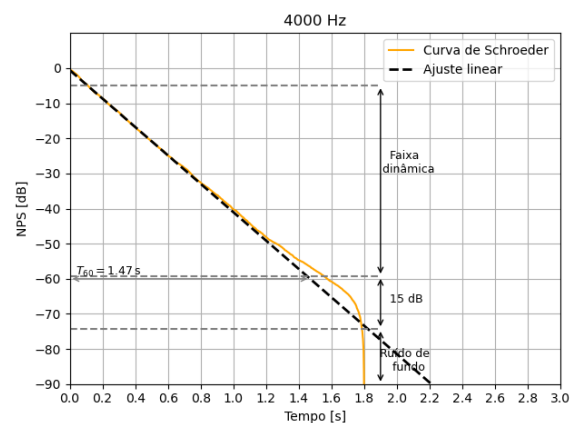
(c)



(d)

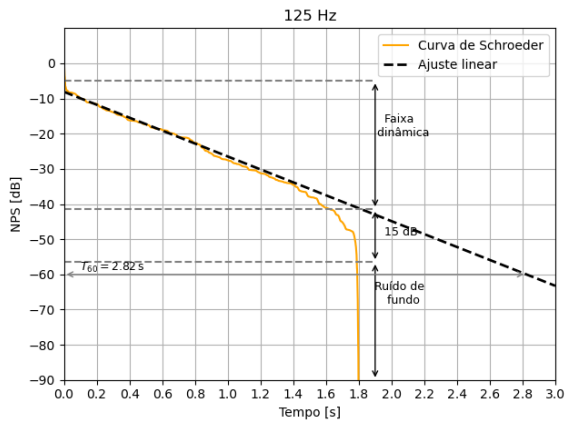


(e)

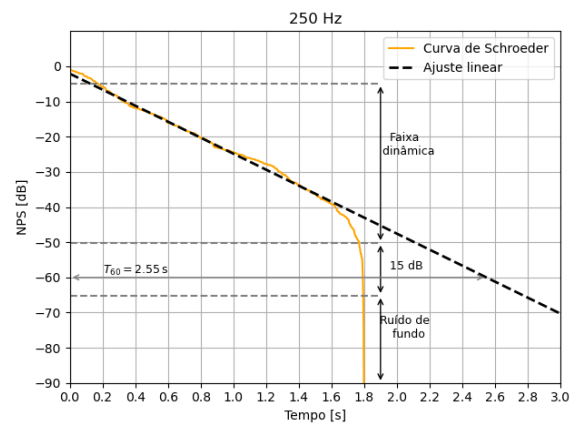


(f)

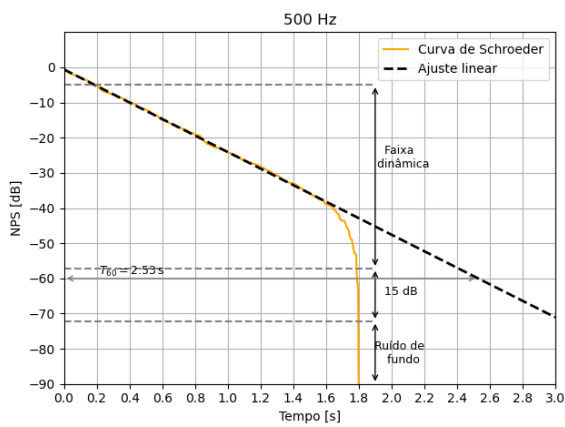
Figura 25: Curva de Schroeder e ajuste linear para o intervalo de -5 a -25 dB, onde o valor de  $T_{60}$  é obtido e a partir do cálculo do  $T_{20}$ . Resultado referente à medição na posição FIR1 da sala do AT9 (Configuração 1).



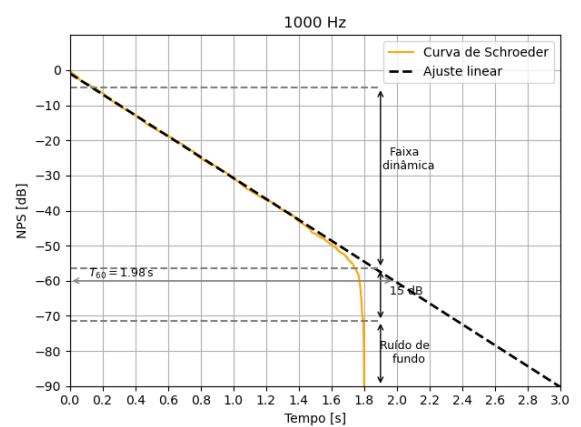
(a)



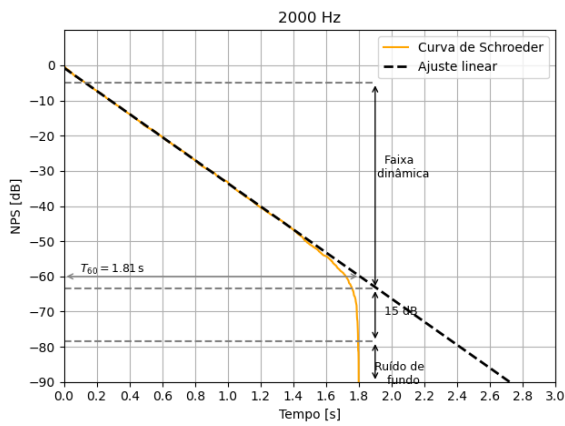
(b)



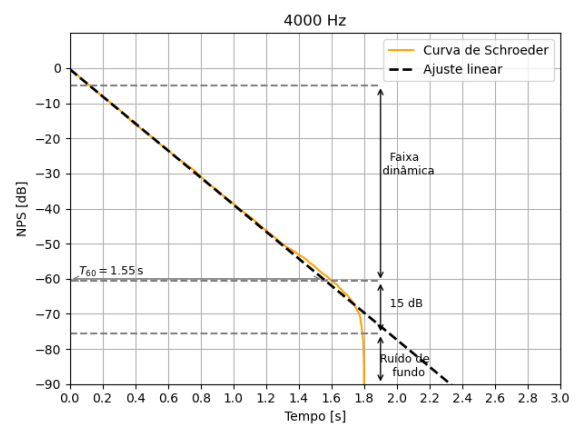
(c)



(d)

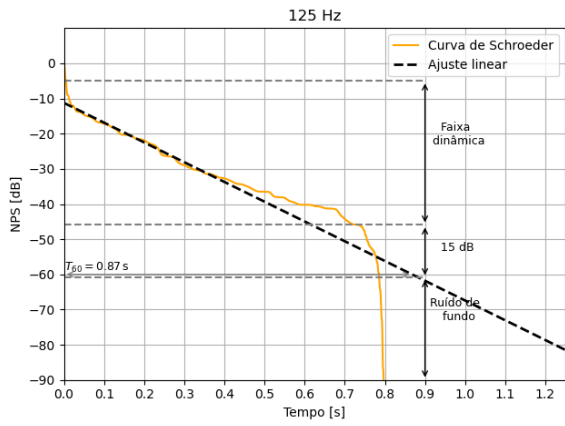


(e)

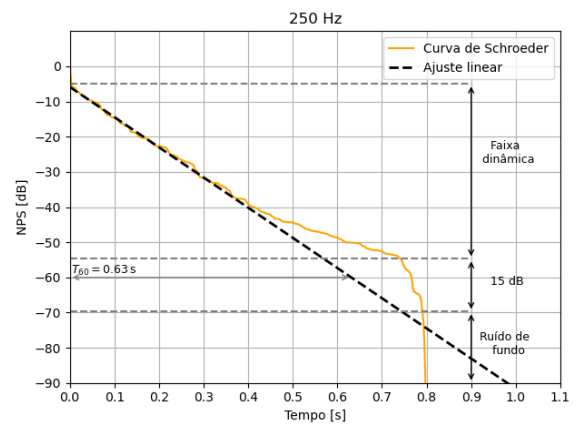


(f)

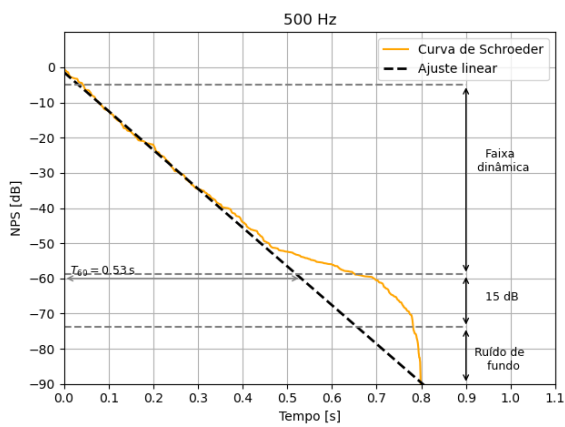
Figura 26: Curva de Schroeder e ajuste linear para o intervalo de -5 a -25 dB, onde o valor de  $T_{60}$  é obtido e a partir do cálculo do  $T_{20}$ . Resultado referente à medição na posição FIR1 da sala do AT9 (Configuração 2).



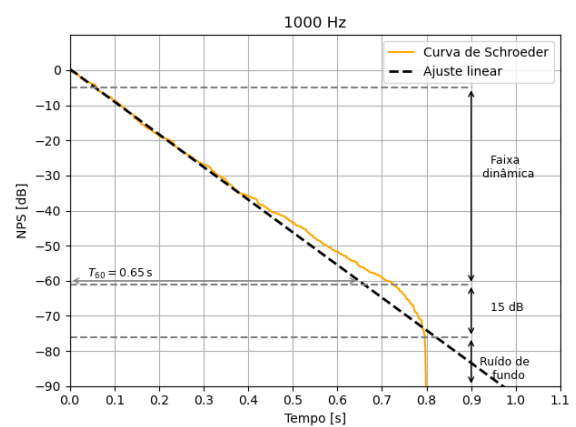
(a)



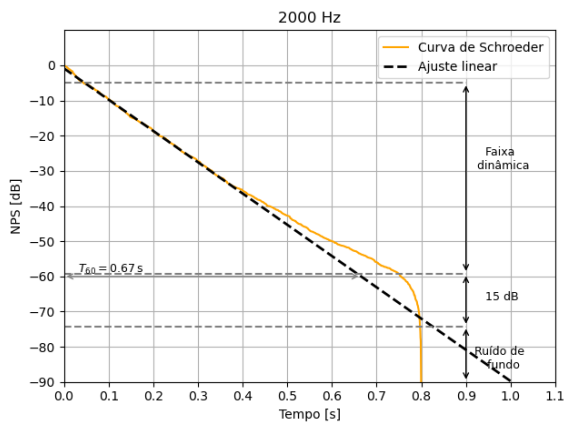
(b)



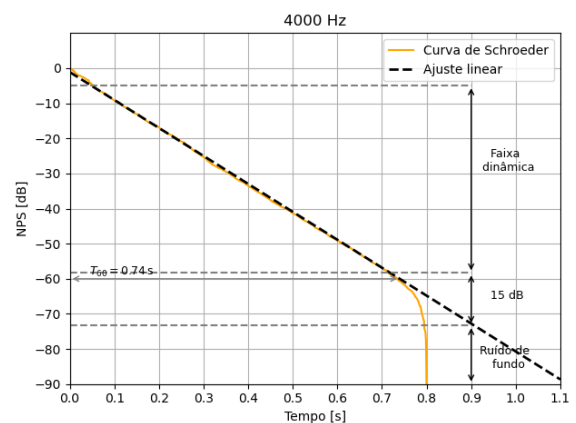
(c)



(d)



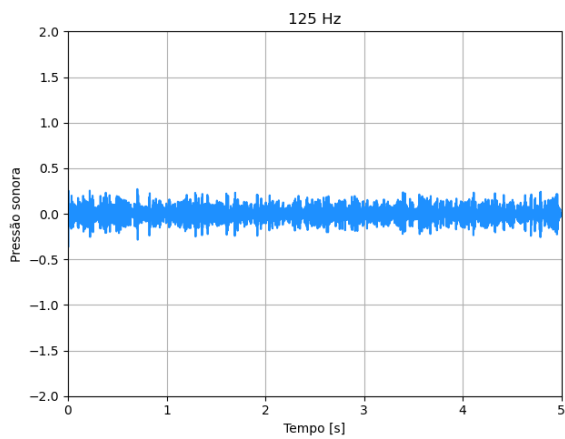
(e)



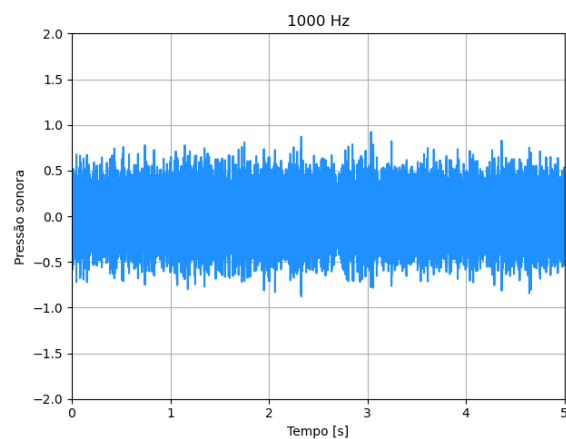
(f)

Figura 27: Curva de Schroeder e ajuste linear para o intervalo de -5 a -25 dB, onde o valor de  $T_{60}$  é obtido e a partir do cálculo do  $T_{20}$ . Resultado referente à medição na posição F1R1 da sala do AT10.

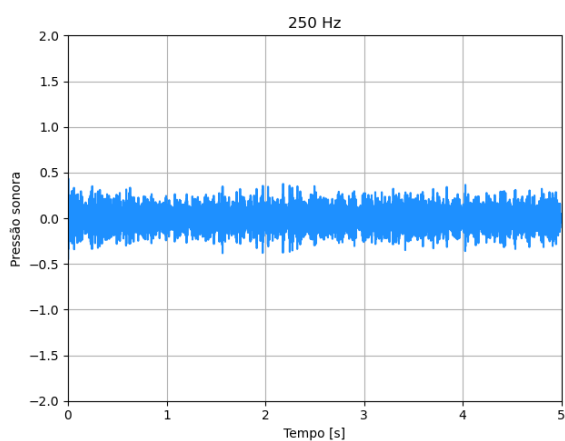
## APÊNDICE B – CONTEÚDO COMPLEMENTAR AO DESENVOLVIMENTO DO STI



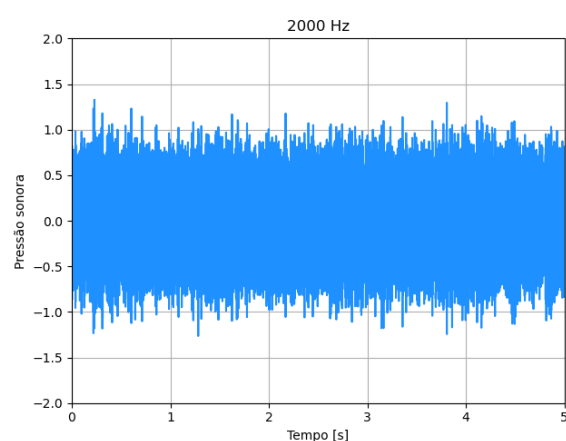
(a)



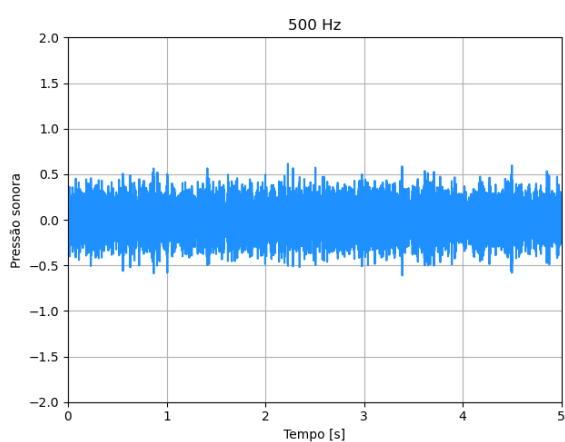
(d)



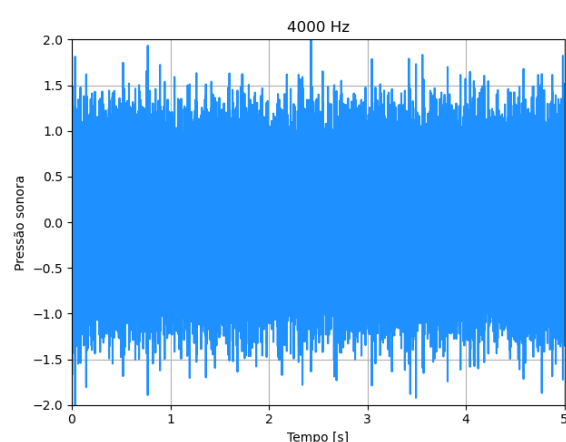
(b)



(e)



(c)



(f)

Figura 28: Sinais anecoicos para cada uma das 7 frequências centrais da banda de oitava.

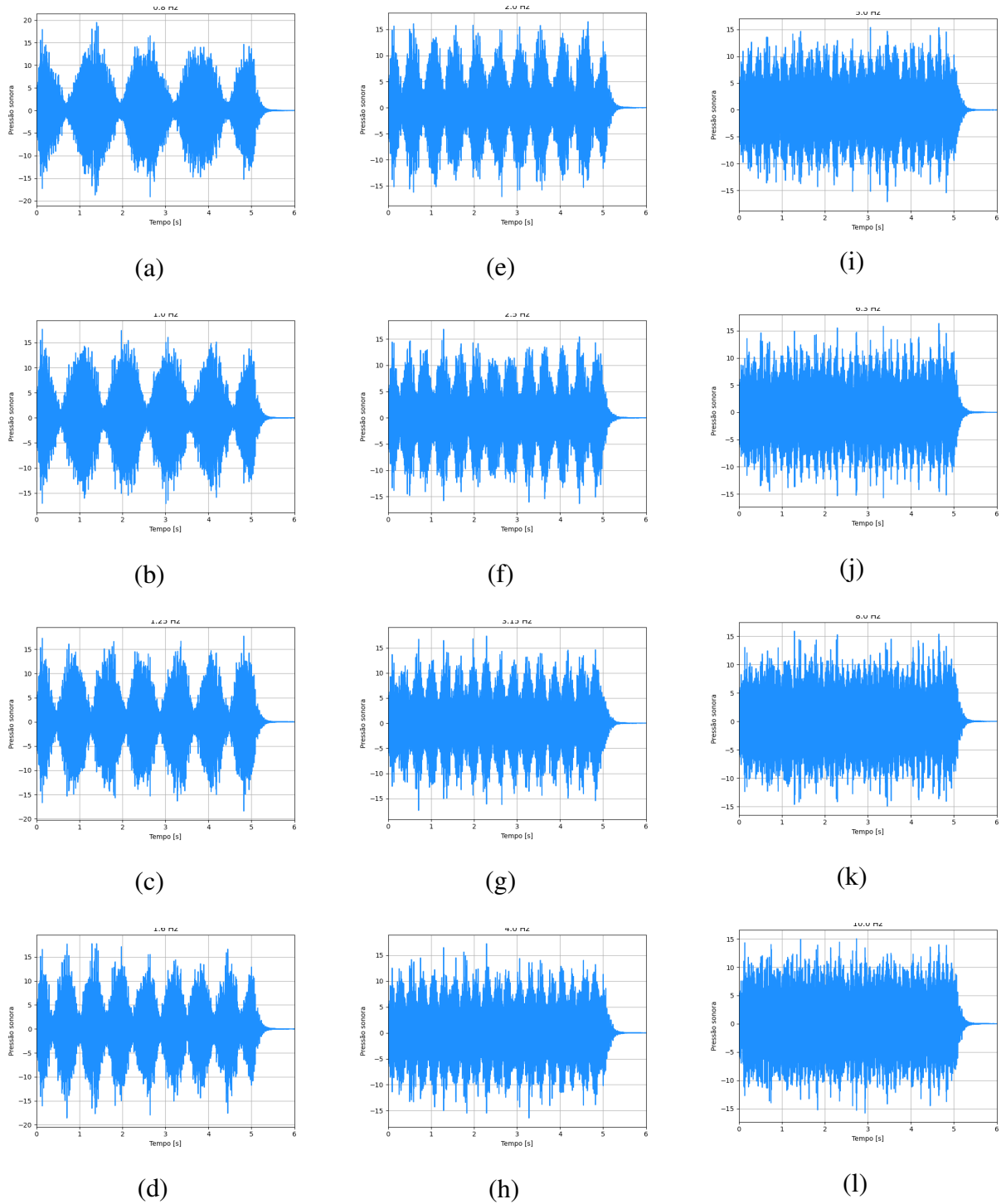


Figura 29: Sinais após a operação de convolução para 12 das 14 frequências de modulação referente ao sinal modulado de 1000 Hz. Foi utilizado como  $h(t)$ , nesse caso, o resultado para a banda de 1000 Hz da medição FIR1 do AT10.