

Bruno Neves Pagano Lima

**Medição e Análise da Resposta em Frequência,
Tempo de Reverberação e Nível de Ruído em
Ambientes de Ensino**

Belo Horizonte

2022

Bruno Neves Pagano Lima

Medição e Análise da Resposta em Frequência, Tempo de Reverberação e Nível de Ruído em Ambientes de Ensino

Monografia apresentada durante o Seminário dos Trabalhos de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Escola de Engenharia

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Hani Camille Yehia

Belo Horizonte

2022

Este trabalho é dedicado a meus familiares e amigos.

*“A música exprime a mais alta filosofia,
numa linguagem que a razão não comprehende.“*
(Arthur Schopenhauer)

Resumo

Parâmetros acústicos relevantes como tempo de reverberação, resposta ao impulso, e nível de ruído foram medidos em três ambientes de um campus pequeno de uma faculdade em Belo Horizonte. A partir das medições foram feitas avaliações com relação à qualidade da acústica de cada sala, sua adequação à finalidade do local, bem como comparações com sua geometria e materiais presentes. Possíveis mudanças são apresentadas para que a inteligibilidade e conforto acústico dos locais possam ser melhorados. Todos os conceitos matemáticos, físicos, acústicos e de processamento, necessários para o entendimento da metodologia e dos resultados foram explicados em detalhes.

Palavras-chaves: acústica. salas. auditórios. inteligibilidade da fala. conforto acústico. reverberação. resposta ao impulso. resposta em frequência. nível de ruído. dsp. modos acústicos. ambientes de ensino.

Abstract

Relevant acoustic parameters, such as reverberation time, impulse response and noise level were measured in three different rooms of a university campus in Belo Horizonte. With this data, a complete acoustical analysis of each room was made. Possible reasons for the results, were discussed, along with suitable acoustic treatments, to address the problems found. All the mathematical, physical, acoustical and DSP concepts needed to understand the methodology and results, were explained in details.

Key-words: acoustics. speech. intelligibility. reverberation. impulse response. frequency response. noise level. dsp. room modes.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de magnitude e fase, em função da frequência, em escala logarítmica. [Oppenheim (2010, seção 6.3)]	18
Figura 2 – Regiões da audição humana e limiares. [Fastl e Zwicker (2007, seção 2.1)]	19
Figura 3 – Regressão linear feita a partir de um conjunto de medições.	20
Figura 4 – Resposta em frequência qualitativa por tipo de filtro.	21
Figura 5 – Magnitude da função de transferência do filtro passa baixas de Butterworth para diferentes valores de ordem n. [Thompson (2014)]	22
Figura 6 – Impulso unitário de tempo discreto. [Oppenheim (2010, seção 1.4)]	23
Figura 7 – Impulso unitário de tempo contínuo. [Oppenheim (2010, seção 1.4)]	23
Figura 8 – Modos de uma sala. a) Modos axiais. b) Modos tangenciais. c) Modos oblíquos. [Newell (2012, seção 4.2)]	24
Figura 9 – Onda estacionária em uma sala. [Newell (2012, seção 4.3)]	24
Figura 10 – Influência dos modos da sala, em sua resposta em frequência. [Newell (2012, seção 4.2)]	25
Figura 11 – Reflexões no ambiente que causam a reverberação. [Hush (2015)]	26
Figura 12 – Efeito de 'cauda' no sinal sonoro, criado pela reverberação. [Conwed (2019)]	27
Figura 13 – Curvas de Equal Loudness de Robinson-Dadson. [Newell (2012, seção 2.1)]	29
Figura 14 – Aproximação da curva de ponderação A, conforme a função de transferência 2.16	30
Figura 15 – Aproximação da curva de ponderação C, conforme a função de transferência 2.17	30
Figura 16 – Demonstração da Transferência de Modulação. [Brüel (2013)]	31
Figura 17 – Coeficiente de Absorção em Função da Frequência para Diferentes Materiais. [Newell (2012, seção 4.5.4)]	35
Figura 18 – Diagrama de conexão dos equipamentos utilizados no estudo.	37
Figura 19 – Ilustração da Sala de Aula.	38
Figura 20 – Foto da Sala de Aula.	39
Figura 21 – Ilustração da Sala de Conferência.	39
Figura 22 – Foto da Sala de Conferência.	40
Figura 23 – Ilustração do Auditório.	40
Figura 24 – Foto do Auditório.	41
Figura 25 – Caixa acústica utilizada no estudo.	41
Figura 26 – Resposta em frequência da caixa utilizada.	42
Figura 27 – Representação do TSP gerado no tempo e conteúdo em frequência.	43

Figura 28 – Representação do espectrograma do TSP gerado.	43
Figura 29 – Microfone utilizado nas medições.	44
Figura 30 – Resposta em frequência do microfone utilizado. [Manual do produto].	44
Figura 31 – Diagrama de captação do microfone utilizado. [Manual do produto].	45
Figura 32 – Calibrador de Microfone Utilizado .	46
Figura 33 – Decaimento da reverberação e nível de ruído.	48
Figura 34 – Função de transferência dos filtros de Butterworth gerados.	49
Figura 35 – Gráfico de nível de ruído medido na sala de aula, em dBA.	51
Figura 36 – Gráfico de nível de ruído medido na sala de aula, em dBC.	51
Figura 37 – Gráfico de nível de ruído medido na sala de conferência, em dBA.	52
Figura 38 – Gráfico de nível de ruído medido na sala de conferência, em dBC.	52
Figura 39 – Gráfico de nível de ruído medido na sala de conferência, com ar condicionado ligado, em dBA.	53
Figura 40 – Gráfico de nível de ruído medido na sala de conferência, com ar condicionado ligado, em dBC.	53
Figura 41 – Gráfico de nível de ruído medido no auditório, em dBA.	54
Figura 42 – Gráfico de nível de ruído medido no auditório, em dBC.	54
Figura 43 – Gráfico das três medições da resposta ao impulso da sala de aula.	55
Figura 44 – Gráfico das três medições da resposta ao impulso da sala de conferência.	56
Figura 45 – Gráfico das três medições da resposta ao impulso do auditório.	57
Figura 46 – Gráfico das respostas temporais, por terço de oitava, medição 2, e gráfico de RT60 em função da frequência, da sala de aula.	59
Figura 47 – Gráfico das respostas temporais, por terço de oitava, medição 2, e gráfico de RT60 em função da frequência, da sala de conferência.	60
Figura 48 – Gráfico das respostas temporais, por terço de oitava, medição 2, e gráfico de RT60 em função da frequência, do auditório.	61
Figura 49 – Gráfico da resposta em frequência da sala de aula.	62
Figura 50 – Gráfico da resposta em frequência da sala de conferência.	64
Figura 51 – Gráfico da resposta em frequência do auditório.	66

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de valores de coeficiente de absorção α , em função da frequência, para diversos valores de espessura. [Newell (2012, seção 4.5)]	35
Tabela 2 – Tabela de valores de coeficiente de absorção α , em função da frequência, para diversos valores de densidade. [Newell (2012, seção 4.5)]	36
Tabela 3 – Tabela de valores de RT60 total, medidos na sala de aula	55
Tabela 4 – Tabela de valores de RT60 total, medidos na sala de conferência	56
Tabela 5 – Tabela de valores de RT60 total, medidos no auditório	57
Tabela 6 – Tabela de modos ressonantes esperados para a sala de aula, com base na equação 2.12.	63
Tabela 7 – Tabela de parte dos máximos e mínimos locais, da resposta em frequência da sala de aula, medição 1.	63
Tabela 8 – Tabela de modos ressonantes esperados para a sala de conferência, com base na equação 2.12.	65
Tabela 9 – Tabela de parte dos máximos e mínimos locais, da resposta em frequência da sala de conferência, medição 1.	65
Tabela 10 – Tabela de parte dos máximos e mínimos locais, da resposta em frequência do auditório, medição 1.	67

Lista de abreviaturas e siglas

MTF	Função de Transferência de Modulação
RT60	Tempo de Reverberação
SNR	Relação Sinal-Ruído
TSP	Time Stretched Pulse
DFT	Transformada Discreta de Fourier
IDFT	Transformada Inversa Discreta de Fourier
LTIS	Sistema Linear e Invariante no Tempo
SPL	Sound Pressure Level (Ref: 20 uPa)
dB	decibel
Hz	hertz
Pa	pascal

Lista de símbolos

α	Coeficiente de absorção de um material
F_S	Frequência de amostragem
T	Período
L	Número de amostras
n_0	Número de amostras a serem avaliadas
F_C	Vetor de frequências separadas por terço de oitava
$x[n]$	Sinal de entrada no domínio do tempo discreto
$X(e^{j\omega})$	Sinal de entrada no domínio da frequência
$y_{Lin}(n)$	Sinal de saída (medido) no domínio de tempo discreto, em escala de amplitude linear
$y[n]$	Sinal de saída (medido) no domínio do tempo discreto
$Y(e^{j\omega})$	Sinal de saída (medido) no domínio da frequência
$h[n]$	Resposta ao impulso do ambiente, no domínio do tempo discreto
$H(e^{j\omega})$	Resposta ao impulso do ambiente, no domínio da frequência
$\delta[n]$	Impulso unitário no domínio discreto
$\delta(t)$	Impulso unitário no domínio contínuo
t	Vetor de tempo
$RT60$	Tempo de reverberação total
$RT60_{FC}$	Tempo de reverberação específico para cada frequência
σ	Desvio Padrão

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Acústica de Salas	14
1.2	História Recente	14
1.3	Parâmetros de Interesse	15
1.4	Objetivos Deste Trabalho	15
1.5	Formato de Apresentação	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Conceitos Importantes	17
2.1.1	Convolução	17
2.1.2	Domínio da Frequência	17
2.1.3	Escala Logarítmica	18
2.1.4	Regressão Linear	20
2.1.5	Filtros	20
2.1.5.1	Tipos de Filtro	20
2.1.5.2	Filtros de 1a Ordem	21
2.1.5.3	Filtros de Butterworth	21
2.1.6	Desvio Padrão	22
2.2	Parâmetros Acústicos	23
2.2.1	Resposta ao Impulso	23
2.2.2	Reverberação	26
2.2.3	Ruído	28
2.2.4	Transferência de Modulação	30
2.3	Métodos de Medição da Resposta ao Impulso	31
2.3.1	Maximum Length Sequence (MLS)	31
2.3.2	Inverse Repeated Sequence (IRS)	32
2.3.3	Time-Stretched Pulse (TSP)	32
2.4	Tratamento Acústico	34
2.4.1	Coeficiente de Absorção	34
2.5	Síntese	36
3	METODOLOGIA	37
3.1	Ambientes Avaliados	37
3.1.1	Ambiente 1: Sala de Aula	38
3.1.2	Ambiente 2: Sala de Conferência	39
3.1.3	Ambiente 3: Auditório	40

3.2	Emissão do Sinal de Excitação	41
3.2.1	Alto Falante	41
3.2.2	Sinal	42
3.3	Captação da Resposta do Ambiente	44
3.3.1	Microfone	44
3.3.2	Medição da Resposta do Ambiente	45
3.3.3	Medição do Ruído	45
3.4	Processamento dos Dados	47
3.4.1	Cálculo da Resposta ao Impulso	47
3.4.2	Cálculo do Tempo de Reverberação (RT60)	47
3.4.2.1	RT60 Total	47
3.4.2.2	RT60 em Terços de Oitava	48
3.5	Resultados	50
3.5.1	Apresentação dos Resultados	50
3.5.2	Discussão dos Resultados	50
4	RESULTADOS	51
4.1	Ruído	51
4.1.1	Sala de Aula	51
4.1.2	Sala de Conferência	52
4.1.3	Auditório	54
4.2	Resposta ao Impulso e RT60 Total	55
4.2.1	Sala de Aula	55
4.2.2	Sala de Conferência	56
4.2.3	Auditório	57
4.3	Resposta temporal e RT60, por Terço de Oitava	59
4.3.1	Sala de Aula	59
4.3.2	Sala de Conferência	60
4.3.3	Auditório	61
4.4	Resposta em Frequência	62
4.4.1	Sala de Aula	62
4.4.2	Sala de Conferência	64
4.4.3	Auditório	66
5	DISCUSSÃO	68
5.1	Ruído	68
5.2	Tempo de Reverberação	68
5.3	Resposta em Frequência	70
6	CONCLUSÃO	72

REFERÊNCIAS	73
--------------------	-----------

ANEXOS	76
---------------	-----------

ANEXO A – CÓDIGOS DO MATLAB UTILIZADOS	77
A.1 Geração do TSP	77
A.1.1 Definição dos Parâmetros do Sinal	77
A.1.2 Criação do Sinal e Escrita do Arquivo	77
A.1.3 Geração dos Gráficos de Representação do Sinal	78
A.1.3.1 Representação do Sinal no Domínio da Frequência	79
A.1.3.2 Representação do Sinal no Domínio do Tempo	79
A.1.3.3 Representação do Espectrograma do Sinal	80
A.2 Análise da Resposta do Ambiente	80
A.2.1 Definição dos Parâmetros Constantes	80
A.2.2 Leitura do Arquivo e Resposta ao Impulso	81
A.2.3 Resposta em Frequência	81
A.2.4 Regressão Linear do Decaimento do Sinal	82
A.2.5 Gráfico do Decaimento do Sinal e de sua Regressão Linear	82
A.2.6 Valor do RT60 Geral	83
A.2.7 Vetor de Frequências de Terço de Oitava	83
A.2.8 Filtros de Butterworth Utilizados	83
A.2.9 Filtragem do Sinal e Avaliação Individual para cada Região de Frequência	84
A.2.10 Cálculo e Geração do Gráfico de RT60 Versus Frequência, com Desvio Padrão	85
A.3 Medição do Ruído	86
A.4 Cálculo dos Modos da Sala	87

1 Introdução

1.1 Acústica de Salas

A acústica é o ramo da física associado ao estudo do som e dos fenômenos a ele relacionados. Entre suas aplicações, está o estudo da resposta de ambientes às ondas sonoras [Brigham ()]. Ao se definir, medir e analisar determinados parâmetros acústicos, pode-se compreender melhor as características sonoras percebidas em um ambiente. Portanto, é por meio da acústica que se pode avaliar ambientes que envolvam fala e música.

No contexto de salas de aula e locais destinados a palestras, como auditórios, as avaliações acústicas podem nos fazer entender melhor como e porque o ambiente reage aos sons de determinada forma. Com tal conhecimento, podemos ser capazes de determinar se uma sala é adequada para um tipo de evento, e se não, criar possíveis melhorias para solucionar os problemas encontrados.

1.2 História Recente

Historicamente, salas de aula não são ambientes com uma acústica ideal. Isso se dá, principalmente ao fato de que costumam ser formadas por paredes, chão e teto de concreto, que são materiais que refletem a maior parte da energia das ondas sonoras. Com tanta reflexão, qualquer som produzido na sala apresenta uma cauda, de forma que demora algum tempo entre o fim do som na fonte e o fim do som para o ouvinte. Tal fenômeno é chamado de reverberação. Além disso, podem ser criados ecos na sala, bem como ondas estacionárias, que criam regiões de picos e vales de ondas ao longo da sala. . Desta maneira, apresentam tempos de reverberação mais altos do que o ideal e resposta em frequência muito variável.

Por décadas, foi um tema de pouco estudo e pouca aplicação, principalmente em países menos desenvolvidos. Isso representa um grande problema, pois, como apontado por [Klatte et al. (2010)], uma acústica inadequada em sala de aula pode afetar a inteligibilidade da fala, capacidade de memorização e capacidade de leitura e concentração dos alunos, bem como levar a uma pior percepção de suas relações com seus professores. Isso é especialmente grave em crianças com deficiências auditivas [Crandell e Smaldino (2000)].

1.3 Parâmetros de Interesse

Existem diversos parâmetros acústicos que podem ser avaliados. Entretanto, é interessante se concentrar em um número reduzido, para que possa ser feita uma análise mais minuciosa destes. Do ponto de vista da inteligibilidade da fala, que é o principal objetivo a ser alcançado em salas de aula e auditórios, alguns parâmetros acústicos têm grande influência, são eles, o tempo de reverberação da sala (RT60) [Eaton et al. (2016, seção 1)], a resposta ao impulso da sala [Rabelo et al. (2014, pg. 362)], e a relação sinal-ruído (SNR). Dessa forma, esses são os principais parâmetros que serão discutidos neste trabalho.

1.4 Objetivos Deste Trabalho

Neste trabalho, serão realizadas medições acústicas, em parceria com a empresa de instalação de sistemas de áudio e vídeo, Wave Audiovisual, em uma sala de aula, uma sala de conferência e um auditório, localizados no campus de uma faculdade no bairro Funcionários em Belo Horizonte.

Serão utilizadas caixas acústicas, microfones e computadores para realizar gravações nas salas, que então serão processadas por códigos do Matlab baseados em trabalhos existentes, com o objetivo de determinar os parâmetros de interesse. Ao longo do trabalho, serão feitas modificações nos códigos, afim de adequar melhor as análises aos objetivos propostos e, possivelmente, deixá-los mais funcionais. Por fim, serão feitas comparações dos resultados com normas e padrões aceitos atualmente, serão discutidas possíveis relações entre as características físicas das salas e seus parâmetros, e melhorias que possam beneficiar os alunos presenciais e remotos.

1.5 Formato de Apresentação

Primeiro, serão apresentadas as definições e representações, de todos os conceitos necessários para se entender o trabalho, sequencialmente. Isso abrange tanto conceitos e operações matemáticas, quanto conceitos acústicos, psicoacústicos e trabalhos anteriores.

Em seguida será apresentada a metodologia utilizada para se executar o trabalho e obter seus resultados. Essa parte diz respeito aos equipamentos e softwares utilizados, programas escritos, conexões feitas e métodos de representação dos resultados.

Na sequência serão apresentados os resultados de fato, utilizando-se de gráficos e tabelas, e então, uma discussão dos mesmos será feita, avaliando diversos pontos e considerações no assunto. Soluções serão propostas para os problemas encontrados.

Por fim, será feita uma conclusão geral do estudo, seguida de seção de anexos, contendo códigos do Matlab utilizados.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Conceitos Importantes

2.1.1 Convolução

Convolução é uma operação matemática realizada entre funções, definida, respectivamente, no tempo contínuo e no tempo discreto pelas equações 2.1 e 2.2. [Weisstein ()]

$$f(t) * g(t) = \int_0^t f(\tau)g(t - \tau) d\tau \quad (2.1)$$

$$f[n] * g[n] = \sum_{k=0}^n f[k]g[n - k] \quad (2.2)$$

2.1.2 Domínio da Frequência

Normalmente, no mundo real, os sinais são tratados no domínio do tempo, porém, como a audição humana é seletiva em frequência, torna-se imperativo que tais sinais sejam analisados nesse domínio, e, além disso, muitas vezes facilita a realização de operações e cálculos. Nesse sentido, a transformada de Fourier é uma ferramenta importante, pois, transforma sinais do domínio do tempo, para o domínio da frequência, e vice-versa. As definições da transformada de Fourier de tempo contínuo e de tempo discreto, respectivamente, encontram-se nas equações 2.3 e 2.4. [Oppenheim (2010, itens 4.1 e 5.1)]

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.3)$$

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\omega n} \quad (2.4)$$

Ao realizar tais operações, chega-se a um sinal no domínio da frequência, que, normalmente, é representado por seu diagrama de Bode, que são gráficos de magnitude (amplitude) e de fase, em função da frequência, conforme a figura 1.

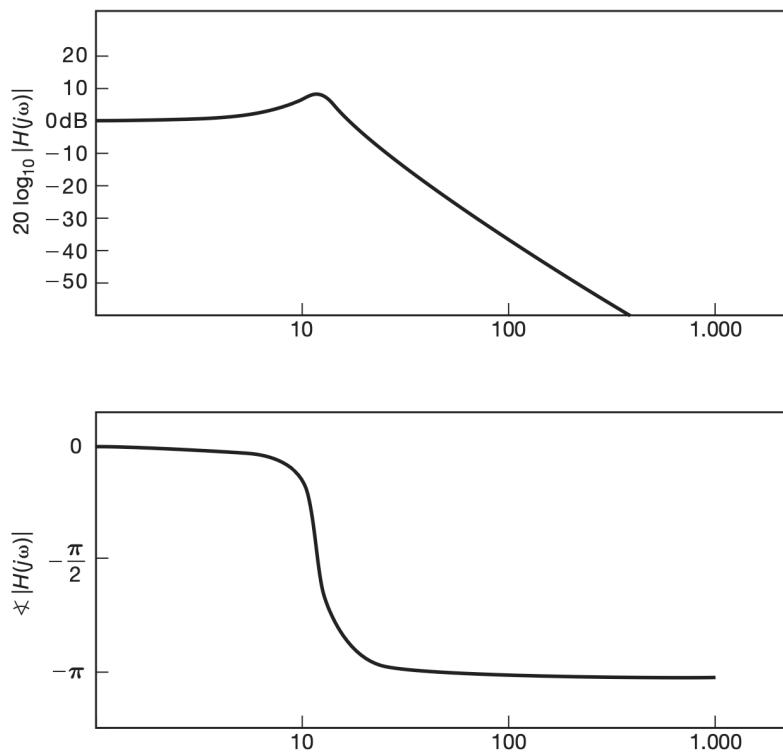


Figura 1 – Diagrama de magnitude e fase, em função da frequência, em escala logarítmica.
[Oppenheim (2010, seção 6.3)]

Para voltar os sinais, do domínio da frequência, para o domínio do tempo, utiliza-se a transformada inversa de Fourier, definida, respectivamente, para o tempo contínuo e tempo discreto, conforme as equações 2.5 e 2.6:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.5)$$

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (2.6)$$

2.1.3 Escala Logarítmica

Valores de amplitude sonora, normalmente são expressos na unidade de decibéis (normalmente dB SPL), que é uma escala logarítmica em relação à pressão sonora produzida pelo som, definida da seguinte forma:

$$dB = 20 \log \frac{p}{p_{ref}} \quad (2.7)$$

Onde p é a pressão sonora da onda em questão e p_{ref} é a pressão sonora de referência, que por padrão é $20 \mu Pa$. Esse valor de referência é usado pois, em geral,

é o valor do limiar da audição humana, em 1 kHz, ou seja, nessa escala, 0dB seria o som mais baixo possível de ser ouvido por um ser humano, nessa região de frequência [Ballou (2008, seção 2.2)]. Isso é feito pois, a sensação de intensidade sonora percebida pelos seres humanos, se aproxima mais de uma escala logarítmica. De forma que somos capazes de ouvir uma variação de amplitudes sonoras muito grandes, que em escala linear de SPL, representaria algo entre 10^{-5} e 10^2 Pa , conforme a figura 2, onde a linha de baixo representa o limiar da audição para cada frequência, e a de cima, o limiar da dor.

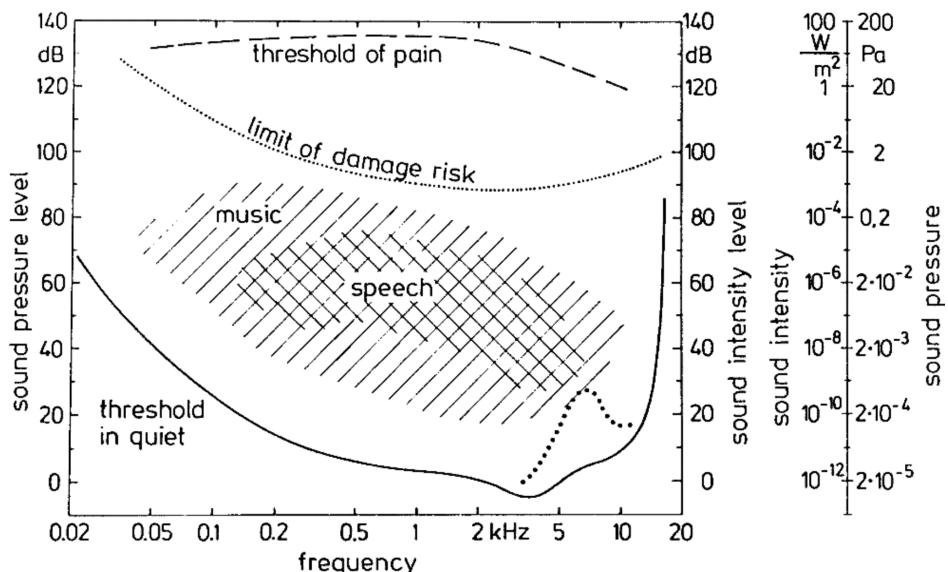


Figura 2 – Regiões da audição humana e limiares. [Fastl e Zwicker (2007, seção 2.1)]

No eixo de freqüências, nosso ouvido também tem um comportamento que mais se aproxima de uma escala logarítmica, e por isso, o eixo de freqüência frequentemente é representado nessa escala também. As freqüências sonoras são absorvidas ao longo do nosso ouvido interno, em regiões distintas, sendo que, as altas freqüências são absorvidas no início da membrana basilar, e as baixas freqüências no fim.

[Fastl e Zwicker (2007, cap. 6)] traz o conceito de bandas críticas, que representam de certa forma, a largura de banda que excita uma mesma região da membrana basilar. Dessa forma, freqüências que se encontram dentro de uma mesma banda crítica, influenciam na audição umas das outras, inclusive causando efeitos como o mascaramento. Os autores demonstram que, para a região de freqüências abaixo de 500 Hz, a largura da banda crítica é constante, de 100 Hz, já para as freqüências acima de 500 Hz, a banda crítica passa a ser cerca de 20% do valor da freqüência. Esse fato é especialmente importante, pois mostra que, o ouvido humano pode ser visto como um banco de filtros de largura de banda de passagem próxima a um terço de oitava. Por esse motivo, faremos análises dos ambientes, para freqüências separadas por intervalos de terços de oitava.

2.1.4 Regressão Linear

A regressão linear é uma estimativa que tenta modelar a relação entre duas variáveis, através de uma equação linear, que mais se aproxime da tendência dos dados. É uma técnica útil para que possamos avaliar a tendência geral da energia sonora gravada num ambiente. A figura 3 ilustra a equação de regressão linear (linha vermelha), feita a partir dos dados (pontos em azul).

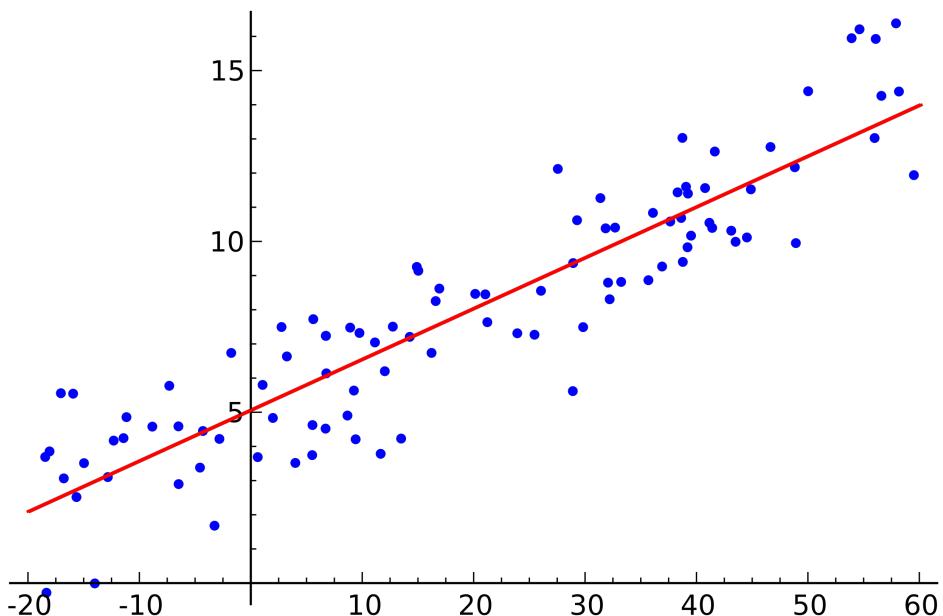


Figura 3 – Regressão linear feita a partir de um conjunto de medições.

2.1.5 Filtros

Filtros são sistemas seletores de frequência, ou seja, atenuam mais a amplitude de algumas frequências do que outras. São especialmente úteis para que se possa avaliar o comportamento de determinado sinal, apenas em uma região específica de frequência. Seus parâmetros mais importantes são a frequência de corte, que determina a partir de qual frequência o filtro rejeita os sinais, sendo, quantitativamente, a frequência em que o filtro atenua os sinais 3dB a mais do que na banda de passagem. Outro parâmetro é a inclinação dessa resposta em frequência, que determina o quão seletivo o filtro é em rejeitar as frequências próximas à frequência de corte. Normalmente é dada em dB por década [NILSSON e Riedel (2008, seção 14.1)]. A seguir, os principais tipos de filtros.

2.1.5.1 Tipos de Filtro

Os principais tipos de filtro são os quatro que tem sua função de transferência representada na figura 4.

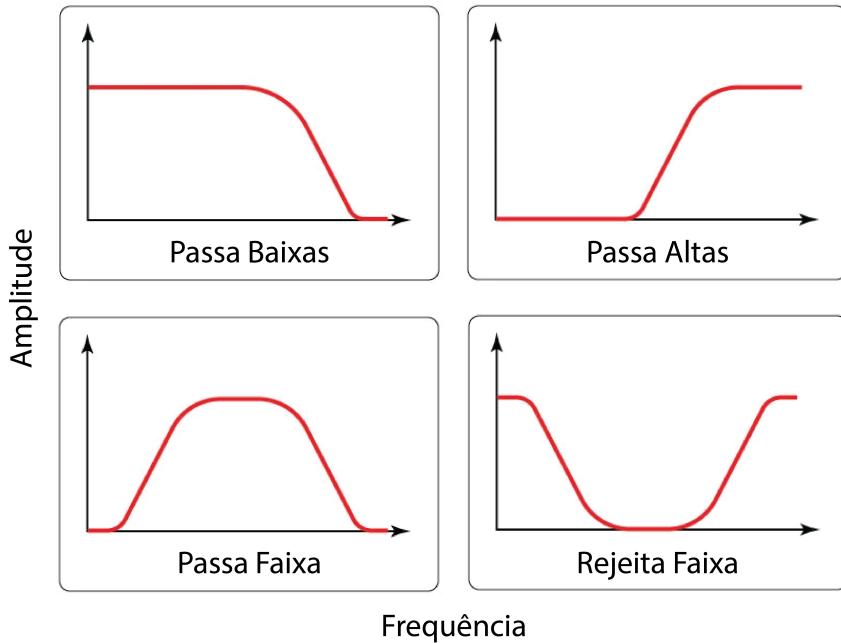


Figura 4 – Resposta em frequência qualitativa por tipo de filtro.

Filtros passa faixa serão especialmente importantes neste trabalho, pois, permitem selecionar a resposta de um ambiente, apenas em uma região de frequências. Estes também podem ser obtidos através da associação em série de um passa baixas e um passa altas.

2.1.5.2 Filtros de 1a Ordem

Filtros de 1^a ordem são filtro simples, formados por apenas um estágio de filtragem RC ou RL, no âmbito de circuitos elétricos, ou polinômios de primeira ordem, no âmbito do processamento digital. Em geral, possuem inclinação de -20 dB por década, caracterizando uma resposta não muito seletiva.

Em busca de uma filtragem mais seletiva, pode-se fazer uma cascata de filtros de 1a ordem. Isso aumenta a inclinação da banda de rejeição, porém também desloca a frequência de corte, o que não é desejável.

Para resolver esse problema, foram criados filtros de ordem superior, que apresentam maiores inclinações na sua resposta em frequência naturalmente. Um tipo de filtro de ordem superior notável, é o de Butterworth, que será discutido a seguir.

2.1.5.3 Filtros de Butterworth

Um filtro de Butterworth passa baixas de ganho unitário, tem a função de transmissão descrita pela equação 2.8. [NILSSON e Riedel (2008, seção 15.4)]

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}} \quad (2.8)$$

Onde $|H(j\omega)|$ é o módulo da função de transferência, ω_c é a frequência de corte em rad/s e n é a ordem do filtro.

Avaliando a equação 2.8, pode-se perceber que, quanto maior é a ordem n do filtro, mais rápida é a queda de $|H(j\omega)|$ em função da frequência ω , proporcionando um filtro mais seletivo em frequência. O aumento na inclinação da função de transferência do filtro de Butterworth, em relação à sua ordem n é demonstrado na figura 5

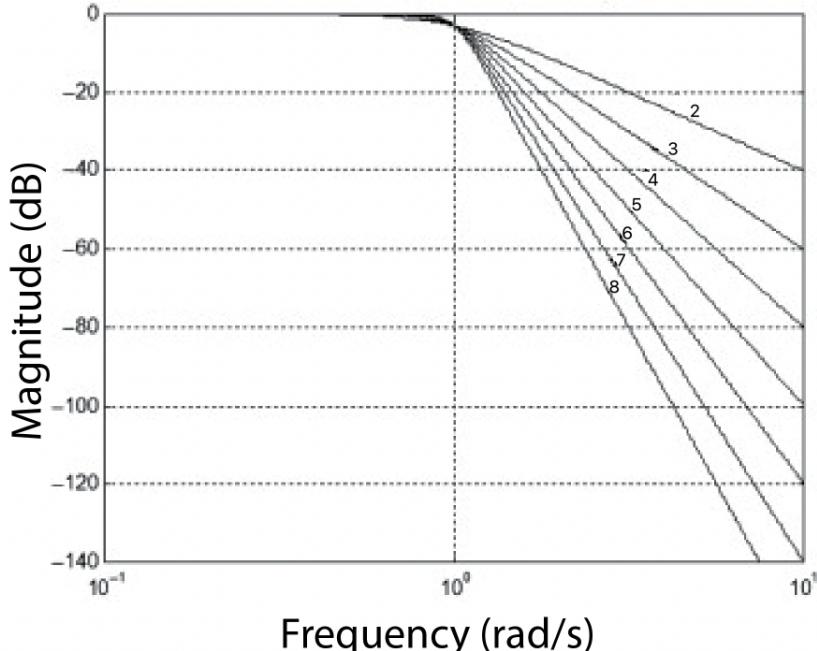


Figura 5 – Magnitude da função de transferência do filtro passa baixas de Butterworth para diferentes valores de ordem n . [Thompson (2014)]

2.1.6 Desvio Padrão

O desvio padrão é uma medida estatística que quantifica a dispersão de um conjunto de dados em relação à sua média. Em outras palavras, pode nos dizer se um determinado conjunto de medições teve grandes variações no resultado, nos indicando possivelmente mais assertividade nas medições e cálculos. Será utilizado posteriormente para avaliação dos tempos de reverberação medidos. Sua definição matemática é a da equação 2.9.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.9)$$

Onde σ é o valor do desvio padrão, dado na mesma unidade dos dados avaliados; x_i é o valor do i^{esimo} ponto no conjunto de dados; \bar{x} é o valor da média do conjunto; n é o número total de valores no conjunto.

2.2 Parâmetros Acústicos

2.2.1 Resposta ao Impulso

O impulso unitário (δ) é um sinal cuja área é igual a 1, tendo duração se aproximando de 0 e amplitude se aproximando do infinito.

No domínio discreto isso equivale ao sinal com a seguinte definição e representação:

$$\delta[n] = \begin{cases} 0, & n \neq 0 \\ 1, & n = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

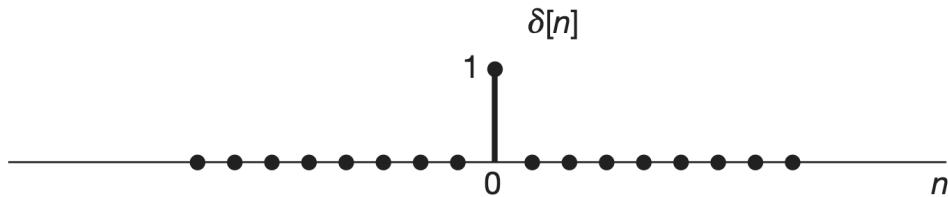


Figura 6 – Impulso unitário de tempo discreto. [Oppenheim (2010, seção 1.4)]

Já no domínio contínuo, isso equivale ao sinal com a seguinte definição e representação:

$$\delta(t) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \delta_\Delta(t) \quad (2.11)$$

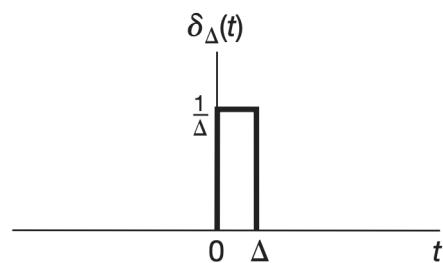


Figura 7 – Impulso unitário de tempo contínuo. [Oppenheim (2010, seção 1.4)]

A resposta ao impulso de um ambiente é uma de suas mais importantes caracterizações acústicas. Ela mostra o comportamento da sala em todo o espectro de frequências sonoras. Através dela, pode-se calcular diversos outros parâmetros, como o tempo de reverberação total ou específico para cada frequência do ambiente e também visualizar, por exemplo, a existência dos modos da sala. [Stan, Embrechts e Archambeau (2002)]

Os modos da sala são ondas que, normalmente, ficam presas em modo de onda estacionária, pois, como possuem comprimento de onda múltiplo de uma ou mais dimensões da sala, combinadas, são refletidas em fase com a onda incidente. Esse é um dos motivos pelos quais não são desejáveis paredes paralelas no ambiente, sendo que, uma estratégia muito usada para a diminuição desse paralelismo entre as superfícies é o posicionamento de objetos com superfícies geometricamente irregulares, chamados de difusores, que espalham a onda incidente em várias direções.

Os tipos de modos existentes são: modos axiais, no qual a reflexão das ondas ocorre entre 2 paredes; modos tangenciais, no qual a reflexão ocorre entre 4 paredes; modos oblíquos, em que a onda mantém uma trajetória de reflexão entre as 6 superfícies do ambiente. [Newell (2012, seção 4.2)]

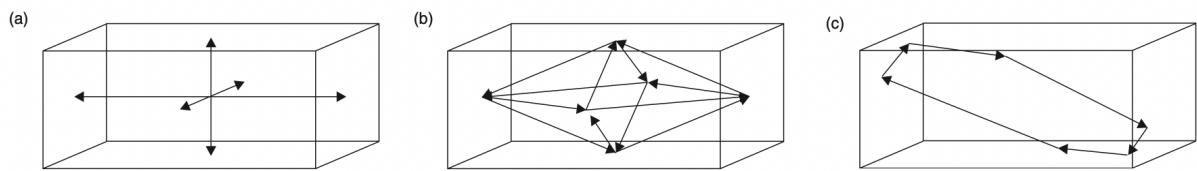


Figura 8 – Modos de uma sala. a) Modos axiais. b) Modos tangenciais. c) Modos oblíquos. [Newell (2012, seção 4.2)]

Esses modos de ressonância são altamente indesejados, pois, tornam a resposta em frequência do ambiente altamente variável, e dependente da posição do ouvinte, visto que as ondas estacionárias criam regiões de cristas e vales fixos. Tal fenômeno é demonstrado na figura 9, e sua consequência, para a resposta em frequência do ambiente é mostrada na figura 10.

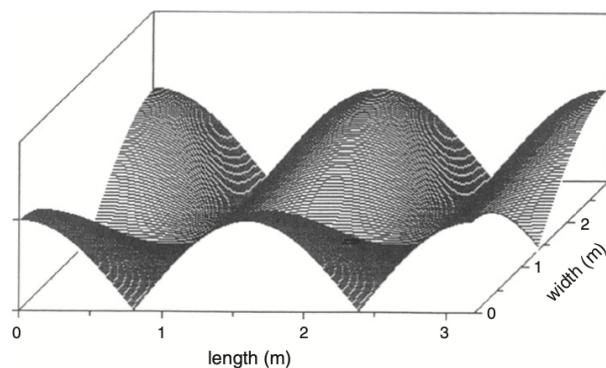


Figura 9 – Onda estacionária em uma sala. [Newell (2012, seção 4.3)]

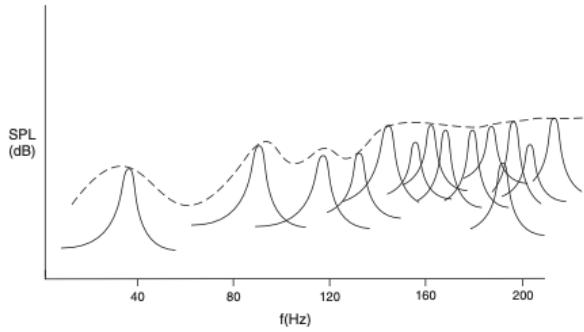


Figura 10 – Influência dos modos da sala, em sua resposta em frequência. [Newell (2012, seção 4.2)]

Para salas em forma de paralelepípedo retângulo, a frequência de cada modo da sala pode ser calculada, analiticamente, através da equação 2.12. [Newell (2012, seção 4.2)]

$$f = \left(\frac{c}{2}\right) \sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2} \quad (2.12)$$

Onde f é a frequência do modo; c é a velocidade do som no meio; L , W e H são as dimensões do ambiente; p , q e r são os números de onda, para cada dimensão.

Dessa forma, se a equação 2.12 for utilizada, com um dos números de onda igual a 1, e os outros iguais a 0, será encontrado um modo axial. De maneira análoga, se utilizando apenas dois números de onda iguais a 1, chega-se a um modo tangencial. Já utilizando todos os números de onda iguais a 1, tem-se um modo oblíquo. Utilizando números maiores do que 1, chega-se a múltiplos dos modos fundamentais, ou harmônicos, porém, também existem modos diferentes, que podem ser calculados se utilizando combinações desses modos fundamentais, como por exemplo $p=1$, $q=2$, $r=2$.

Uma forma simples de se calcular a resposta ao impulso, seria emitir um sinal que se aproximasse de um impulso unitário no ambiente, e então gravar a resposta. O problema dessa abordagem é que, pulsos muito curtos no tempo e de grande amplitude, são difíceis de se gerar com precisão, e apresentam um fator de crista muito grande, de maneira que, para se obter um resultado satisfatório, é necessário fazer a média de inúmeras medições [Suzuki et al. (1995)]. Dessa forma, outros métodos se fazem necessários para resolver este problema.

A partir de uma das equações mais importantes dos LTIS, que é a que define a relação entre entrada, saída e resposta ao impulso, no domínio do tempo, é possível encontrar novas soluções para o problema [Oppenheim (2010, seção 2.1)]:

$$y[n] = x[n] * h[n] \quad (2.13)$$

Onde: $x[n]$ é a entrada do sistema, ou sinal emitido no nosso caso, $y[n]$ é a saída do sistema, ou sinal gravado no nosso caso, $h[n]$ é a resposta ao impulso do sistema, todos no domínio do tempo discreto, visto que serão utilizados sinais digitalizados. Aqui, o símbolo $*$ denota a operação de convolução, que é definida na seção 2.1.1.

Dessa forma, uma maneira comum para se fazer os cálculos é aplicar um sinal $x[n]$ conhecido na sala, medir sua saída $y[n]$, e então usar alguma técnica para realizar a deconvolução dessa resposta e encontrar a resposta ao impulso no domínio do tempo discreto, $h[n]$. Nesse âmbito, existem alguns métodos populares hoje, que serão analisados na seção 2.3.

2.2.2 Reverberação

Reverberação é um fenômeno causado pelas reflexões das ondas sonoras nas superfícies do ambiente. Isso cria um efeito que faz com que, após determinado som ser interrompido, demore um tempo finito até que o nível de sinal no local volte ao nível do repouso, ou seja, após o som ser descontinuado, ele ainda pode ser ouvido por um intervalo de tempo, devido às reflexões dele que ainda existem no ambiente. O efeito físico e sobre o sinal são demonstrados nas figuras 11 e 12.

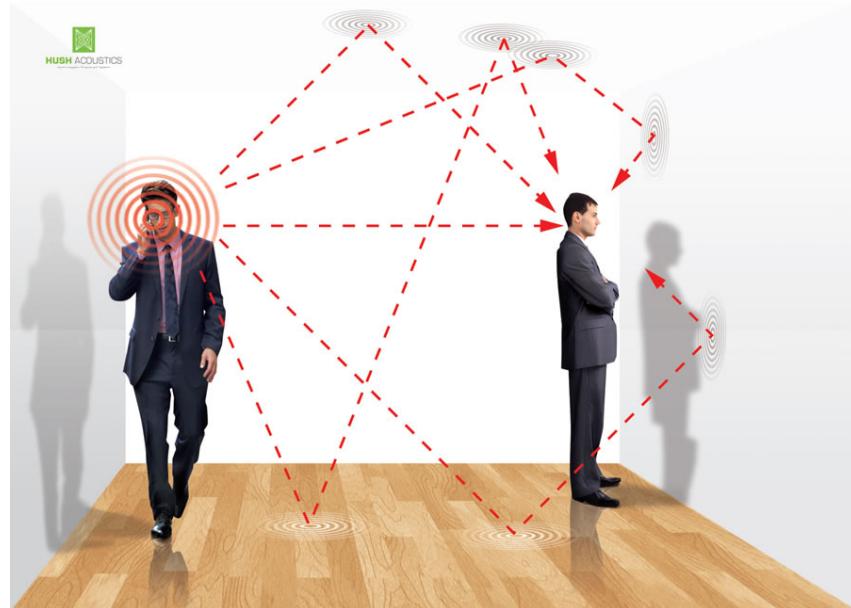


Figura 11 – Reflexões no ambiente que causam a reverberação. [Hush (2015)]

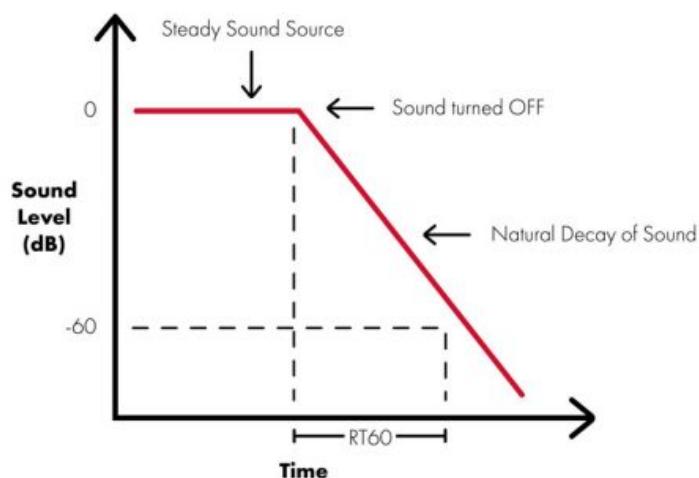


Figura 12 – Efeito de 'cauda' no sinal sonoro, criado pela reverberação. [Conwed (2019)]

O tempo de reverberação da sala (RT60) é definido como, o tempo que um som leva para cair 60 dB em relação à sua amplitude original, após ser descontinuado na fonte. [Everest e Pohlmann (2015, seção 11.4)]

O valor desejado para o tempo de reverberação de um ambiente varia amplamente, dependendo da finalidade do mesmo. Por exemplo, se uma orquestra toca em um ambiente com pouca ou quase nenhuma reverberação, o som pode parecer seco, sem ambientes, faltando algo. Já para aplicações onde a inteligibilidade da fala é importante, em geral, são desejáveis baixos tempos de reverberação. Isso acontece pois, com alto RT60, as sílabas e palavras pronunciadas levam muito tempo para não serem mais ouvidas, entrando em conflito com o que for pronunciado em seguida. Uma métrica mais objetiva que é influenciada pelo RT60 e foi demonstrada como importante para a inteligibilidade da fala é a quantidade de transferência de modulação do ambiente. Tal parâmetro será analisado na seção 2.2.4.

De acordo com normas Americanas, o valor máximo de RT60 recomendado é de 600 ms para salas com volume de até 283 m³ ou 700 ms para salas com volume de até 566 m³ [S12.60-2010 (2010, seção 5.2)].

Os fatores que influenciam no tempo de reverberação são, principalmente, o volume do ambiente e a quantidade de absorção de ondas sonoras que as superfícies do mesmo apresentam. Isso foi quantificado pelo físico Wallace Clement Sabine, conforme a equação 2.14. [Long (2014, seção 8.7.5)]

$$RT_{60} = 0,161 \frac{V}{A_{sabine}} \quad (2.14)$$

Onde V é o volume do ambiente em m³ e A_{sabine} é a área total de absorção do

mesmo, medida em unidade m^2 de sabine, e calculada pela multiplicação de todas as n áreas das superfícies do ambiente por seus respectivos coeficientes de absorção, conforme a equação 2.15.

$$A_{sabine} = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad (2.15)$$

Onde S é o valor de cada superfície e α é o valor do coeficiente de absorção, que depende do material utilizado.

Dessa maneira, para que se possa reduzir o tempo de reverberação do ambiente, é necessário aumentar a área dos materiais absorvedores, e/ou seu coeficiente de absorção. É importante notar que tal fórmula, apesar de vastamente utilizada, só proporciona bons resultados para baixos valores de α , apresentando erros da ordem de 6%, para valores de $\alpha = 0, 3$. [Newell (2012, seção 4.4.1)]

2.2.3 Ruído

No dia a dia, quase tudo ao nosso redor produz ondas sonoras. Isso faz com que sempre existam diversos sons no ambiente ao mesmo tempo, que, ao serem somados, possuem determinada amplitude. Isso caracteriza o nível de ruído no ambiente.

O nível de ruído é importante pois, para que sejamos capazes de ouvir um som que chega até os nossos ouvidos, ele precisa ter uma amplitude maior do que a do ruído do ambiente, senão não vamos perceber a existência dele, isso é chamado de efeito de mascaramento. [Fastl e Zwicker (2007, seção 4.1.1)] mostra que, para que um tom senoidal possa ser ouvido na presença de ruído branco, ele precisa ter entre 17 e 20 dB de amplitude a mais do que a amplitude do ruído, dependendo de sua frequência. Este efeito varia com a banda do ruído e sinal de interesse, e, para a inteligibilidade de sentenças, é esperado que seja necessária uma SNR até maior.

Normas Americanas recomendam um valor máximo de ruído de 35 dBA ou 55 dBC. [S12.60-2010 (2010, seção 5.2)]

Para entender as unidades dBA e dBC, é necessário conhecer as curvas de *equal loudness*, ou curvas de Fletcher-Munson. Essas curvas foram criadas para tentar compensar o fato de que a audição humana não tem a mesma sensibilidade para todas as regiões de frequência, de forma que, para que possamos ouvir algumas frequências, sua amplitude precisa ser bem maior do que para outras frequências.

As curvas de equal loudness traçam linhas que determinam qual amplitude de onda é necessária para que cada frequência tenha a mesma percepção de "volume". Cada linha é referente a determinado valor em "phons". A referência usada é a frequência de 1 kHz, ou seja, a curva de 10 phons representa a amplitude que cada frequência precisa ter para

que seja ouvida com a mesma intensidade que um tom de 1 kHz tem a 10 dB SPL. Mais recentemente, as curvas de Robinson-Dadson fizeram pequenos ajustes na curva original, conforme a figura 13.

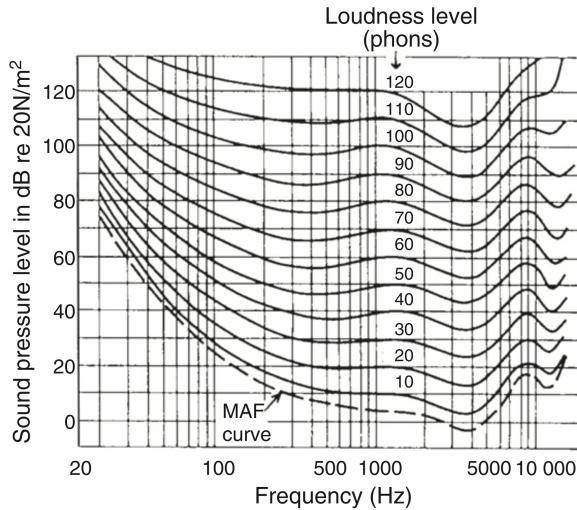


Figura 13 – Curvas de Equal Loudness de Robinson-Dadson. [Newell (2012, seção 2.1)]

Por definição, a escala de dBA (A-weighted) nada mais é do que a escala de dB SPL, ponderada por uma curva que aproxima a curva de 40 phons, ou seja, multiplicada no domínio da frequência, aproximadamente pelo inverso da curva de 40 phons. Isso faz com que tenhamos uma medida de intensidade de ruído constante, para todas as frequências, na região de 40 phons. Já a escala de dBC (C-weighted) segue a mesma ideia da de dBA, porém sendo ponderada pela curva de 80phons [Newell (2012, seção 2.3.1)]. Dessa maneira, a escala de dBA se mostra adequada para a avaliação de ruídos de média intensidade, e a escala de dBC, para ruídos de mais alta intensidade.

Na teoria, as ponderações em dBA e dBC são definidas através de tabelas [ANSI/ASA (2005, anexo H.2)], porém, podem ser aproximadas por filtros com funções de transferência $H_A(s)$ e $H_C(s)$ determinadas por alguns polos e zeros, no domínio de Laplace, conforme as equações a 2.16 e 2.17. [Partners (2008)]

$$H_A(s) \approx \frac{\kappa_A \cdot s^4}{(s + 129,4)^2 (s + 676,7) (s + 4636) (s + 76655)^2} \quad (2.16)$$

Onde $\kappa_A \approx 7,39705 \times 10^9$

$$H_C(s) \approx \frac{\kappa_C \cdot s^2}{(s + 129,4)^2 (s + 76655)^2} \quad (2.17)$$

Onde $\kappa_C \approx 5,91797 \times 10^9$

Tais funções de transferência se aproximam do inverso das curvas de 40 e 80 phons, respectivamente, em relação à frequência, porém, ignorando pequenas oscilações

que existem nas curvas originais, na região dos médios. As figuras 14 e 15 mostram a magnitude de cada uma das funções de transferência.

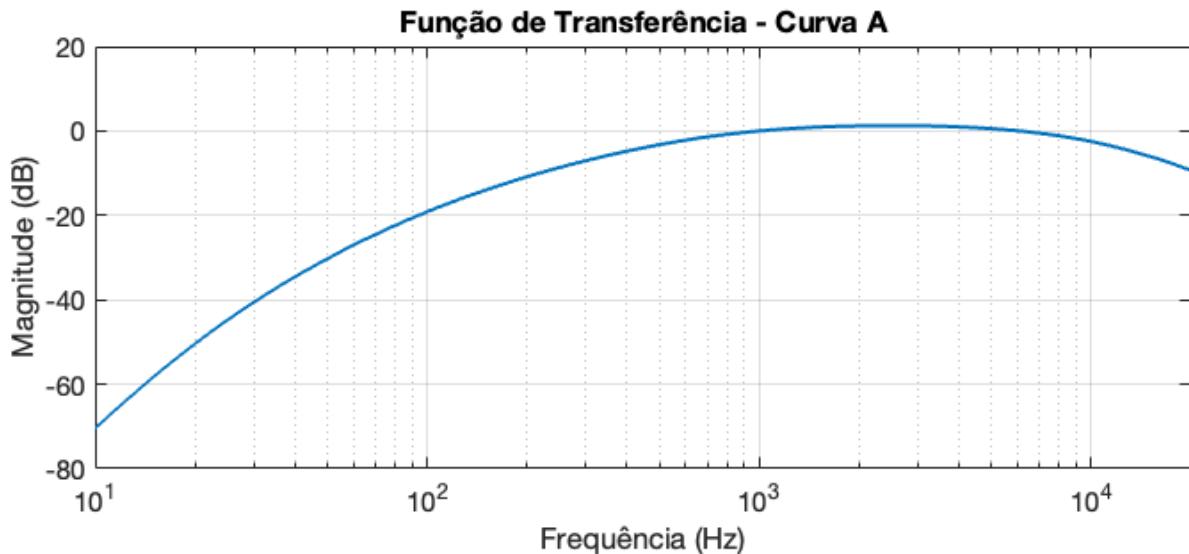


Figura 14 – Aproximação da curva de ponderação A, conforme a função de transferência 2.16

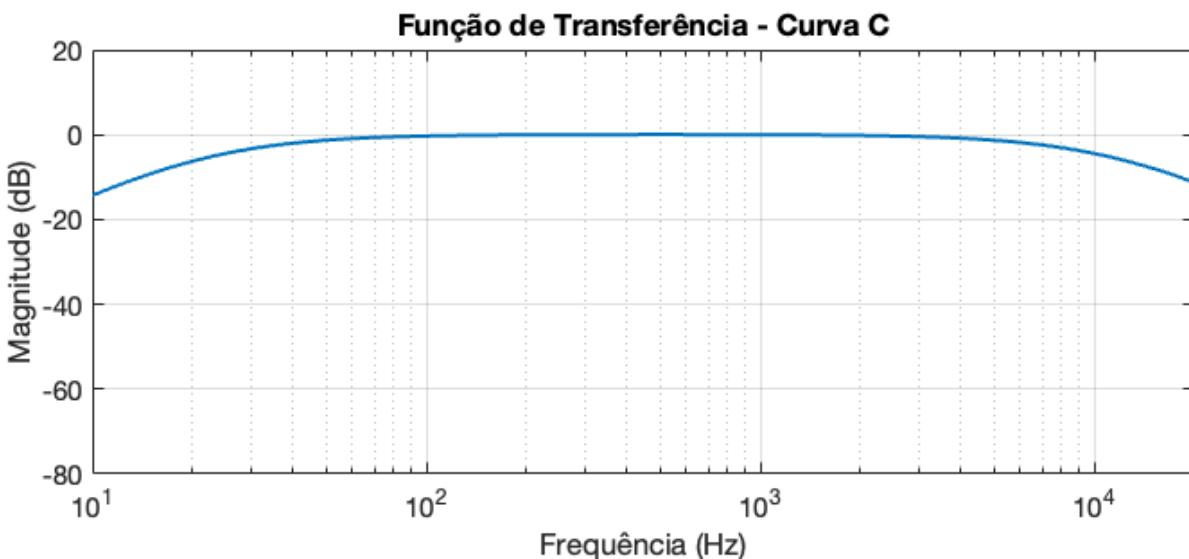


Figura 15 – Aproximação da curva de ponderação C, conforme a função de transferência 2.17

2.2.4 Transferência de Modulação

Um parâmetro menos conhecido, mas que demonstrou influência na inteligibilidade da fala em estudos passados, foi a função de transferência de modulação (MTF) [Houtgast e Steeneken (1973)]. Tal parâmetro mede a razão entre a amplitude de uma

modulação emitida por uma fonte no ambiente, e a amplitude dessa modulação que é recebida em outro ponto do local. Nesse sentido, tanto as modulações de amplitude, quanto de frequência são importantes.

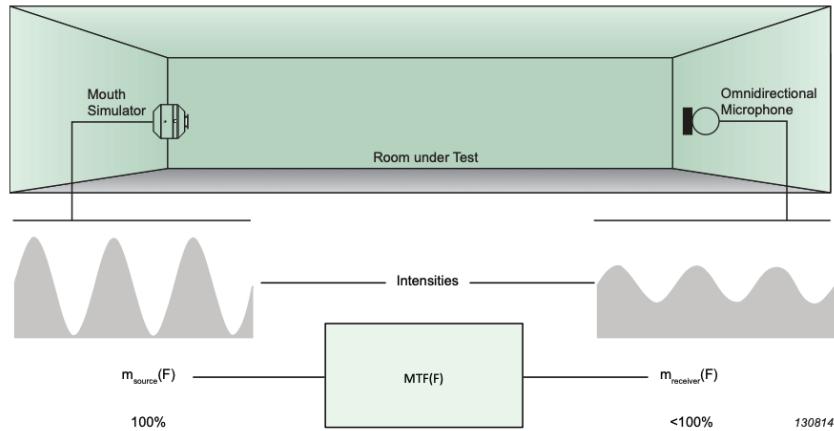


Figura 16 – Demonstração da Transferência de Modulação. [Brüel (2013)]

[Elliott e Theunissen (2009)] demonstrou que ter uma boa transferência de modulações de amplitude menores que 12Hz e de frequência menores que 4 ciclos/kHz, é essencial para a inteligibilidade das palavras do inglês. É importante notar que tanto o ruído no ambiente quanto a reverberação contribuem para diminuir a MTF, caracterizando uma menor inteligibilidade da fala.

A dependência da inteligibilidade da fala, da quantidade de transferência de modulação, sugere que, pode não ser eficiente se utilizar técnicas que aumentam o loudness do sinal, sem aumentar a SNR de pico, como a compressão, visto que tais abordagens diminuem o dynamic range dos sinais, diminuindo assim a transferência de modulação.

2.3 Métodos de Medição da Resposta ao Impulso

Diversos métodos para a medição da resposta ao impulso de uma ambiente foram construídos nas ultimas décadas. Vale lembrar que, a partir da resposta ao impulso, podemos calcular facilmente o tempo de reverberação. A seguir são descritos alguns métodos que ganharam notoriedade e foram opções para este trabalho.

2.3.1 Maximum Length Sequence (MLS)

A técnica MLS foi proposta em 1979 por Schroeder, e consiste na emissão de um sinal periódico, pseudo aleatório, com características semelhantes às do ruído branco. É gerado um sinal de ordem m , contendo número de amostras $L = 2^m - 1$. A resposta ao impulso periódica do ambiente é então obtida, através da correlação cruzada circular,

entre a saída medida e a entrada emitida. Então, a resposta ao impulso linear é obtida pela equação:

$$h'[n] = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h[n + iL] \quad (2.18)$$

Tal método apresenta um problema de *aliasing*, de forma que, para que isso não ocorra, o número em um período, L, deve ser aumentado, para que se torne maior do que a resposta ao impulso do sistema. Além disso, o principal inconveniente desse método são os chamados "picos de distorção", que acabam sendo distribuídos na resposta ao impulso obtida, devido à não linearidades inerentes aos sistemas de medição envolvidos. [Stan, Embrechts e Archambeau (2002, seção 2.1)]

2.3.2 Inverse Repeated Sequence (IRS)

O método IRS foi desenvolvido a partir do MLS, com o intuito de amenizar o efeito indesejável dos picos de distorção. O sinal com período de 2L amostras ($x[n]$) é definido através do sinal MLS com período de L amostras ($mls[n]$), conforme a equação:

$$x[n] = \begin{cases} mls[n], & \text{para } n \text{ par, } 0 \leq n \leq 2L \\ -mls[n], & \text{para } n \text{ ímpar, } 0 \leq n \leq 2L \end{cases} \quad (2.19)$$

O processo de deconvolução é o mesmo do utilizado no MLS, porém, com esta nova entrada, os picos de distorção são atenuados com sucesso. [Stan, Embrechts e Archambeau (2002, seção 2.2)]

2.3.3 Time-Stretched Pulse (TSP)

A técnica do TSP consiste na utilização de um sinal com características semelhantes às de um impulso, porém esticado, com o objetivo de aumentar a potência emitida para uma mesma magnitude de sinal, aumentando assim o SNR, sem precisar aumentar as não linearidades causadas ao se aumentar muito amplitude. [Stan, Embrechts e Archambeau (2002, seção 2.3)]

A ideia do sinal TSP, é gerar um sinal que tenha as seguintes características, no domínio da frequência: Magnitude constante e igual a 1, para todo o espectro de interesse (normalmente, entre 0 Hz e $F_s/2$ Hz), e atraso de fase quadrático em relação à frequência. Tal sinal é um sweep senoidal no tempo, porém com a característica de magnitude constante desejada, presente.

[Suzuki et al. (1995)] propõe o TSP gerado, através da seguinte resposta em frequência X(k):

$$X(k) = \begin{cases} e^{j4m\pi k^2/N^2}, & 0 \leq k \leq N/2 \\ X(N-k), & N/2 \leq k \leq N \end{cases} \quad (2.20)$$

Onde m é um inteiro que determina o esticamento do pulso, e $N = 2^i$ (i é um inteiro) é o número de amostras. Dessa forma, o problema de estimativa da resposta ao impulso, perto dos extremos de frequência igual a 0 e igual a $F_s/2$, presente no estudo original de [Aoshima (1981)], é eliminado.

Neste método, o sinal gerado $x[n]$ é emitido no ambiente, e a saída $y[n]$ é medida. Para se chegar à resposta ao impulso $h[n]$ da sala, é necessário realizar algumas manipulações matemáticas, que dependem do entendimento dos seguintes conceitos:

1. Apesar do sinal $X(e^{j\omega})$ ter amplitude unitária apenas entre 0 Hz e $F_s/2$ Hz, e nula a partir disso, podemos considerar, que ele tem amplitude unitária em todo o espectro, assim como o impulso unitário, visto que ele exibe tal característica em todo o espectro de frequências em que estamos interessados.
2. Como $X(e^{j\omega})$ é um sinal de magnitude constante, igual a 1, em todo o espectro, podemos dizer que, o inverso dele $\frac{1}{X(e^{j\omega})}$, seja uma versão de si mesmo, com fase invertida, $X(e^{-j\omega})$, conforme:

$$\frac{1}{X(e^{j\omega})} = X(e^{-j\omega}) \quad (2.21)$$

3. A transformada inversa de Fourier, de um sinal de amplitude constante e igual a 1, com a fase invertida, como $X(e^{-j\omega})$, é o sinal refletido no tempo, $x[-n]$, conforme:

$$\mathcal{F}^{-1}(X(e^{-j\omega})) = x[-n] \quad (2.22)$$

Para se chegar à resposta ao impulso, utilizando o método do TSP, parte-se da equação básica que descreve um LTIS, no domínio do tempo, a seguir:

$$y[n] = x[n] * h[n] \quad (2.23)$$

Pela propriedade da convolução, da transformada de Fourier de tempo discreto, tem-se que, a resposta em frequência de tal sistema, $H(e^{j\omega})$, pode ser calculada através da seguinte equação:

$$Y(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega})H(e^{j\omega}) \quad (2.24)$$

Reorganizando os termos:

$$H(e^{j\omega}) = Y(e^{j\omega}) \frac{1}{X(e^{j\omega})} \quad (2.25)$$

Combinando a equação 2.25 com 2.21, chega-se a:

$$H(e^{j\omega}) = Y(e^{j\omega})X(e^{-j\omega}) \quad (2.26)$$

Tal equação, já seria suficiente para calcular a resposta ao impulso do ambiente, porém, como o cálculo será feito por computador, fazer a convolução dos sinais não é um problema, e, como os sinais gravados estão no domínio do tempo discreto, pode-se usar a equação 2.26, após fazer sua transformada inversa, conforme 2.22, resultando em:

$$h[n] = y[n] * x[-n] \quad (2.27)$$

Portanto, para calcular a resposta ao impulso, $h[n]$, basta convoluir a resposta medida $y[n]$, com o sinal original, refletido no tempo, $x[-n]$.

2.4 Tratamento Acústico

Tratar um ambiente acusticamente, consiste em se utilizar de materiais e geometrias, tanto na construção estrutural, quanto na arquitetura interna, visando um tipo de resultado na resposta acústica do ambiente. Nesse âmbito, serão tratados conceitos e materiais utilizados, na parte interna do ambiente, e não na estrutura, visto que são os que podem ser mais facilmente modificados.

2.4.1 Coeficiente de Absorção

Um conceito importante, já citado anteriormente, é o de coeficiente de absorção (α). Por definição, ele denota o quanto da energia de uma onda, o material absorve, impedindo que seja refletido de volta. Varia de 0 a 1, sendo 0, nenhuma absorção e 1, absorção total [Newell (2012, seção 4.5)]. Pode ser descrito, matematicamente, conforme a equação 2.28:

$$\alpha = \frac{E_{dissipada} + E_{transmitida}}{E_{incidente}} = 1 - \frac{E_{refletida}}{E_{incidente}} \quad (2.28)$$

É um parâmetro muito importante ao se falar em tratamento acústico de um ambiente. É importante notar que seu valor depende da frequência da onda incidente, da espessura, e do material absorvedor utilizado. O gráfico a seguir ilustra valores de coeficiente de absorção para 3 materiais diferentes com espessuras diferentes, em função da frequência.

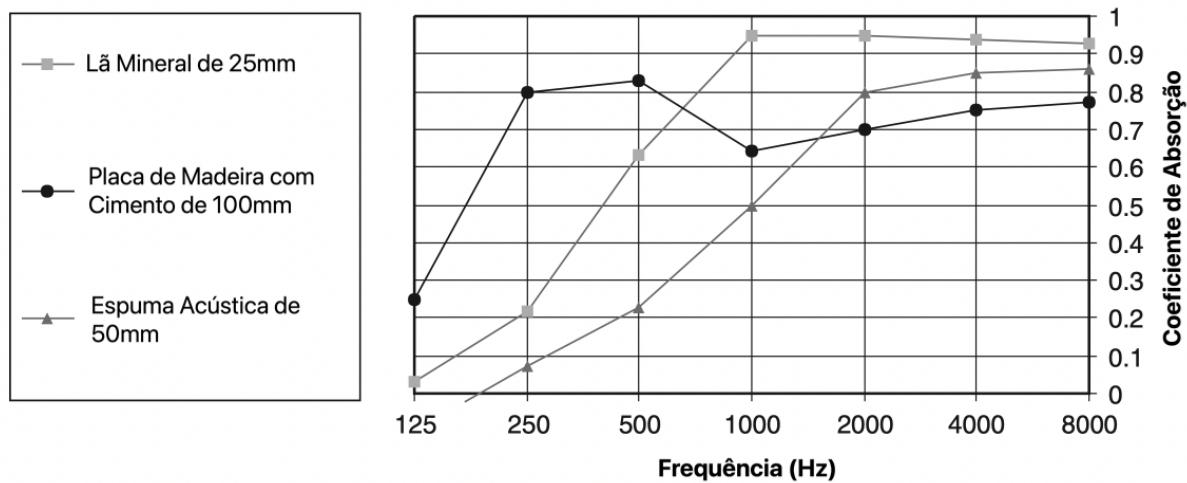


Figura 17 – Coeficiente de Absorção em Função da Frequência para Diferentes Materiais. [Newell (2012, seção 4.5.4)]

É possível notar que o material utilizado tem grande influência no coeficiente, visto que a lã mineral apresenta-se como o melhor absorvedor para médias e altas freqüências, mesmo tendo a menor espessura.

Em geral, para que haja uma boa absorção, a espessura do material precisa ser da mesma ordem do comprimento de onda de interesse. Dessa forma, para que se absorva baixas freqüências, são necessários absorvedores mais espessos, conforme a tabela, feita utilizando absorvedores de lã mineral, com densidade de 30kg/m^3 .

Espessura / Frequência	125 Hz	500 Hz	2000 Hz	4000 Hz
1,25 cm	0,02	0,12	0,66	0,62
2,50 cm	0,07	0,42	0,73	0,70
5,00 cm	0,19	0,79	0,82	0,72
10,00 cm	0,38	0,96	0,91	0,87

Tabela 1 – Tabela de valores de coeficiente de absorção α , em função da frequência, para diversos valores de espessura. [Newell (2012, seção 4.5)]

O autor mostra também que, a densidade do material também tem certa influência sobre seu coeficiente de absorção, sendo que o principal efeito do aumento da densidade, é o aumento da absorção do material em baixas freqüências. Isso faz com que se possa usar materiais de menor espessura, mantendo certa absorção nos graves. A tabela a seguir mostra os resultados obtidos para a absorção, se utilizando lã mineral de 2,5 cm de espessura, para diferentes valores de densidade.

Densidade / Frequência	125 Hz	500 Hz	2000 Hz	4000 Hz
30 kg/m ³	0,07	0,42	0,73	0,70
60 kg/m ³	0,09	0,60	0,75	0,74
120 kg/m ³	0,10	0,70	0,77	0,76

Tabela 2 – Tabela de valores de coeficiente de absorção α , em função da frequência, para diversos valores de densidade. [Newell (2012, seção 4.5)]

2.5 Síntese

Os conceitos apresentados neste capítulo serão essenciais para o entendimento da metodologia do trabalho. As escalas de dBA e dBC serão utilizadas para avaliar a intensidade real do ruído. O TSP será utilizado para excitar acusticamente os ambientes, a convolução para computar a resposta ao impulso do ambiente, a transformada de Fourier para computar a resposta em frequência, e os diagramas de bode e a escala logarítmica para gerar os gráficos correspondentes. A regressão linear será utilizada para estimar o ritmo de decaimento da resposta ao impulso e, consequentemente calcular o RT60, os filtros de butterworth para computar a resposta em cada região de frequência, e o desvio padrão para avaliar a confiabilidade dos resultados de RT60. Será utilizada a equação dos modos ressonantes da sala, para prever os modos de cada ambiente, e por fim, serão utilizados os gráficos apresentados na seção de coeficiente de absorção, com a equação de Sabine, para recomendar a colocação de absorvedores acústicos no ambiente, bem como calcular a área necessária.

3 Metodologia

Foi utilizado um sinal gerado por computador para excitar a sala acusticamente através de um alto falante. Ao mesmo tempo, foi gravado o que se recebe desse sinal em outro ponto da sala, através de um microfone ligado ao computador. Esse procedimento foi repetido 3 vezes para se formar uma base estatística, em cada ambiente. Por fim, as gravações foram processadas no Matlab, sendo que, apenas alguns segundos de sinal gravado já são suficientes para se determinar os parâmetros de interesse.

Para realizar a geração e armazenamento dos sinais, foi utilizado o software de edição de áudio Ableton Live 11, em um computador Macbook Air, conectado via USB, a uma interface de áudio Behringer UMC202, que possui entradas e saídas analógicas XLR/TRS, para serem conectadas ao alto falante e ao microfone. Os equipamentos foram conectados conforme o diagrama:

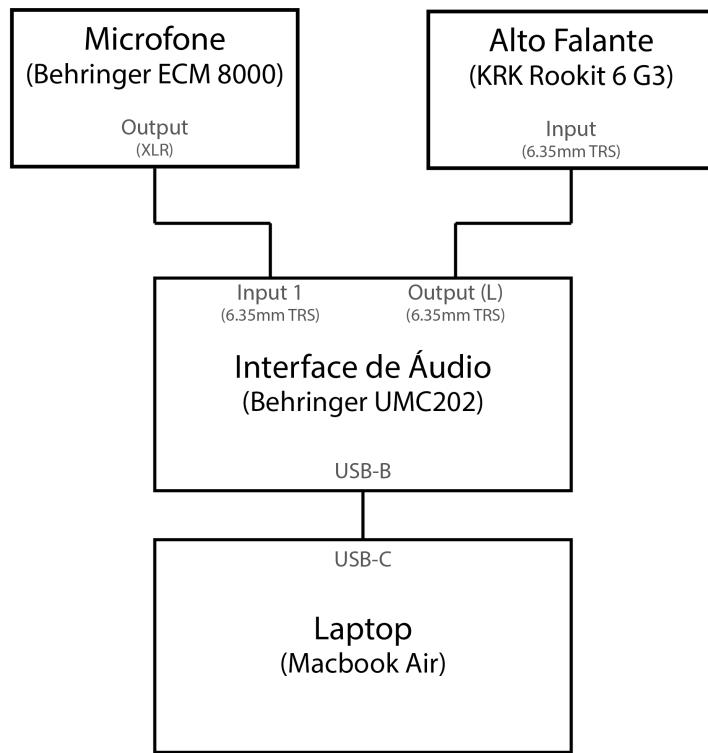


Figura 18 – Diagrama de conexão dos equipamentos utilizados no estudo.

3.1 Ambientes Avaliados

Em parceria com a empresa de instalação de sistemas de áudio e vídeo automatizados, Wave Audiovisual, foram realizadas medições em 3 ambientes diferentes de uma faculdade de negócios, localizada no bairro Funcionários em Belo Horizonte. Foram eles,

uma sala de aula, uma sala de conferência e um auditório. Dessa forma, será possível avaliar, não só a adequação de suas respostas acústicas individuais ao seu propósito, mas também comparar suas respostas e as diferenças em seus valores ideais de parâmetros acústicos.

Como base para a avaliação de suas respostas em frequência, foi utilizado o código do Matlab, descrito no anexo [A.4](#), para calcular a frequência dos modos ressonantes, esperados para cada sala, baseado em suas dimensões. Foram calculados modos utilizando-se apenas até o número de onda igual a 2, a partir da equação [2.12](#), porém não se deve esquecer que outros modos existem, inclusive múltiplos (harmônicos) dos calculados.

3.1.1 Ambiente 1: Sala de Aula

A sala em questão tem dimensões de 14,3 m por 5,7 m, e pé direito de 2,9 m, sendo formada por 4 paredes paralelas, das quais, uma é inteiramente formada por janelas, duas são de cimento e uma de gesso, além de piso de madeira e teto de cimento. Os únicos objetos absorvedores de ondas sonoras presentes são os estofados das cadeiras e as pessoas no seu interior, sendo que, as medições foram feitas sem a presença de outras pessoas na sala, e durante o horário comercial, ou seja, com nível de ruído compatível com o do dia a dia. A seguir a ilustração da sala com dimensões, bem como foto da sala.

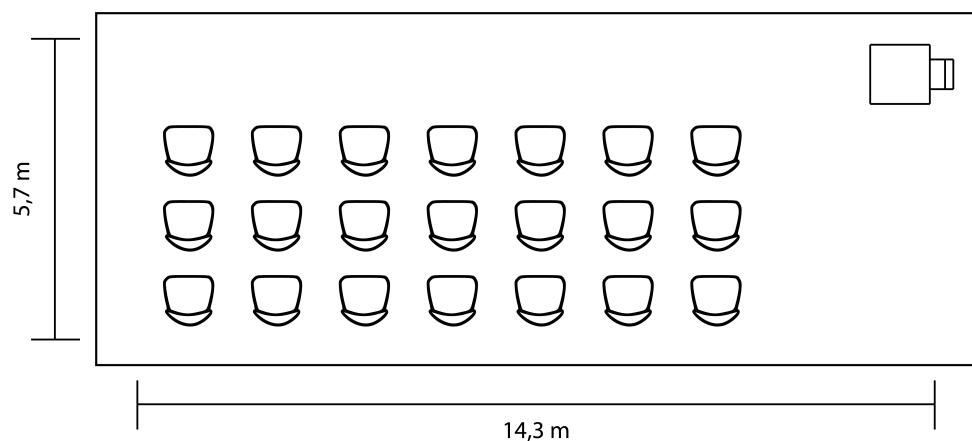


Figura 19 – Ilustração da Sala de Aula.

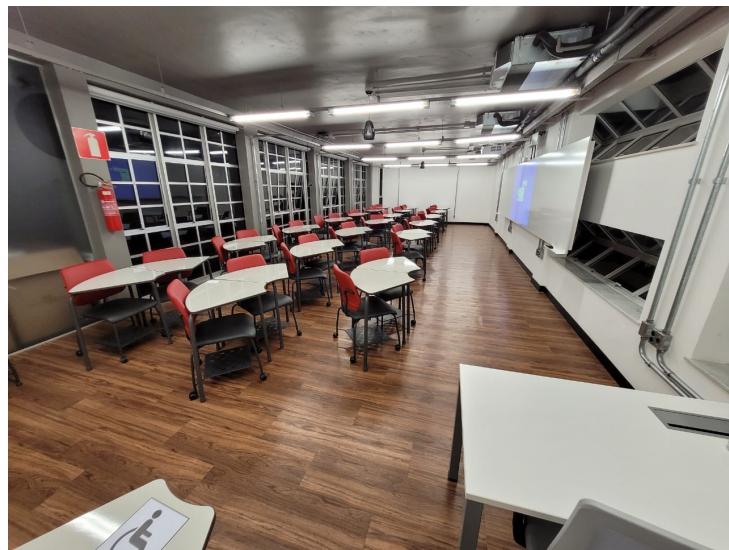


Figura 20 – Foto da Sala de Aula.

3.1.2 Ambiente 2: Sala de Conferência

Foi uma sala de reuniões e video conferências, com dimensões de 11,4 m por 5,4 m e pé direito de 2,9 m, que tinha uma parede feita apenas por janelas, duas de cimento e uma de gesso, bem como piso de madeira, coberto com carpete e teto de cimento. A seguir imagens da sala.

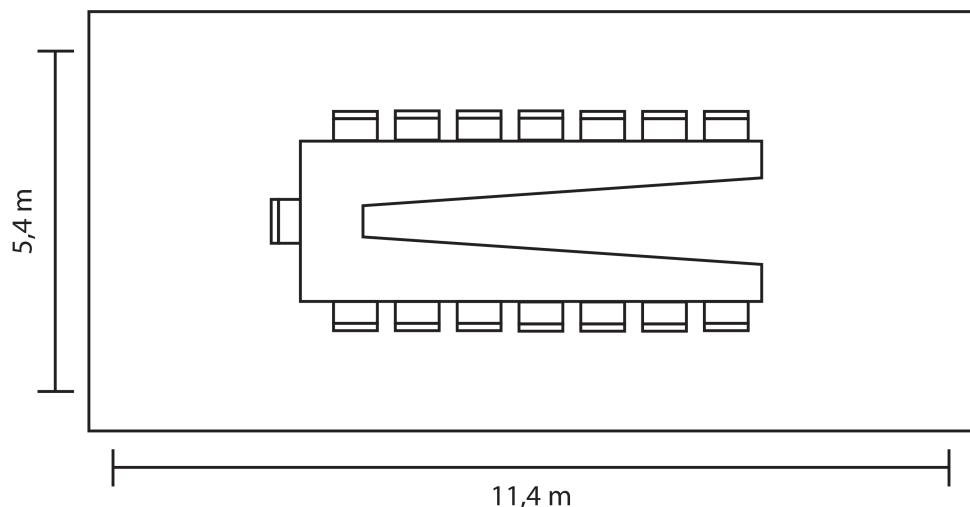


Figura 21 – Ilustração da Sala de Conferência.



Figura 22 – Foto da Sala de Conferência.

3.1.3 Ambiente 3: Auditório

O auditório em questão tem dimensões de 23,15 m por 5,5 m, e é feito todo de concreto, com piso coberto por carpete. Esse ambiente tem uma peculiaridade importante, que é o fato de um de seus lados ser curvo, não existindo separação entre parede e teto. Isso pode ser melhor entendido na figura 24.

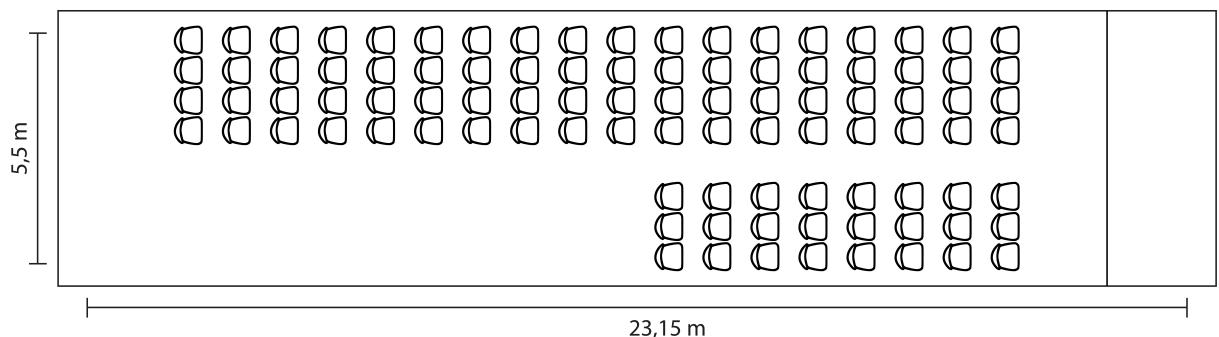


Figura 23 – Ilustração do Auditório.



Figura 24 – Foto do Auditório.

Não foi criada tabela de modos ressonantes esperados para este ambiente, devido ao seu teto curvo, que na prática faria com que não existissem modos quantizados, e sim uma faixa contínua de modos que funcionariam ali.

3.2 Emissão do Sinal de Excitação

3.2.1 Alto Falante

Foi utilizada uma caixa monitor, KRK Rokit 6 G3, com o objetivo de se ter uma interferência mínima sobre o sinal, visto que tais caixas acústicas visam uma resposta em frequência mais plana, sendo utilizadas na produção musical. A caixa foi conectada a uma entrada analógica da interface de áudio Behringer, via cabo com conectores 6.35 mm TRS (P10). A caixa utilizada foi a seguinte:



Figura 25 – Caixa acústica utilizada no estudo.

O fabricante não divulga a resposta em frequência oficial do produto, o que é comum para produtos comerciais, porém, existem medições feitas por alguns compradores que indicam uma resposta bem próxima do desejável, conforme a figura:

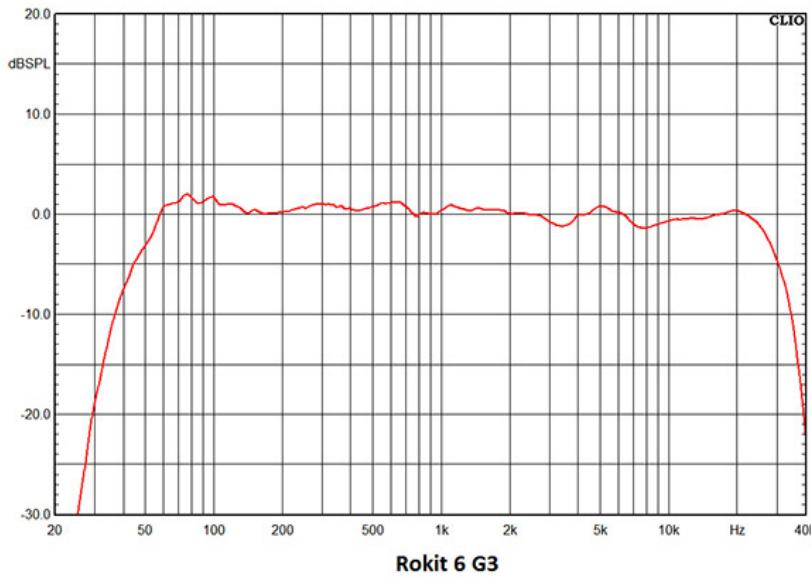


Figura 26 – Resposta em frequência da caixa utilizada.

Foram feitos ajustes no ganho da caixa, para se atingir um valor de pico máximo, antes de haver distorção, afim de se maximizar a SNR.

3.2.2 Sinal

O método escolhido para realizar as medições deste trabalho foi o *Time Stretched Pulse* (TSP) otimizado. Isso se deve ao fato de que é utilizado um sinal com espectro relativamente simples, com o qual pode-se obter a resposta do ambiente de maneira confiável, inclusive para valores de frequência próximos aos extremos 0 e $F_S/2$ [Suzuki et al. (1995)], além de atenuar consideravelmente o problema de picos de distorção, presente nos outros métodos analisados.

Primeiro foram definidos os seguintes parâmetros para o sinal TSP: Duração do sinal ($T = 4800$ ms); Frequência de amostragem ($F_S = 44,1\text{ kHz}$); Largura de banda do sinal ($\text{bw} = 22,05\text{ kHz}$); Deslocamento de banda ($\text{bs} = 0\text{ kHz}$); Tempo de início do sinal ($\text{ta} = 240\text{ ms}$); Taxa de crescimento do atraso de grupo ($\text{tb} = 200\text{ ms/kHz}$). Dessa forma, obteve-se um sinal de *sweep* senoidal, começando em 0 Hz, chegando ate 22,05 kHz.

Tudo foi feito no código do matlab gen_tsp.m, no qual, com os parâmetros definidos, o sinal é criado, salvo em um arquivo de áudio .WAV e os gráficos de representação do sinal são gerados, no domínio da frequência e no domínio do tempo, além de seu espec-

rograma. O código utilizado foi descrito no anexo A.1. As representações do sinal obtidas se encontram nas figuras 27 e 28.

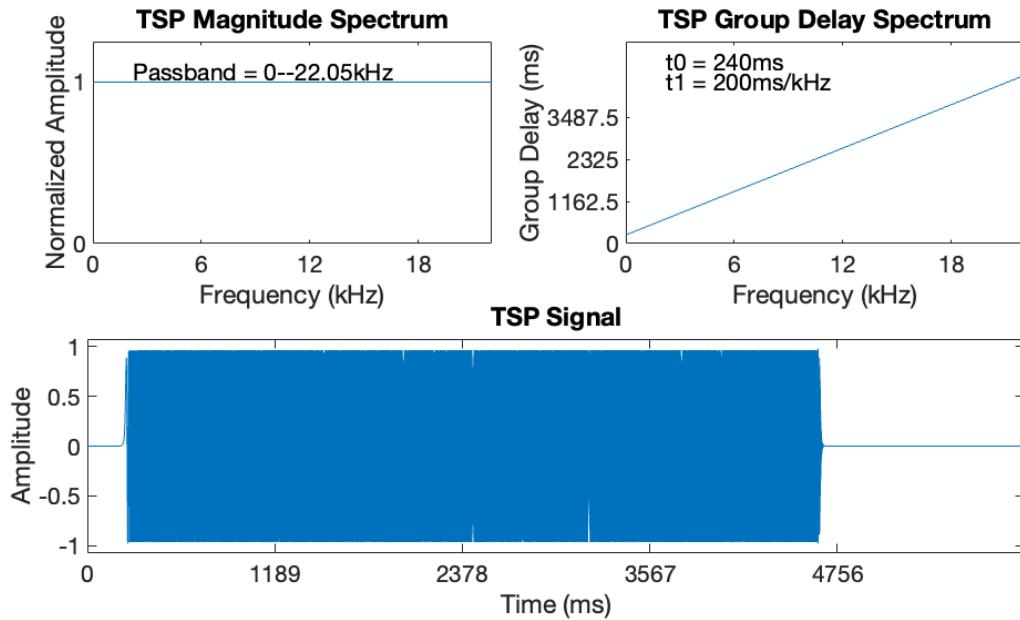


Figura 27 – Representação do TSP gerado no tempo e conteúdo em frequência.

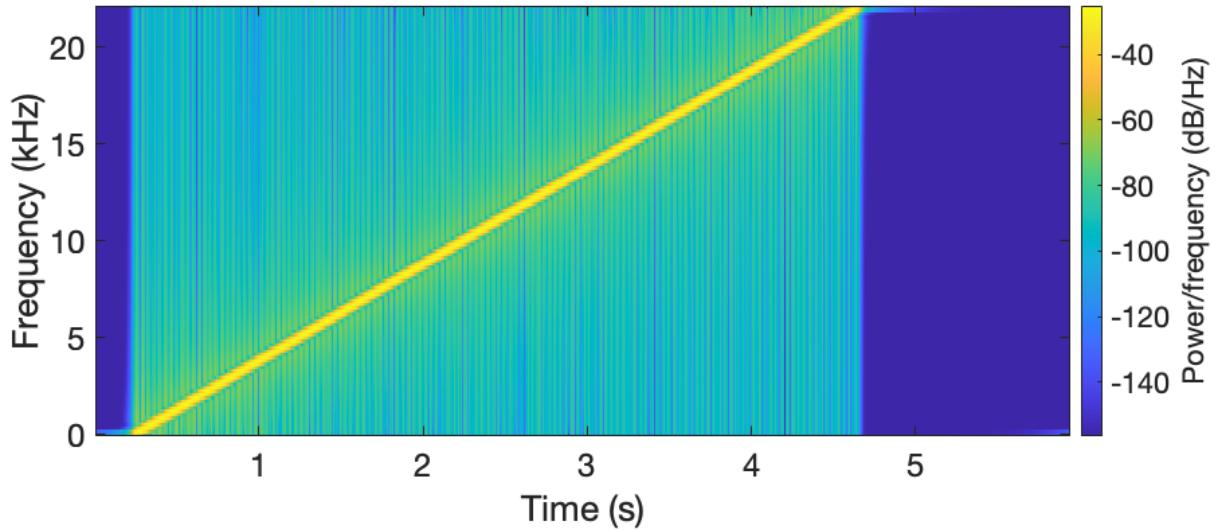


Figura 28 – Representação do espectrograma do TSP gerado.

Pelos gráficos, pode-se perceber que o sinal tem magnitude constante em todo o espectro de frequência e, durante todo o tempo, conforme desejado. Pelo espectrograma, pode-se perceber que, o sinal é um tipo de *sweep* senoidal, que começa na baixas frequências e aumenta a frequência continuamente, de maneira uniforme ao longo do tempo, realizando uma varredura, até 22 kHz.

3.3 Captação da Resposta do Ambiente

3.3.1 Microfone

Para fazer as gravações do som dos ambientes foi utilizado o microfone ECM 8000 da Behringer. Ele possui padrão de captação omnidirecional, o que é desejável para o estudo, visto que deseja-se receber as reflexões de todos os lados da sala. Além disso, por ser um microfone de calibragem, possui resposta suficientemente linear. Suas características podem ser visualizadas nas figuras 29, 30 e 31.



Figura 29 – Microfone utilizado nas medições.

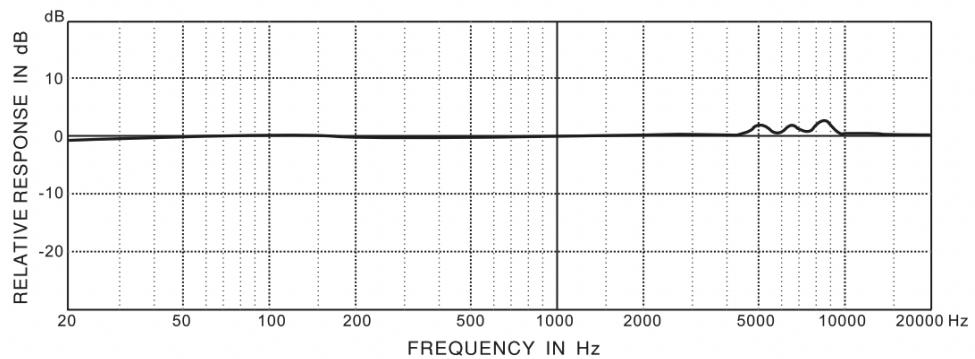


Figura 30 – Resposta em frequência do microfone utilizado. [Manual do produto].

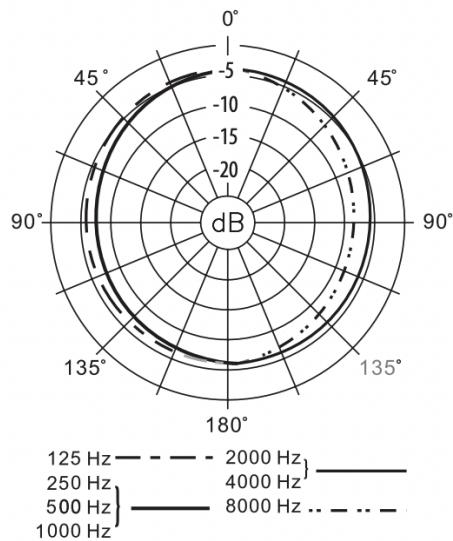


Figura 31 – Diagrama de captação do microfone utilizado. [Manual do produto].

Pelas imagens, é possível perceber que, o microfone tem uma resposta constante para todo o espectro de frequência, conforme o desejado, apresentando apenas, pequena variação, na região entre 5 e 10 kHz.

3.3.2 Medição da Resposta do Ambiente

Ao mesmo tempo em que o som era emitido pelo alto falante, o microfone estava gravando de outro ponto da sala. Para cada local, foram realizadas 3 medições diferentes, em pontos diferentes da sala, para que possa ser feita uma média do tempo de reverberação, diminuindo assim o efeito de eventos repentinos e evidenciando a dependência que a resposta em frequência tem, com a posição na sala. O software Ableton Live 10 foi utilizado para captar o som do microfone e gravar no computador em formato WAV.

3.3.3 Medição do Ruído

Para se medir a intensidade absoluta de um sinal, é necessário calibrar o sistema de medição, através de alguma referência. Para isso, foi utilizado o calibrador GRAS type 42AB, demonstrado a seguir.



Figura 32 – Calibrador de Microfone Utilizado

O calibrador de microfone, que emite um sinal de 1 kHz, de intensidade conhecida, 114 dB SPL, foi ligado, e então, o sinal gerado foi gravado através do microfone Behringer ECM 8000. O resultado foi salvo em um arquivo de áudio no computador. O sinal também foi utilizado para calibrar um decibelímetro, usado como segunda medida de comparação.

No Matlab, foi utilizada a função *calibrate*, que recebe um sinal de áudio e o valor em SPL desse sinal, e gera um coeficiente de calibragem, para que se possa multiplicar futuras medições, por ele.

A partir daí, foram realizadas diversas gravações em cada sala, e então, através do System Object do Matlab, *splMeter*, primeiro com o parâmetro "A-weighting" e depois com o parâmetro "C-weighting", foram gerados valores de Lt, Leq, Lpeak e Lmax, explicados a seguir. [Davis ()]

Parâmetros gerados:

1. Lt: É o valor de SPL, ponderado no tempo, representando de certa maneira, uma média móvel do valor de SPL, no tempo. É uma medida de intensidade que se assemelha à maneira que nosso ouvido percebe a intensidade dos sons.
2. Leq: É a amplitude que um sons constante precisaria ter, para que carregasse a mesma energia do som em questão, naquele intervalo de tempo.
3. Lpeak: É o valor de pico máximo de SPL atingido, sem ponderação temporal. Em geral não é um parâmetro de muito interesse, visto que não tem muita relação com nossa sensação auditiva.
4. Lmax: É o Lt máximo em um determinado intervalo de tempo.

A partir disso, foi gerado o gráfico dos quatro parâmetros, em função do tempo, para melhor visualização da variação do nível de ruído, ao longo das gravações. O código do Matlab utilizado encontra-se no anexo [A.3](#).

Por fim, foi realizada uma medição da intensidade de uma fala típica, em sala de aula, também ponderada pelas curvas A e C, afim de se estimar a relação sinal-ruído (SNR) que será atingida no ambiente.

3.4 Processamento dos Dados

3.4.1 Cálculo da Resposta ao Impulso

Para realizar os processamentos no sinal, foi utilizado o programa escrito no Matlab, signal_analysis.m, descrito no anexo [A.2](#).

Para iniciar a análise, são definidos no programa os nomes dos diretórios e arquivos a serem lidos, bem como parâmetros que serão constantes ao longo do programa, conforme o código a parte do código descrita no anexo [A.2.1](#).

Conforme demonstrado na seção [2.3.3](#), a resposta ao impulso por esse método, pode ser obtida através da convolução de $y[n]$ com $x[-n]$. Para maior praticidade, foi utilizado um arquivo de áudio de 2 canais (estéreo), no qual foi colocada a medição feita $y[n]$ no canal 1, e o sinal original $x[n]$ no canal 2. Sendo assim, na parte 2 do código, é realizada a leitura dos arquivos, e, de posse de ambos sinais, utiliza-se a convolução, para chegar à resposta ao impulso, do ambiente em questão. Isso foi descrito no anexo [A.2.2](#).

A partir daí, utiliza-se a FFT para computar a transformada de Fourier do sinal e obter a resposta no domínio da frequência, então, gerar o gráfico correspondente, conforme o código no anexo [A.2.3](#).

3.4.2 Cálculo do Tempo de Reverberação (RT60)

3.4.2.1 RT60 Total

Primeiro, é selecionada a resposta temporal em escala logarítmica $y[n]$, a partir do ponto de amplitude máxima, e feita uma regressão linear dos primeiros 0.5 s, que vai aproximar o ritmo de decaimento do sinal. São utilizados apenas os primeiros décimos de segundo da queda, pois, a medida que ela acontece, a amplitude do sinal começa a se aproximar do nível de ruído, diminuindo assim o ritmo de decaimento, até estagnar no valor do nível de ruído. O exemplo a seguir ilustra isso:

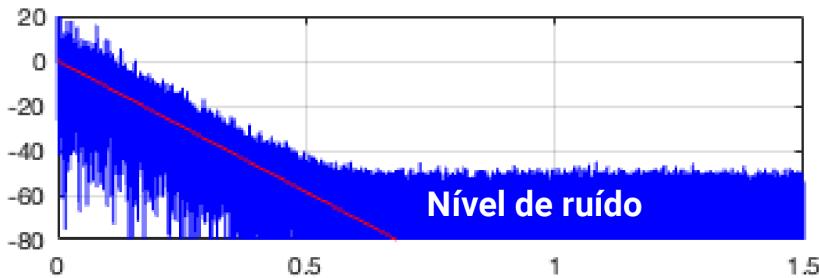


Figura 33 – Decaimento da reverberação e nível de ruído.

A regressão linear é feita gerando-se um polinômio de aproximação dos dados, de ordem 1, conforme o código do anexo [A.2.4](#).

Com a resposta do ambiente no domínio do tempo e a regressão linear que aproxima o decaimento dessa resposta prontas, gera-se o gráfico que ilustra ambas, normalizadas para que a primeira amostra da regressão linear tenha amplitude de 0 dB, através do código descrito no anexo [A.2.5](#).

Em seguida, é calculado o RT20, que é o tempo que essa regressão leva para cair 20 dB do valor inicial (visto que, em alguns casos, o vetor de tempo de 1,5 s não foi suficiente para a regressão linear atingir os -60 dB). Então multiplica-se por 3, obtendo o valor de RT60. Anexo [A.2.6](#).

Esse processo é repetido para as 3 gravações e então a média e o desvio padrão são computados. Os resultados são apresentados em tabela e gráfico.

3.4.2.2 RT60 em Terços de Oitava

Para melhor avaliar a reverberação para diferentes valores de frequência, gerou-se um vetor de frequências que vai de 100 Hz até 20 kHz, com espaçamento de terços de oitava. Isso se deve ao fato de que o ouvido humano pode ser aproximado a um banco de filtros de terço de oitava, conforme explicado na seção [2.1.3](#). O ponto de partida da avaliação foi 100 Hz por vários motivos. O primeiro é que, a voz humana não abrange regiões abaixo desse valor de frequência. O segundo é que, à medida que se diminui muito a frequência, o alto falante começa a não conseguir reproduzir o som com amplitude suficiente. Por último, e em parte como consequência do segundo motivo, nessa região, é difícil obter uma SNR boa o suficiente.

Sendo assim, foi gerado o vetor de frequências composto pelos 24 valores de frequência a seguir:

$$F_C = [100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, \dots, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000, 20000] \text{ Hz} \quad (3.1)$$

No programa, a última frequência precisou ser diminuída para o limite de 19599Hz, que é o máximo que a frequência de amostragem permitiu, visto que a frequência de corte superior do filtro correspondente é um pouco mais alta. O código foi descrito no anexo A.2.7.

Para cada frequência F_C , foi criado um filtro Butterworth de 3^a ordem com boa seletividade, tendo inclinação de aproximadamente 18 dB por oitava, em torno de Fc. O código utilizado foi descrito no anexo A.2.8, e a representação da magnitude da função de transferência de cada filtro se encontra a seguir:

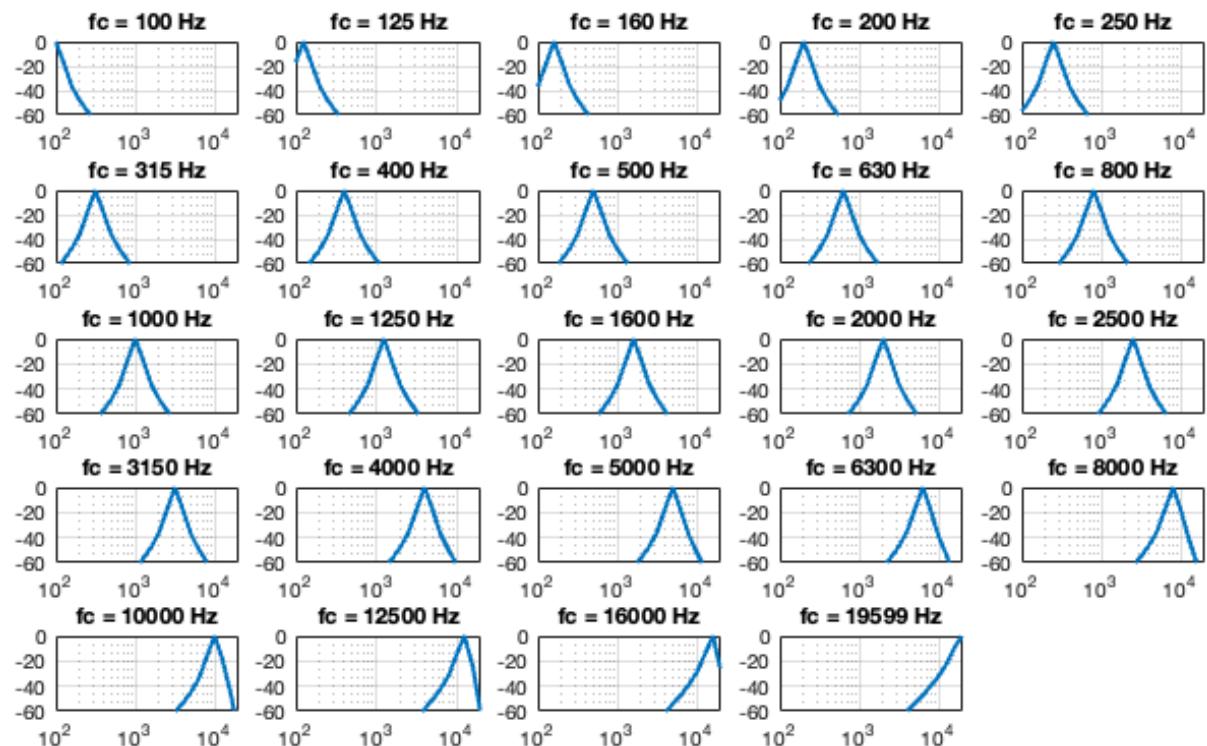


Figura 34 – Função de transferência dos filtros de Butterworth gerados.

A partir daí, filtra-se a resposta temporal linear $y_{Lin}(n)$ iterativamente, para cada filtro gerado, passando sua amplitude para escala logarítmica e realizando o mesmo procedimento feito para o RT60 geral, conforme o código do anexo A.2.9.

Por fim, após realizar todo o procedimento, iterativamente, para cada medição, é gerado um gráfico de tempo de reverberação e desvio padrão por frequência, a fim de se ter um entendimento do comportamento da reverberação da sala ao longo do eixo de frequências, bem como o quanto as medições variaram para cada frequência, dando uma estimativa da precisão do método. O código foi descrito no anexo A.2.10.

3.5 Resultados

3.5.1 Apresentação dos Resultados

Os resultados da medição do ruído serão apresentados em forma de gráfico contendo os valores de Lt, Leq, Lpeak e Lmax, explicados na seção 3.3.3, em escala de dBA e dBC, ao longo da gravação feita. Os resultados da medição da resposta ao impulso serão dados por gráficos da própria resposta calculada, em função do tempo. Os resultados do RT60 total serão dados em forma de tabela, contendo o valor de RT60 para todas as medições feitas. Para avaliar a resposta e RT60, para cada terço de oitava, será mostrado um gráfico com o decaimento da resposta, em cada região de frequência, bem como um gráfico com o valor do RT60, em função da frequência, acompanhado do desvio padrão calculado, entre as medições. Já a resposta em frequência será avaliada por seu gráfico de amplitude em função da frequência, bem como uma tabela, demonstrando alguns valores de picos e vales do gráfico de uma das medições. Esses valores poderão ser comparados com os da tabela de modos ressonantes previstos analiticamente para a sala, considerando os números de onda 1 e 2 em cada dimensão.

3.5.2 Discussão dos Resultados

Os resultados apresentados serão discutidos em termos de confiabilidade, coerência com as atividades do local, conformidade com normas e padrões estabelecidos e explicados ao longo do estudo, possíveis problemas e suas causas, bem como possíveis soluções.

4 Resultados

4.1 Ruído

4.1.1 Sala de Aula

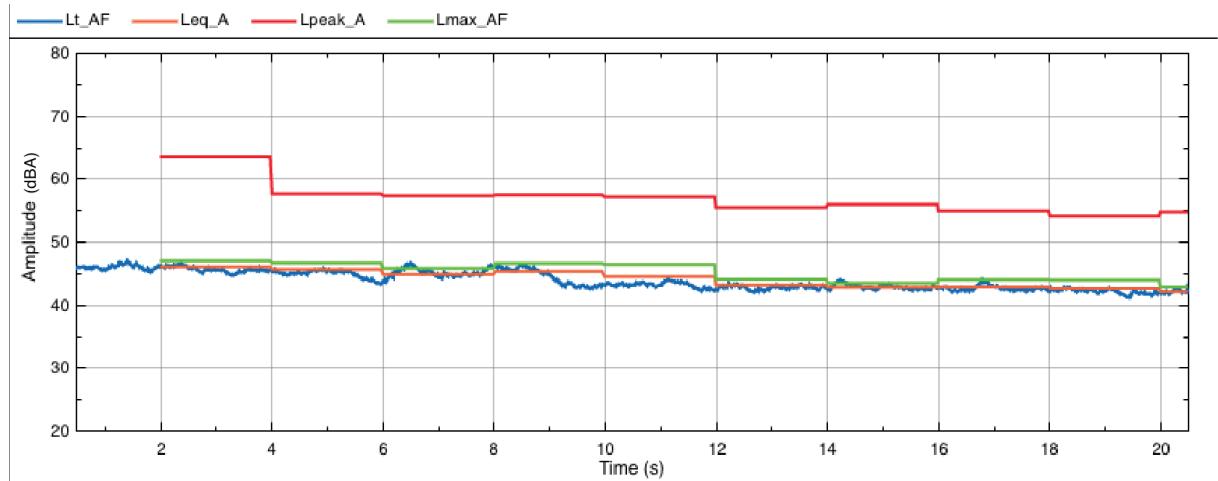


Figura 35 – Gráfico de nível de ruído medido na sala de aula, em dBA.

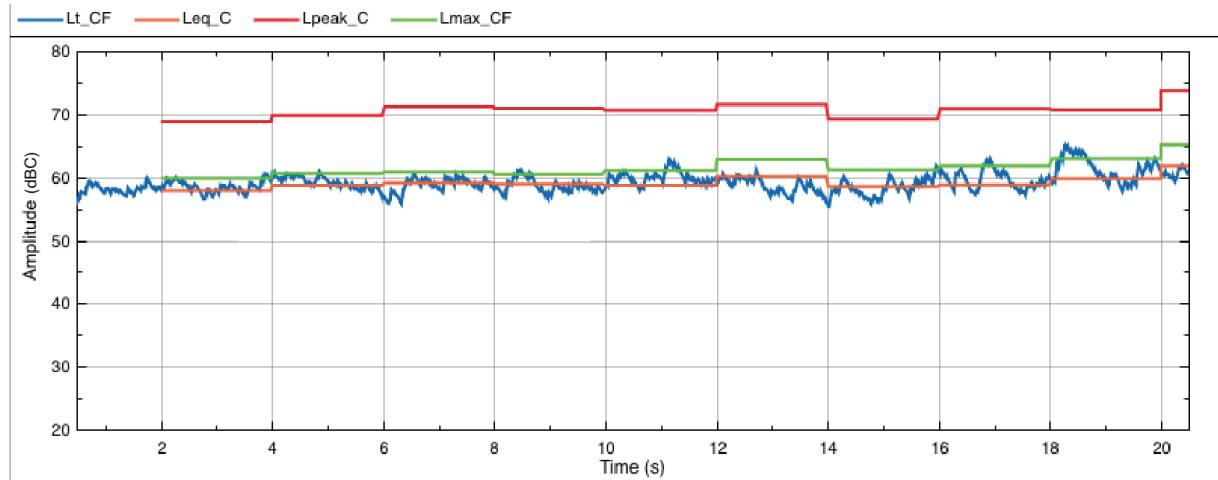


Figura 36 – Gráfico de nível de ruído medido na sala de aula, em dBC.

4.1.2 Sala de Conferência

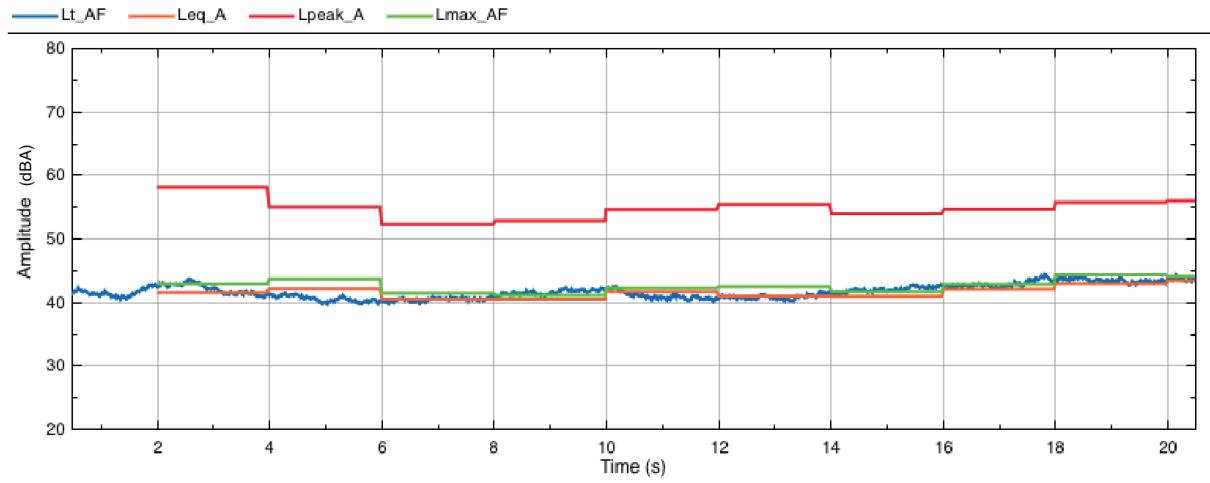


Figura 37 – Gráfico de nível de ruído medido na sala de conferência, em dBA.

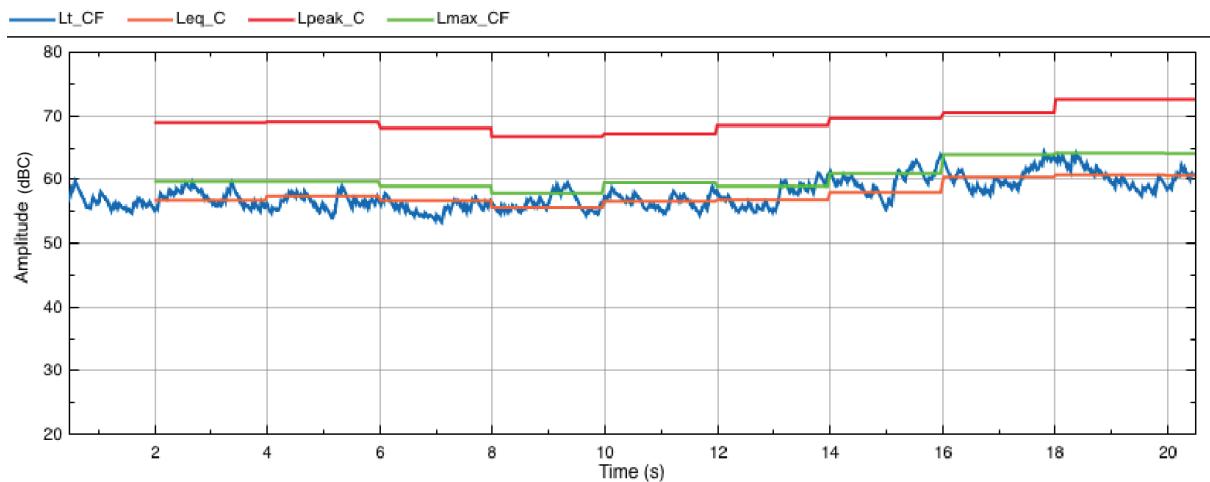


Figura 38 – Gráfico de nível de ruído medido na sala de conferência, em dBC.

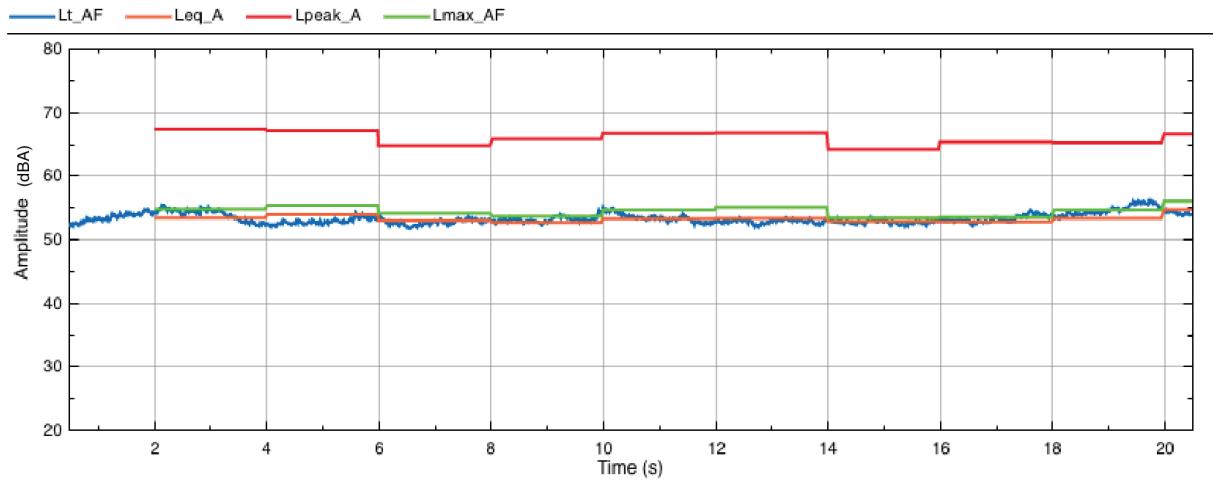


Figura 39 – Gráfico de nível de ruído medido na sala de conferência, com ar condicionado ligado, em dBA.

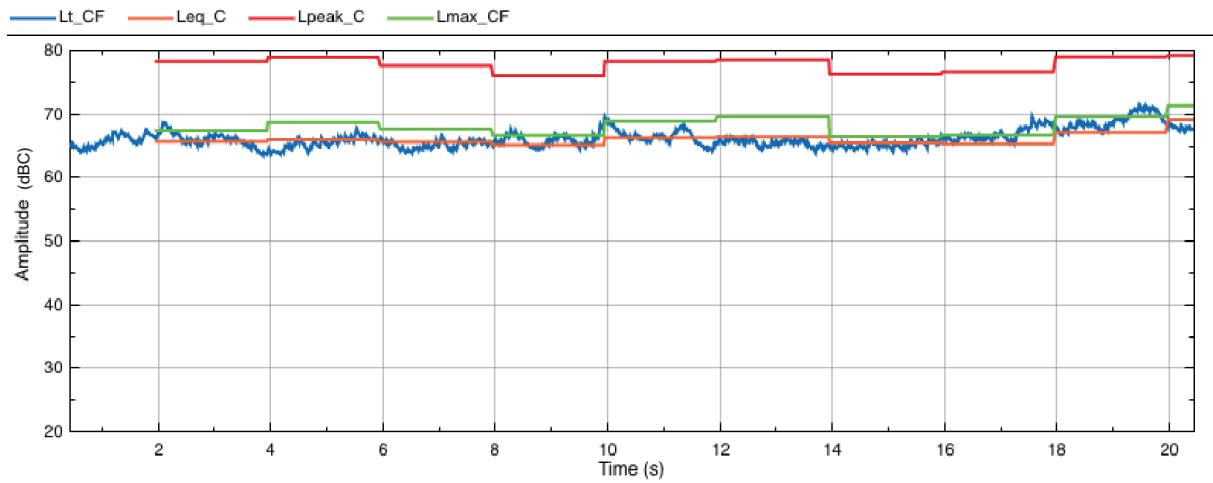


Figura 40 – Gráfico de nível de ruído medido na sala de conferência, com ar condicionado ligado, em dBC.

4.1.3 Auditório

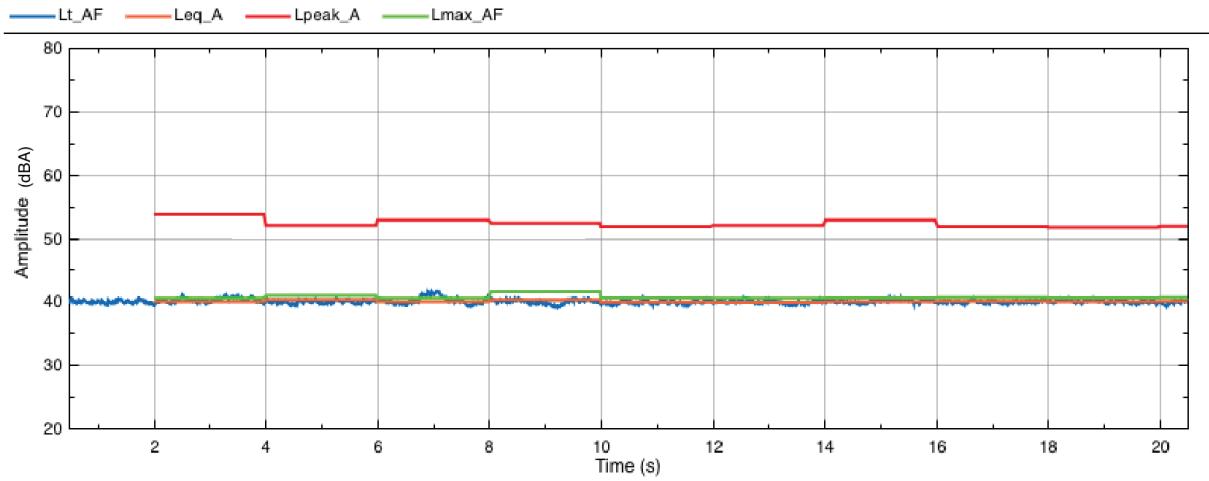


Figura 41 – Gráfico de nível de ruído medido no auditório, em dBA.

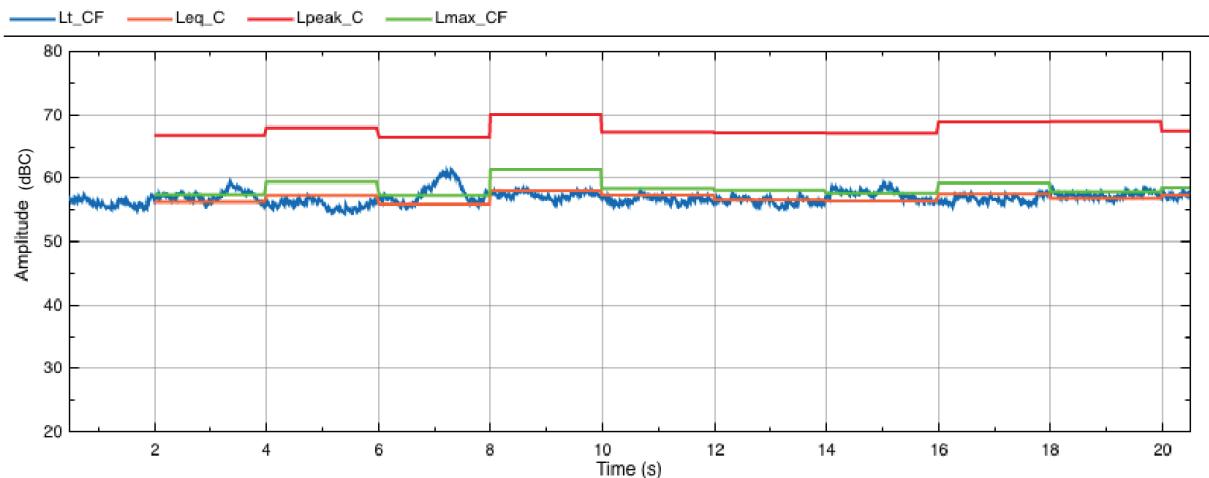


Figura 42 – Gráfico de nível de ruído medido no auditório, em dBC.

4.2 Resposta ao Impulso e RT60 Total

4.2.1 Sala de Aula

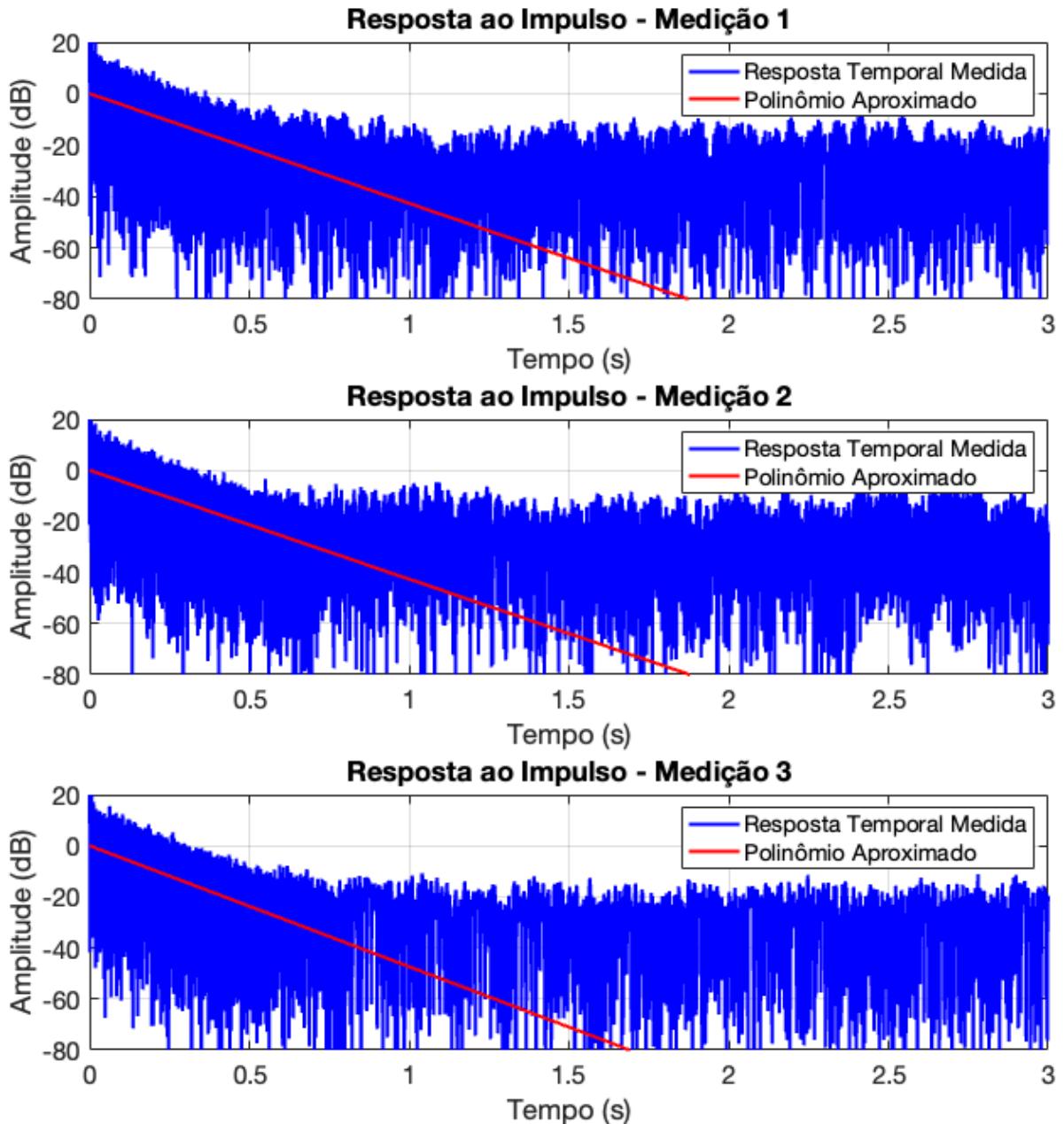


Figura 43 – Gráfico das três medições da resposta ao impulso da sala de aula.

	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Desvio Padrão
RT60 (s)	1,4058	1,4087	1,2678	1,3607	0,0657

Tabela 3 – Tabela de valores de RT60 total, medidos na sala de aula

4.2.2 Sala de Conferência

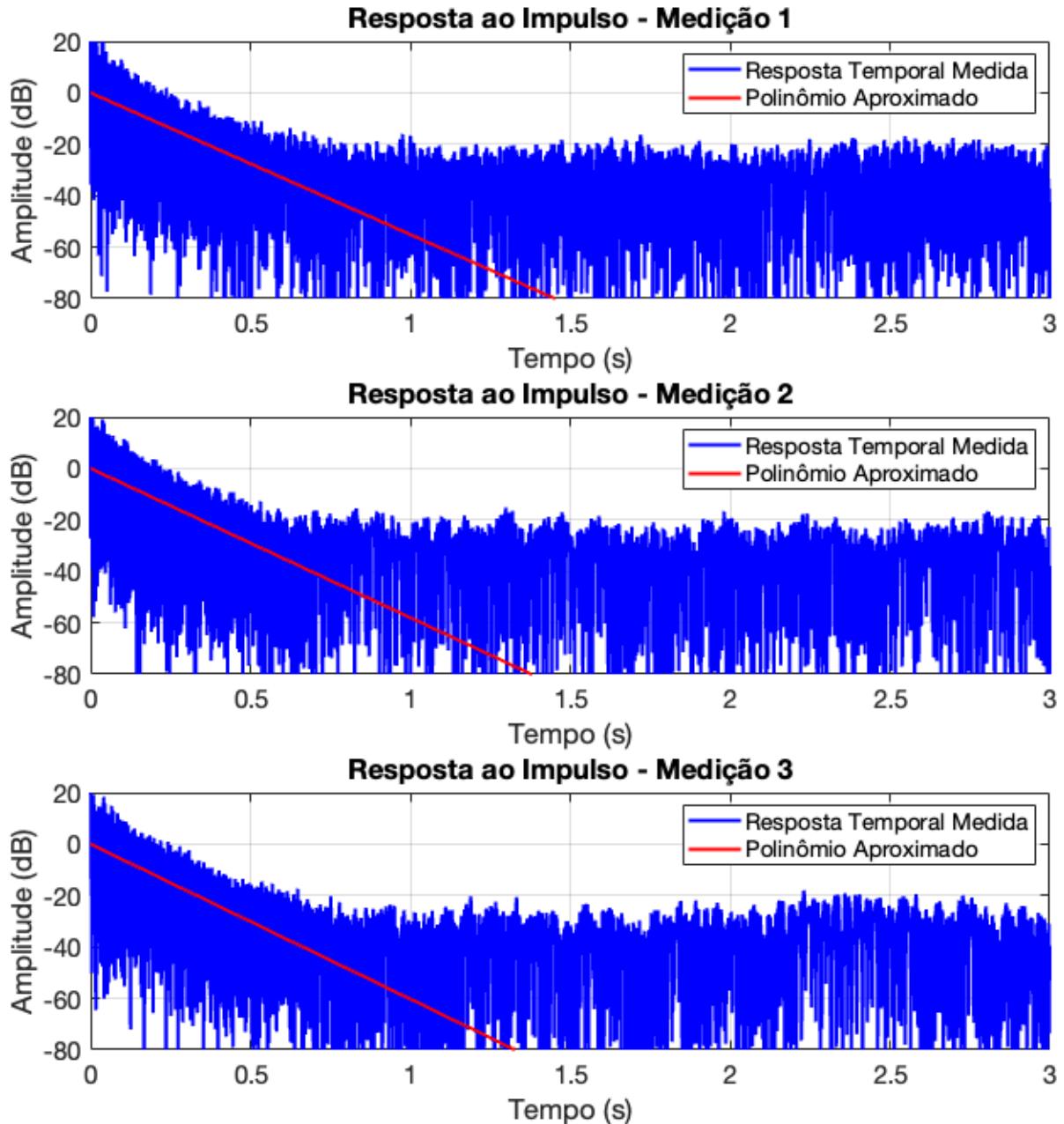


Figura 44 – Gráfico das três medições da resposta ao impulso da sala de conferência.

	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Desvio Padrão
RT60 (s)	1,0890	1,0343	0,9961	1,0398	0,0381

Tabela 4 – Tabela de valores de RT60 total, medidos na sala de conferência

4.2.3 Auditório

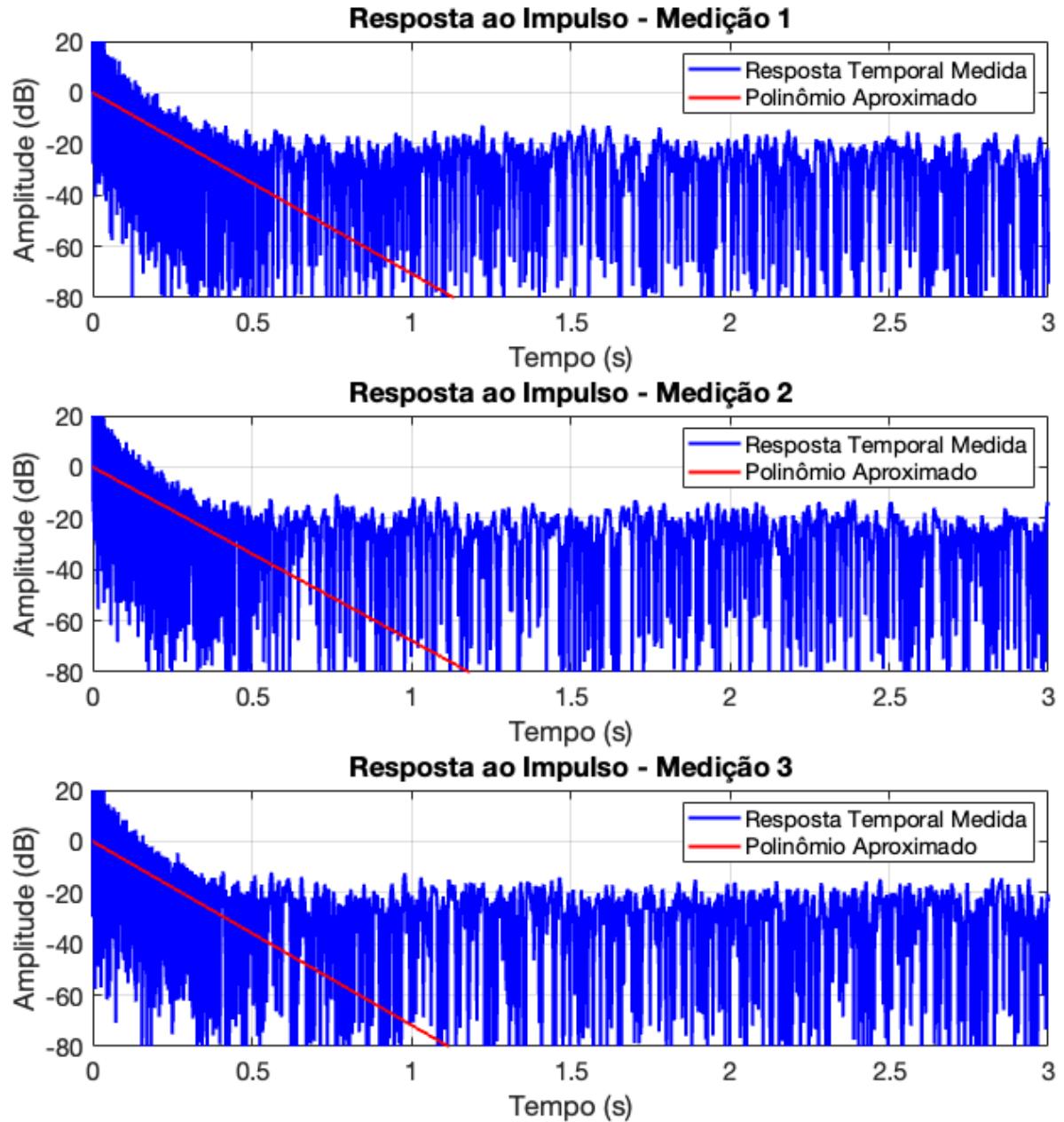


Figura 45 – Gráfico das três medições da resposta ao impulso do auditório.

	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Desvio Padrão
RT60 (s)	0,8505	0,8865	0,8378	0,8582	0,0206

Tabela 5 – Tabela de valores de RT60 total, medidos no auditório

4.3 Resposta temporal e RT60, por Terço de Oitava

4.3.1 Sala de Aula

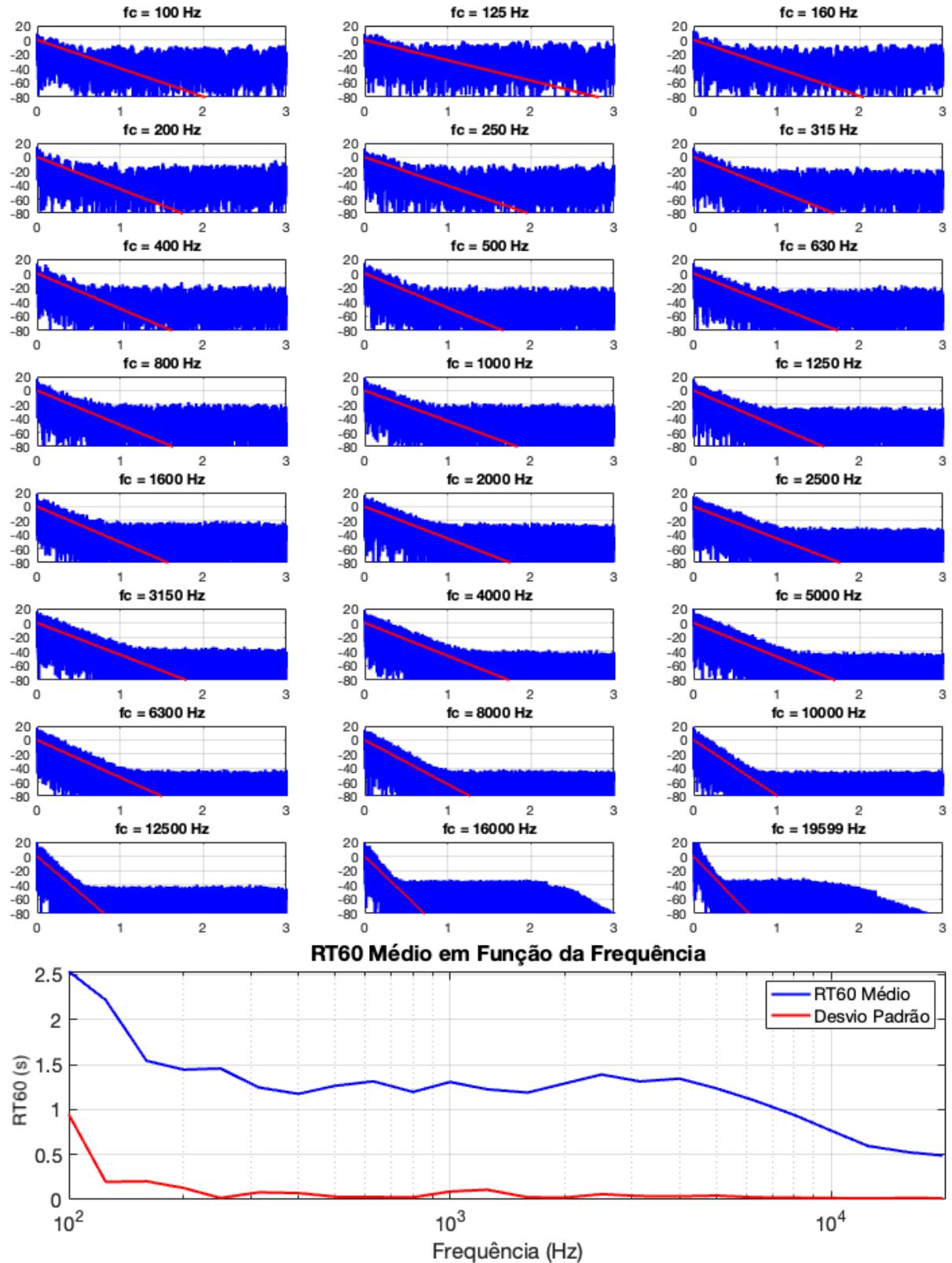


Figura 46 – Gráfico das respostas temporais, por terço de oitava, medição 2, e gráfico de RT60 em função da frequência, da sala de aula.

4.3.2 Sala de Conferência

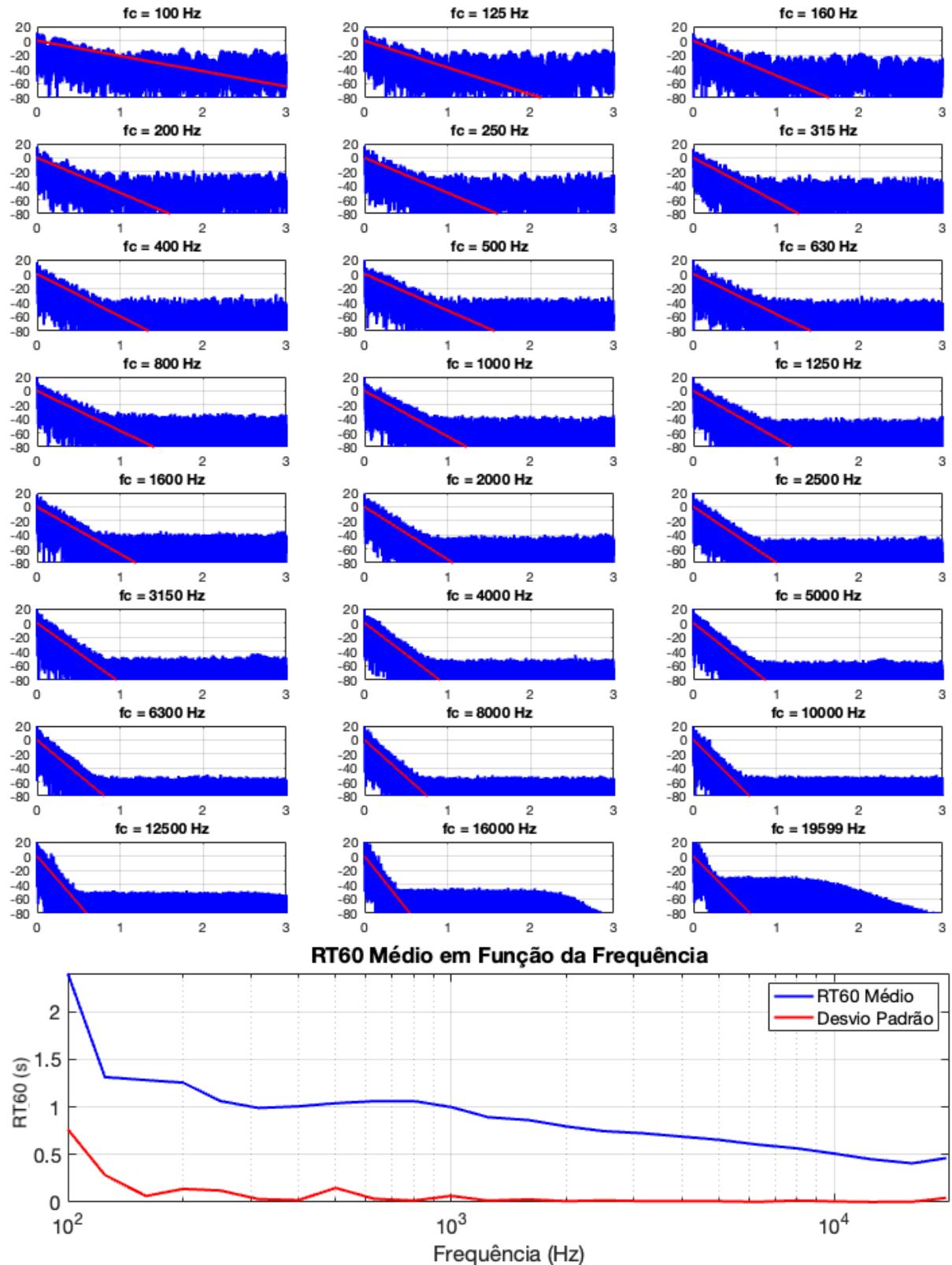


Figura 47 – Gráfico das respostas temporais, por terço de oitava, medição 2, e gráfico de RT60 em função da frequência, da sala de conferência.

4.3.3 Auditório

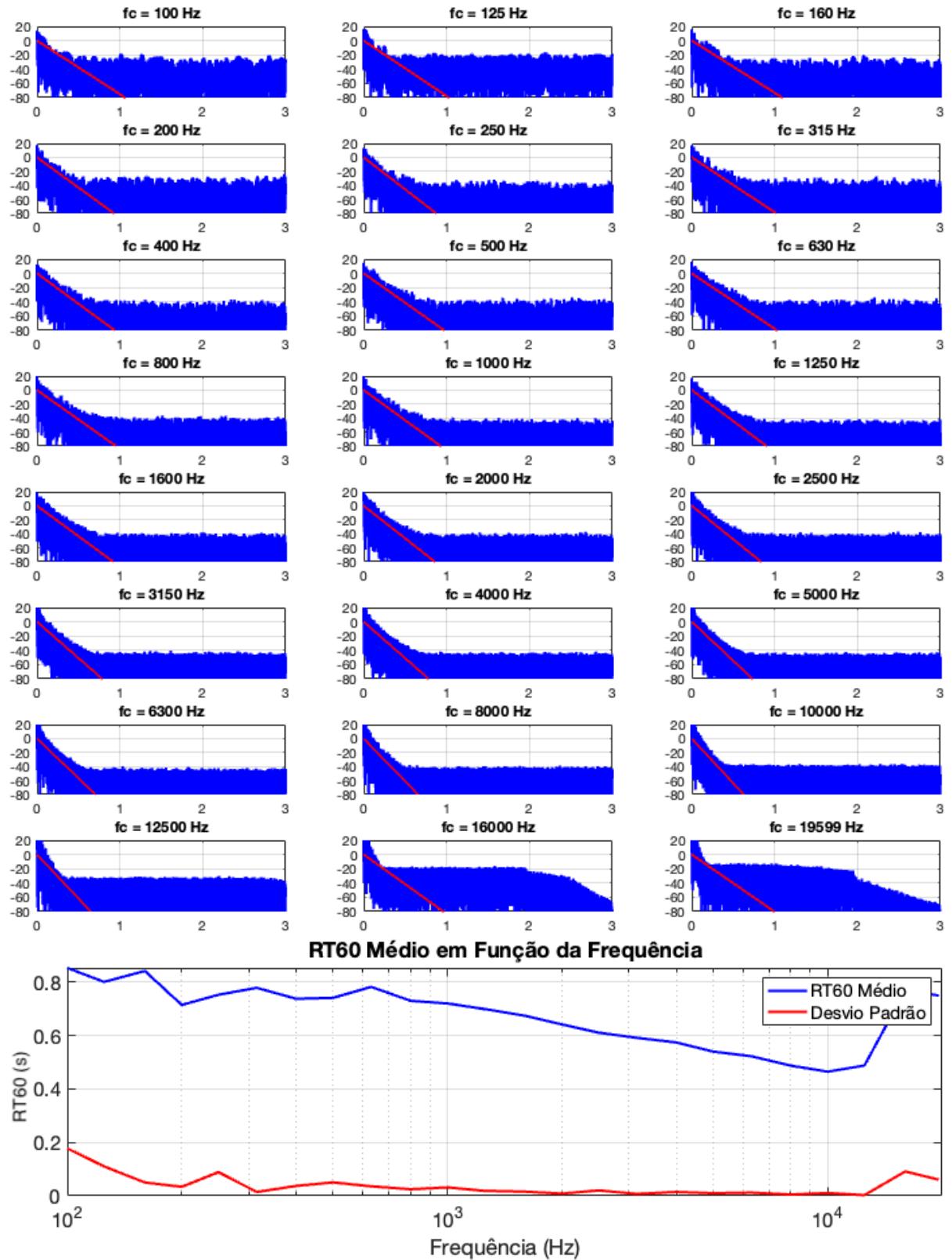


Figura 48 – Gráfico das respostas temporais, por terço de oitava, medição 2, e gráfico de RT60 em função da frequência, do auditório.

4.4 Resposta em Frequênci

4.4.1 Sala de Aula

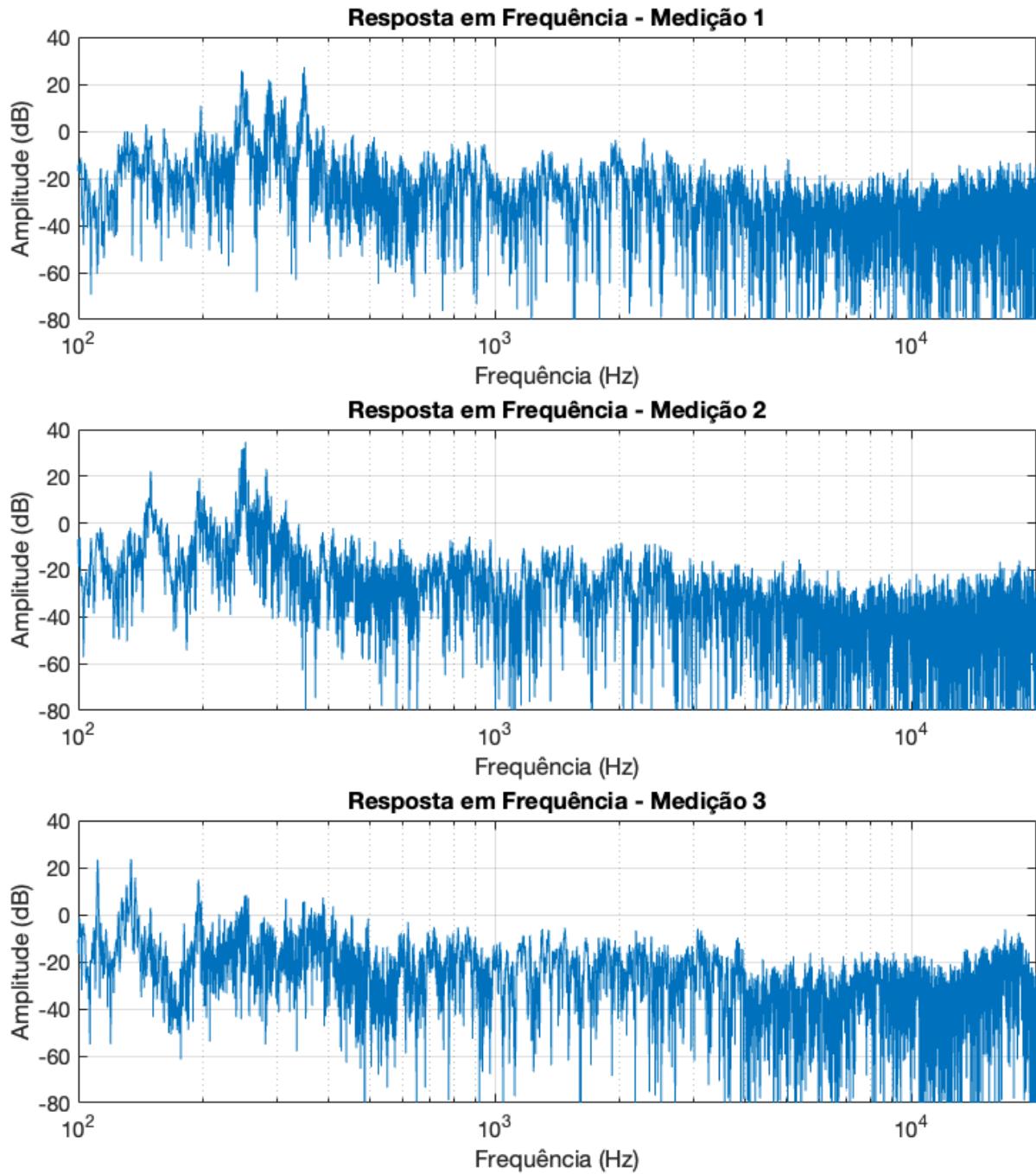


Figura 49 – Gráfico da resposta em frequência da sala de aula.

N^o do Modo	p	q	r	Frequência (Hz)	N^o do Modo	p	q	r	Frequência (Hz)
1	1	0	0	11.99	14	2	1	1	70.55
2	2	0	0	23.98	15	0	2	1	84.37
3	0	1	0	30.08	16	1	2	1	85.21
4	1	1	0	32.38	17	2	2	1	87.71
5	2	1	0	38.47	18	0	0	2	118.27
6	0	0	1	59.13	19	1	0	2	118.88
7	0	2	0	60.17	20	2	0	2	120.68
8	1	0	1	60.34	21	0	1	2	122.04
9	1	2	0	61.35	22	1	1	2	122.63
10	2	0	1	63.81	23	2	1	2	124.37
11	2	2	0	64.77	24	0	2	2	132.70
12	0	1	1	66.35	25	1	2	2	133.24
13	1	1	1	67.42	26	2	2	2	134.85

Tabela 6 – Tabela de modos ressonantes esperados para a sala de aula, com base na equação 2.12.

Frequência (Máximos)	Amplitude	Frequência (Mínimos)	Amplitude
132 Hz	0 dB	111 Hz	-60 dB
145 Hz	3 dB	141 Hz	-55 dB
160 Hz	1 dB	158 Hz	-55 dB
197 Hz	11 dB	186 Hz	-49 dB
247 Hz	25 dB	230 Hz	-57 dB
287 Hz	22 dB	268 Hz	-68 dB
349 Hz	27 dB	333 Hz	-63 dB
387 Hz	2 dB	400 Hz	-54 dB
457 Hz	-1 dB	525 Hz	-64 dB
513 Hz	-2 dB	641 Hz	-70 dB

Tabela 7 – Tabela de parte dos máximos e mínimos locais, da resposta em frequência da sala de aula, medição 1.

4.4.2 Sala de Conferência

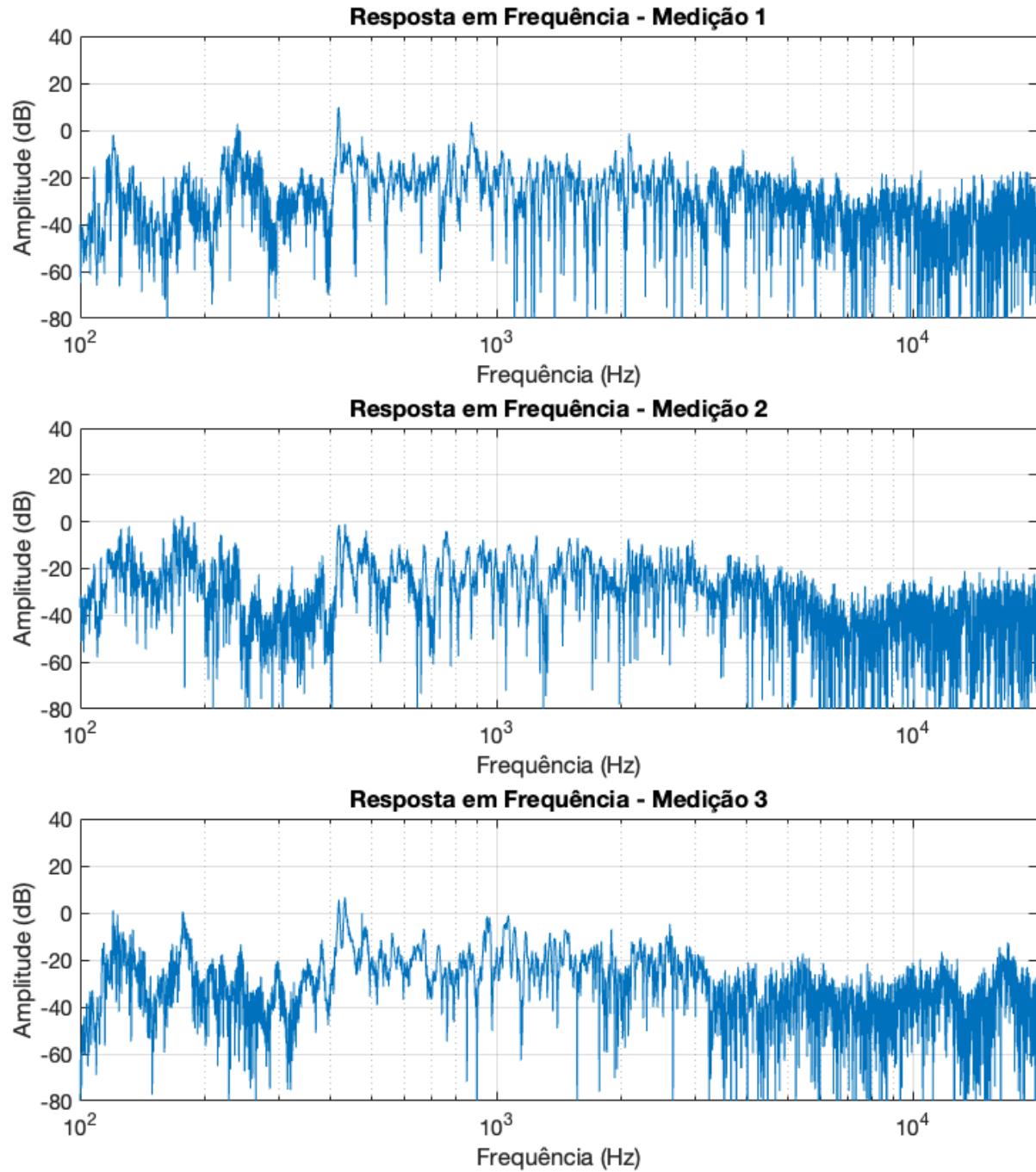


Figura 50 – Gráfico da resposta em frequência da sala de conferência.

N^o do Modo	p	q	r	Frequência (Hz)	N^o do Modo	p	q	r	Frequência (Hz)
1	1	0	0	15.08	14	2	1	1	73.77
2	2	0	0	30.17	15	0	2	1	87.03
3	0	1	0	31.85	16	1	2	1	88.33
4	1	1	0	35.24	17	2	2	1	92.12
5	2	1	0	43.87	18	0	0	2	118.62
6	0	0	1	59.31	19	1	0	2	119.57
7	1	0	1	61.19	20	2	0	2	122.39
8	0	2	0	63.70	21	0	1	2	122.82
9	1	2	0	65.46	22	1	1	2	123.74
10	2	0	1	66.54	23	2	1	2	126.47
11	0	1	1	67.32	24	0	2	2	134.64
12	1	1	1	68.99	25	1	2	2	135.48
13	2	2	0	70.48	26	2	2	2	137.98

Tabela 8 – Tabela de modos ressonantes esperados para a sala de conferência, com base na equação 2.12.

Frequência (Máximos)	Amplitude	Frequência (Mínimos)	Amplitude
120 Hz	-2 dB	109 Hz	-65 dB
134 Hz	-15 dB	124 Hz	-66 dB
182 Hz	-13 dB	140 Hz	-68 dB
238 Hz	3 dB	162 Hz	-105 dB
269 Hz	-8 dB	207 Hz	-74 dB
340 Hz	-15 dB	283 Hz	-93 dB
417 Hz	9 dB	294 Hz	-71 dB
475 Hz	-2 dB	395 Hz	-69 dB
520 Hz	-9 dB	459 Hz	-62 dB
870 Hz	3 dB	543 Hz	-74 dB

Tabela 9 – Tabela de parte dos máximos e mínimos locais, da resposta em frequência da sala de conferência, medição 1.

4.4.3 Auditório

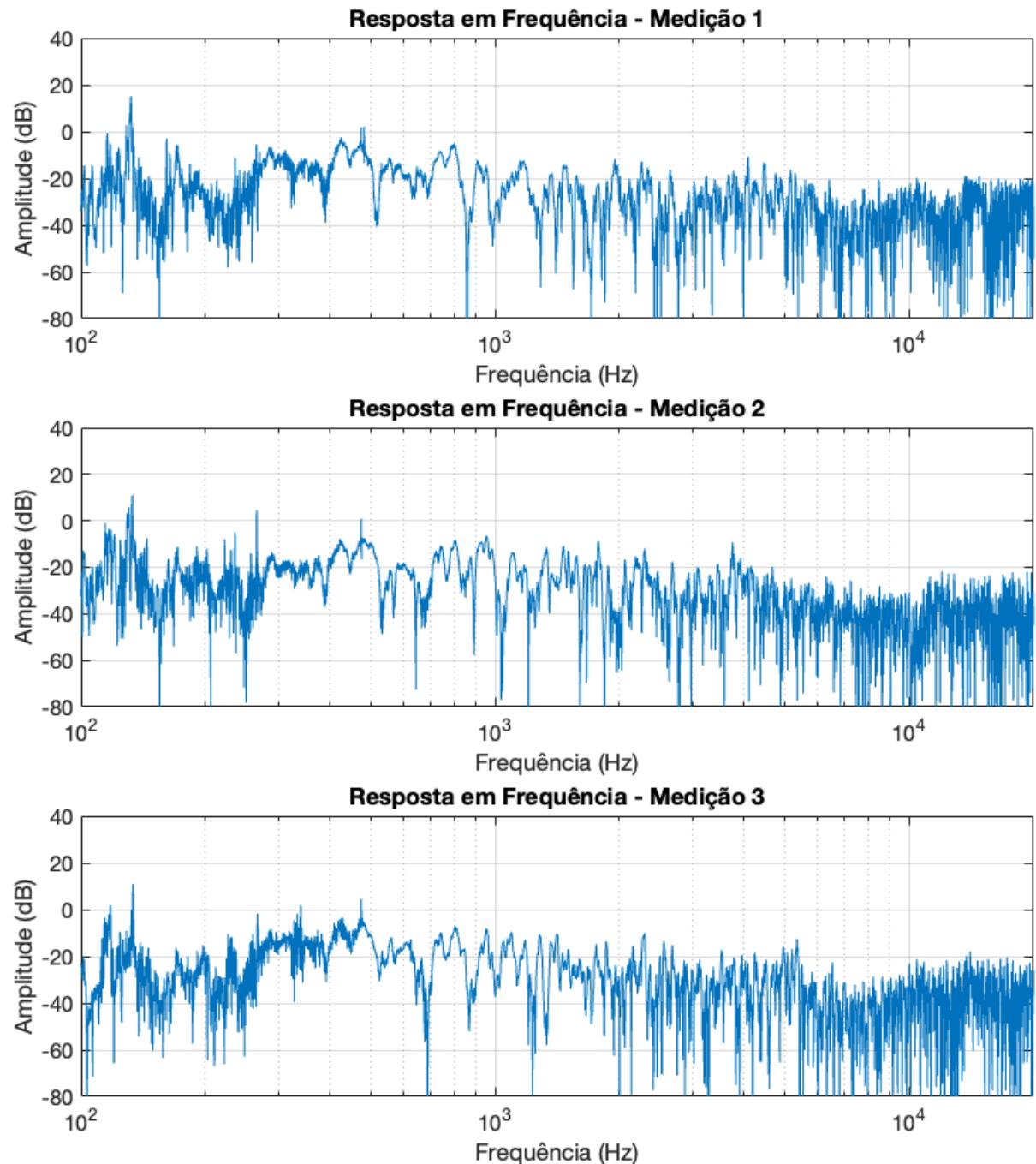


Figura 51 – Gráfico da resposta em frequência do auditório.

Frequência (Máximos)	Amplitude	Frequência (Mínimos)	Amplitude
115 Hz	-1 dB	126 Hz	-69 dB
132 Hz	15 dB	154 Hz	-96 dB
161 Hz	-3 dB	226 Hz	-58 dB
287 Hz	-7 dB	322 Hz	-32 dB
424 Hz	-4 dB	389 Hz	-38 dB
475 Hz	2 dB	517 Hz	-39 dB
557 Hz	-11 dB	632 Hz	-27 dB
735 Hz	-8 dB	687 Hz	-28 dB
800 Hz	-5 dB	854 Hz	-99 dB
910 Hz	-12 dB	988 Hz	-49 dB

Tabela 10 – Tabela de parte dos máximos e mínimos locais, da resposta em frequência do auditório, medição 1.

5 Discussão

5.1 Ruído

Em geral, o nível de ruído medido ficou acima do recomendado (35 dBA ou 55 dBC), conforme a seção 2.2.3. Isso pode ser explicado pelo fato de existirem grandes janelas nos ambientes avaliados, voltadas para uma avenida muito movimentada da cidade, de maneira que é possível ouvir o barulho do transito.

A sala de aula atingiu os maiores níveis de ruído, por volta de 45 dBA e 60 dBC. Na sala de conferência, houve um valor um pouco melhor, em torno de 42 dBA e 57 dBC, porém, ao ligar o ar condicionado da sala, esses valores passaram para a casa de 55 dBA e 68 dBC, valores que podem ser considerados muito elevados. O auditório exibiu o melhor resultado, medindo 40 dBA e pouco acima de 55 dBC. Isso pode ser explicado pelo fato de ele estar localizado em um andar mais elevado, sendo assim mais longe da rua, além de possuir janelas menores do que os outros ambientes.

Utilizando um decibelímetro que já realiza as ponderações A e C sozinho, mediu-se a intensidade de uma fala típica, no auditório, que era o lugar com menos influência do ruído externo. Os valores obtidos variaram de 55 dBA a 65 dBA e de 65 dBC a 75 dBC, dependendo do tom de voz e posição do ouvinte na sala. Dessa maneira, estimou-se uma SNR entre 10 dB e 25 dB, a depender de diversos fatores. Em geral, se mostrou suficiente para o entendimento da fala no local, porém, em alguns momentos, no limite.

Os altos valores medidos na sala de aula são altamente indesejados, mas ao mesmo tempo são de difícil resolução, sem que sejam feitas grandes reformas no local. Na sala de conferência, uma solução recomendada é a substituição do tipo de ar condicionado, visto que este foi o elemento que mais trouxe prejuízo em termos de ruído. No auditório, apesar de levemente acima do recomendado, os níveis de ruído não preocupam.

5.2 Tempo de Reverberação

Os tempos de reverberação medidos também foram altos, conforme o esperado. Na sala de aula foram os maiores, tendo média de 1,36 segundos, e se mantendo acima de 1 s, para a maior parte do espectro de frequências, sendo mais do que o dobro do valor de 600 ms, recomendado conforme a seção 2.2.2. Na sala de conferência, a média foi de 1,04 segundos, se mantendo entre 0,5 s e 1,3 s, para a maior parte do espectro. Já o auditório trouxe os melhores resultados, com média de 0,85 segundos, se mantendo entre 0,5 s e 0,8 s na região principal do espectro de frequências.

Apesar disso, foi possível perceber que, em todos os ambientes, o RT60 foi satisfatório para as frequências acima de 5 kHz. Isso pode ser explicado pelo fato de que, altas frequências apresentam comprimentos de onda bem menores, e consequentemente podem ser absorvidas por qualquer fina camada de material macio, presente no ambiente.

Pelos baixos valores de desvio padrão, foi possível atestar que, a confiabilidade das medições foi alta, para a maior parte do espectro de frequências, com exceção da região dos graves, onde o desvio foi maior. Além disso, pelo gráfico de resposta temporal de cada região de frequência, pode-se perceber que, os parâmetros utilizados para a regressão linear não foram adequados para a aproximação da reta de decaimento do sinal, nem para as frequências muito baixas (abaixo de 200 Hz), nem para as muito altas (acima de 16 kHz), de maneira que, os resultados para essas faixas não podem ser considerados confiáveis.

Os resultados ruins, principalmente da sala de aula, podem ser explicados pela ausência de objetos com bom coeficiente de absorção no local, já a leve melhora no RT60 da sala de conferência e do auditório, especialmente para altas frequências, pode ser explicada pela existência de carpete no chão, além do estofado das poltronas do auditório, que ajuda a absorver mais ondas sonoras.

Com os resultados obtidos, é fácil prever que a inteligibilidade da fala será gravemente comprometida nesses locais, por isso, é recomendada a instalação de placas absorvedoras no teto, tanto na sala de aula, quanto na de conferência, para que a fala do professor ou palestrantes possa ser melhor entendida, no local, e especialmente remotamente, via video-conferência, visto que, nesse formato, não existe separação espacial entre sinal direto e reverberante.

Tratando-se de inteligibilidade da fala humana, os médios e agudos é que exercem o papel principal. Dessa forma, placas de espuma acústica, de 50mm de comprimento, poderiam ser usadas, pois, conforme demonstrado na seção 2.4.1, já nos proporcionariam um coeficiente de absorção α maior que 0,5, para frequências acima de 1 kHz. Foi escolhido esse material devido a seu baixo custo e fácil acesso. A área aproximada, necessária para se obter o valor de RT60 de 600 ms, recomendado na seção 2.2.2, utilizando as equações 2.14 e 2.15 combinadas, pode ser calculada, para a sala de aula e sala de conferência, respectivamente, pelas equações 5.1 e 5.2:

$$S = 0,161 \frac{V}{(RT60)(\alpha)} = 0,161 \frac{(14,3)(5,7)(2,9)}{(0,6)(0,5)} = 126,85 \text{ m}^2 \quad (5.1)$$

$$S = 0,161 \frac{V}{(RT60)(\alpha)} = 0,161 \frac{(11,4)(5,4)(2,9)}{(0,6)(0,5)} = 95,80 \text{ m}^2 \quad (5.2)$$

Os valores de área encontrados podem ser considerados excessivamente altos, po-

rérm, conforme explicado na seção 2.2.2, a fórmula de Sabine tem um erro considerável, a medida que o valor de α sobe, de maneira que, com uma área de absorção menor do que a calculada, já seria possível atingir os tempos de reverberação desejados. Além disso, vale notar que, o coeficiente de absorção do material escolhido é bem mais alto para frequências a partir de 3 kHz, se aproximando de 0,8.

5.3 Resposta em Frequência

Pelos gráficos, percebe-se que, a resposta em frequência de todos os ambientes ficou longe do ideal, com diversas regiões de grande amplificação ou mascaramento de frequências, além de alta dependência da posição do ouvinte, na sala. Esses fenômenos já eram esperados, conforme explicado na seção 2.2.1, pois, uma sala sem objetos que absorvedores e difusores, abriga diversos modos ressonantes, que causam isso. Uma resposta desse tipo altera fortemente o timbre de qualquer onda sonora emitida no ambiente.

Os resultados da sala de aula apresentaram regiões de grande amplificação, em torno de 150 Hz, 195 Hz, 250 Hz, 290 Hz e 350 Hz, sendo modos críticos nesse ambiente, que, por pertencerem à região dos graves e médio-graves, podem tornar o timbre da voz mais "nasal", e atrapalhar muito sua inteligibilidade.

A sala de conferência apresentou modos em torno de 130 Hz, 180 Hz, 240 Hz, 290 Hz, 420 Hz, 680 Hz, 880 Hz, 950 Hz e 2100 Hz. São modos presentes, principalmente, nos graves, mas também nos médios, atingindo parte da região principal da voz humana. Na prática, foi possível constatar que, a reverberação excessiva nessa região, atrapalhou muito o entendimento do interlocutor, via video-conferência.

Apesar de serem fisicamente parecidas, a diferença nas respostas da sala de aula e de conferência, pode ser explicada, em parte, pela existência de muitas cadeiras a mais, distribuídas no ambiente, que, apesar de não serem absorvedoras acústicas, podem agir como objetos difusores, principalmente para médias e altas frequências, diminuindo o aparecimento dos modos da sala nessas regiões.

Neste quesito, o auditório demonstrou uma peculiaridade, pois, foi possível observar regiões contínuas de amplificação em sua resposta em frequência, em oposição aos picos mais finos, quantizados, dos outros ambientes. Isso pode ser explicado pelo fato de a junção entre o teto e a parede direita desse ambiente ser contínua, formando uma curva. Isso cria um contínuo de diferentes modos possíveis na sala. Houve amplificação na região dos 140 Hz, bem como na faixa entre 400 Hz e 500 Hz e entre 700 Hz e 800 Hz.

A associação precisa, dos picos e vales na resposta em frequência, com os valores esperados, calculados nas tabelas 6 e 8 mostrou-se difícil, devido às incertezas de medição, bem como influência de fatores não levados em conta nas previsões, como janelas e objetos

contidos na sala. Apesar disso, foi possível observar a clara influência dos modos, nas respostas em frequência. Conclui-se que, para se ter uma previsões quantitativas mais precisas, são necessárias ferramentas computacionais mais avançadas, para se fazer uma modelagem mais detalhada dos ambientes.

6 Conclusão

Os conceitos teóricos utilizados neste trabalho, mostraram-se muito funcionais e eficazes, para a avaliação acústica dos ambientes. A técnica de medição da resposta ao impulso por TSP, foi de fácil implementação prática, e bom resultado. A avaliação do nível de ruído foi de certa forma delicada, devido à necessidade de calibração relativamente precisa dos equipamentos e medições, além de necessitar que os ganhos de todos os equipamentos fossem mantidos constantes em todas etapas da medição, para que a calibração feita fizesse sentido.

O Matlab se mostrou uma ferramenta de extrema utilidade, no campo do processamento dos sinais, visto que possui extensa biblioteca de funções úteis para esse propósito, como transformadas, convolução, ponderação em frequência e tempo, geração de gráficos extremamente customizáveis, fácil manipulação de arquivos de áudio, dentre outras.

Neste estudo, não foi possível fazer a medição da MTF, conforme demonstrada na seção 2.2.4, e isso seria uma boa avaliação futura, para o melhor entendimento da inteligibilidade da fala no local.

Apesar da fácil implementação, as técnicas de medição apresentadas, como a do TSP, dependem da consideração de que nosso sistema é um LTIS, e sendo assim, não leva em conta possíveis distorções harmônicas. [Farina (2000)] demonstrou uma técnica de cálculo da resposta ao impulso, chamada de Logarithmic Sine Sweep Technique, como uma alternativa que pode ultrapassar essa limitação. [Stan, Embrechts e Archambeau (2002, seção 2.4)].

Em geral, foram obtidos resultados fora dos valores recomendados, porém isso já era esperado, visto que os ambientes avaliados possuíam pouco ou nenhum tratamento acústico. O nível de ruído foi muito alto, devido à localização da faculdade analisada, e teve taxas maiores ainda, devido ao sistema de ar condicionado utilizado. O tempo de reverberação também foi alto, devido à inexistência de objetos absorvedores sonoros nos ambientes, à exceção dos carpetes em dois deles, e das poltronas no auditório. A resposta em frequência apresentou uma infinidade de modos ressonantes das salas, o que pode ser extremamente desagradável, especialmente para reprodução musical, visto que altera muito o timbre dos sons emitidos, além de tornar a experiência auditiva dependente da posição do ouvinte no local. Foi possível constatar que, o cálculo da área de objetos absorvedores, necessária para se obter o RT60 desejado, apresenta erros grandes na prática, com as fórmulas existentes hoje. Dessa forma, o mais adequado para esta finalidade seria utilizar ferramentas computacionais mais avançadas.

Referências

- ANSI/ASA, S. Quantities and procedures for description and measurement of environmental sound - part 4: Noise assessment and prediction of long-term community response. p. Part 4, 2005. Disponível em: <<https://webstore.ansi.org/standards/asa/ansis12part2005>>. Citado na página 29.
- AOSHIMA, N. Computer-generated pulse signal applied for sound measurement. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 69, n. 5, p. 1484–1488, maio 1981. ISSN 0001-4966. Publisher: Acoustical Society of America. Disponível em: <<https://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.385782>>. Citado na página 33.
- BALLOU, G. *Handbook for Sound Engineers*. Focal, 2008. (Audio Engineering Society Presents Series). ISBN 978-0-240-80969-4. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=zsEBavFYZuEC>>. Citado na página 19.
- BRIGHAM, U. *What is Acoustics*. Disponível em: <<https://acoustics.byu.edu/what-is>>. Citado na página 14.
- BRÜEL, K. *Measuring Speech Intelligibility using DIRAC Type 7841*. 2013. Disponível em: <<https://www.bksv.com/media/doc/bo0521.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 31.
- CONWED. *Reverberation: How to measure it, and why it matters*. 2019. Disponível em: <<https://www.conwed.com/reverberation/>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 27.
- CRANDELL, C. C.; SMALDINO, J. J. Classroom Acoustics for Children With Normal Hearing and With Hearing Impairment. *Language, Speech, and Hearing Services in Schools*, v. 31, n. 4, p. 362–370, out. 2000. ISSN 0161-1461, 1558-9129. Disponível em: <<http://pubs.asha.org/doi/10.1044/0161-1461.3104.362>>. Citado na página 14.
- DAVIS, L. *Sound Measurement Terminology*. Disponível em: <<https://www.larsondavis.com/learn/sound-vibe-basics/sound-measurement-terminology>>. Citado na página 46.
- EATON, J. et al. Estimation of Room Acoustic Parameters: The ACE Challenge. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, v. 24, n. 10, p. 1681–1693, out. 2016. ISSN 2329-9290, 2329-9304. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7486010>>. Citado na página 15.
- ELLIOTT, T. M.; THEUNISSEN, F. E. The Modulation Transfer Function for Speech Intelligibility. *PLoS Computational Biology*, v. 5, n. 3, p. e1000302, mar. 2009. ISSN 1553-7358. Disponível em: <<https://dx.plos.org/10.1371/journal.pcbi.1000302>>. Citado na página 31.
- EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. C. *Master handbook of acoustics*. [s.n.], 2015. OCLC: 875520377. ISBN 978-0-07-184104-7. Disponível em: <<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071841047>>. Citado na página 27.
- FARINA, A. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. *Journal of the audio engineering society*, february 2000. Disponível em: <<https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10211>>. Citado na página 72.

- FASTL, H.; ZWICKER, E. *Psychoacoustics: Facts and Models*. Springer, 2007. 61–110 p. ISBN 978-3-540-68888-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68888-4_4>. Citado 3 vezes nas páginas 6, 19 e 28.
- HOUTGAST, T.; STEENEKEN, H. J. M. The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Predictor of Speech Intelligibility. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 54, n. 2, p. 557–557, ago. 1973. ISSN 0001-4966. Publisher: Acoustical Society of America. Disponível em: <<https://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1913632>>. Citado na página 30.
- HUSH, A. *Reverberation Illustration*. 2015. Disponível em: <<https://www.hushacoustics.co.uk/wp-content/uploads/2015/01/Reverberation-illustration.jpg>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 26.
- KLATTE, M. et al. Effects of Classroom Acoustics on Performance and Well-Being in Elementary School Children: A Field Study. *Environment and Behavior*, v. 42, n. 5, p. 659–692, set. 2010. ISSN 0013-9165. Publisher: SAGE Publications Inc. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0013916509336813>>. Citado na página 14.
- LONG, M. (Ed.). *Architectural Acoustics (Second Edition)*. Academic Press, 2014. 911–929 p. ISBN 978-0-12-398258-2. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123982582160015>>. Citado na página 27.
- NEWELL, P. *Recording studio design*. 3rd. ed. Focal Press, 2012. ISBN 978-0-240-52240-1. Disponível em: <https://books.google.com.br/books/about/Recording_Studio_Design.html?id=VGZJWvnvp1QC&redir_esc=y>. Citado 9 vezes nas páginas 6, 8, 24, 25, 28, 29, 34, 35 e 36.
- NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. Circuitos elétricos. *LTC*, v. 8a. edição, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- OPPENHEIM, A. V. *Sinais e sistemas*. [S.l.]: Prentice-Hall, 2010. Google-Books-ID: ZOg9bwAACAAJ. ISBN 978-85-7605-504-4. Citado 5 vezes nas páginas 6, 17, 18, 23 e 25.
- PARTNERS, P. T. *Noise Measurement Briefing*. 2008. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20080630083107/http://www.ptpart.co.uk/show.php?contentid=70>>. Citado na página 29.
- RABELO, A. T. V. et al. Effect of classroom acoustics on the speech intelligibility of students. *CoDAS*, v. 26, n. 5, p. 360–366, out. 2014. ISSN 2317-1782. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2317-17822014000500360&lng=en&tlang=en>. Citado na página 15.
- S12.60-2010, A. American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools. 2010. Disponível em: <https://successforkidswithhearingloss.com/wp-content/uploads/2012/01/ANSI-ASA_S12.60-2010_PART_1_with_2011_sponsor_page.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- STAN, G.-B.; EMBRECHTS, J. J.; ARCHAMBEAU, D. Comparison of different impulse response measurement techniques. *Journal of the Audio Engineering Society*, v. 50, p. 249–262, abr. 2002. Citado 3 vezes nas páginas 23, 32 e 72.

SUZUKI, Y. et al. An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 97, n. 2, p. 1119–1123, fev. 1995. ISSN 0001-4966. Publisher: Acoustical Society of America. Disponível em: <<https://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.412224>>. Citado 3 vezes nas páginas 25, 32 e 42.

THOMPSON, M. T. Chapter 14 - Analog Low-Pass Filters. In: THOMPSON, M. T. (Ed.). *Intuitive Analog Circuit Design (Second Edition)*. Boston: Newnes, 2014. p. 531–583. ISBN 978-0-12-405866-8. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124058668000140>>. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 22.

WEISSTEIN, E. W. Text, *Convolution*. Publisher: Wolfram Research, Inc. Disponível em: <<https://mathworld.wolfram.com/Convolution.html>>. Citado na página 17.

Anexos

ANEXO A – Códigos do Matlab Utilizados

A.1 Geração do TSP

O código utilizado para a geração do nosso sinal TSP, gen_tsp.m, foi dividido nas 3 seções a seguir.

A.1.1 Definição dos Parâmetros do Sinal

O primeiro passo é definir todos os parâmetros do TSP que deseja-se gerar, e salvá-los em variáveis.

```

1 T = 4800;           % duration of the TSP. The default is 1200ms.
2 fs = 44.1;          % sampling frequency (in kHz). The default is 44.1kHz.
3 bw = 22.05;         % bandwidth (in kHz) of the TSP. The default is the ...
                      Nyquist frequency, i.e. half of the sampling frequency.
4 bs = 0;             % bandshift (in kHz) of the TSP. The default is 0kHz.
5 ta = 240;           % starting time of the TSP (in ms). The default is ...
                      T/10 ms.
6 tb = 200;           % group delay growing rate (in ms/kHz). The default ...
                      is 50ms/kHz.
7
8                      % Note that, if a TSP with monotonically growing (or ...
                      decreasing) frequency, is desired, the condition ...
                      T ≥ ta + tb*(bs+bw) must be satisfied.

```

A.1.2 Criação do Sinal e Escrita do Arquivo

Nesta parte, o sinal é efetivamente criado, no domínio da frequência, através da definição de um sinal com magnitude constante, igual a 1, para todas as frequências, no qual, cada frequência possui um atraso de fase diferente, quadrático. Para se chegar ao sinal no somínio do tempo, basta fazer a transformada inversa de Fourier, IFFT. Assim, chegamos a um sinal de "sweep"senoidal.

```

1 % Modify ta and tb so that the TSP phase at the Nyquist frequency ...
      (i.e. fs/2) is a multiple of pi. (This is necessary to make the ...
      TSP in the time domain a real signal.)
2 ta = round(ta*fs)/fs;
3 tb = round(tb*fs^2/8)*8/fs^2;
4

```

```

5 % Set the FFT length
6 fft_length = pow2(ceil(log2(fs*T)));
7 T = fft_length/fs;
8
9 % Set frequency step and angular frequency values
10 step_f = fs/fft_length;
11 w1 = 2*pi*(0:step_f:(fs/2));
12
13 % Make the magnitude spectrum of the TSP
14 if (bw == fs/2)
15     Mag = ones(1,fft_length);
16     Mag1 = Mag(1:length(w1));
17 else
18     power = 12;
19     Mag1 = exp(-((w1/(2*pi)-(bw/2+bs))/(bw/2)).^power);
20     Mag2 = Mag1(length(w1)-1:-1:2);
21     Mag = [Mag1 Mag2];
22 end
23
24 % Make the group delay spectrum of the TSP
25 group_delay1 = ta + tb*w1/(2*pi);
26 group_delay = [group_delay1, -group_delay1(end-1:-1:2)];
27
28 % Make the phase spectrum of the TSP
29 Ph1 = -(ta + tb*w1/(4*pi)).*w1;
30 Ph = [Ph1 -Ph1(end-1:-1:2)];
31
32 % Make the complex spectrum of the TSP
33 X = Mag.*exp(i*Ph);
34
35 % Make the TSP in the time domain
36 x = real(ifft(X)); % imag(ifft(X))≠0 due to finite numerical precision
37 x = x/max(abs(x))*0.98; % normalization
38
39 % Set time step and time vector
40 step_t = T/fft_length;
41 t = 0:step_t:T-step_t;
42
43 % Write generated signal to file
44 audiowrite('mytsp.wav',x,44100);

```

A.1.3 Geração dos Gráficos de Representação do Sinal

Após a geração do sinal, foram feitos 3 gráficos, para demonstrar a representação do mesmo.

A.1.3.1 Representação do Sinal no Domínio da Frequência

O primeiro, gera um gráfico do sinal no domínio da frequência, mostrando sua magnitude e fase.

```

1 % Plot a figure showing the main characteristics of the TSP generated
2 %
3 clf
4 set(gcf, 'units','normalized','position',[0.4 0.02 0.53 0.88]);
5 subplot(2,2,1)
6 plot(w1(1:ceil(fft_length/256):end) / (2*pi),Mag1(1:ceil(fft_length/256):end));
7 set(gca,'xlim',[0 fs/2], 'xtick',0:round(fs/8):30, ...
8      'ylim',[0 1.25], 'ytick',0:1,...)
9      ' xlabel',text(0,0,'Frequency (kHz)'),...
10     ' ylabel',text(0,0,'Normalized Amplitude'),...
11     ' title',text(0,0,'TSP Magnitude Spectrum'));
12 text(0.1,0.85,['Passband = ...
13      ',num2str(bs,4),'--',num2str(bs+bw,4), 'kHz'],...
14      'units','normalized');
15 subplot(2,2,2)
16 plot(w1(1:ceil(fft_length/256):end) / (2*pi),...
17      group_delay1(1:ceil(fft_length/256):end));
18 set(gca,'xlim',[0 fs/2],...
19      'xtick',0:round(fs/8):30, ...
20      'ylim',[0, group_delay1(end)]*1.2,...)
21      'ytick',0:ceil(group_delay1(end)/2)/2:group_delay1(end),...
22      ' xlabel',text(0,0,'Frequency (kHz)'),...
23      ' ylabel',text(0,0,'Group Delay (ms)'),...
24      ' title',text(0,0,'TSP Group Delay Spectrum'));
25 text(0.1,0.9,['t0 = ',num2str(ta,4), 'ms'],'units','normalized');
25 text(0.1,0.8,['t1 = ',num2str(tb,4), 'ms/kHz'],'units','normalized');
```

A.1.3.2 Representação do Sinal no Domínio do Tempo

O segundo gráfico demonstra o sinal no domínio do tempo, conforme o código:

```

1 subplot(2,1,2)
2 plot(t,x);
3 set(gca,'xlim',[0 T],...
4      'xtick',0:ceil(T/5):T,...)
5      'ylim',[min(x) max(x)]*1.1,...)
6      ' xlabel',text(0,0,'Time (ms)'),...
7      ' ylabel',text(0,0,'Amplitude'),...
8      ' title',text(0,0,'TSP Signal'));
9 end
```

A.1.3.3 Representação do Espectrograma do Sinal

O terceiro gráfico, gera o espectrograma do sinal. O parâmetro 256 usado, faz com que o programa realize o janelamento do sinal, com janelas de comprimento de 256 samples, de modo que a resposta em frequência é calculada para cada janela individualmente. Isso faz com que tenhamos uma boa resolução, visto que as frequências do sinal variam rapidamente no tempo.

```

1 figure(2);
2 spectrogram(x,256,250,'yaxis');
3 set(gca,'FontSize',18);

```

A.2 Análise da Resposta do Ambiente

Para realizarmos as análises e processamentos dos nossos sinais, utilizamos o código signal_analysis.m, que foi dividido nas 10 partes a seguir.

A.2.1 Definição dos Parâmetros Constantes

Nesta parte, definimos os nomes dos arquivos a serem lidos, bem como dos parâmetros que seriam constantes ao longo do programa.

```

1 % Diretorio e arquivos com as respostas gravadas do local
2 dir_name = '../Recorded_Signals/';
3 file_names = ['tsp44-rec1.wav';
4                 'tsp44-rec2.wav';
5                 'tsp44-rec3.wav'];
6
7 % Frequencia de resample desejada em hz
8 fs = 44100;
9
10 % Periodo total de avaliacao da resposta em s
11 T = 1.5;
12
13 % Comprimento do sinal a ser avaliado em numero de samples
14 L = fs * T;
15
16 % Numero de samples da resposta usados para regressao linear (0.5s)
17 n0 = round(fs/2);

```

A.2.2 Leitura do Arquivo e Resposta ao Impulso

Aqui, fazemos a leitura do arquivo definido, e em seguida realizamos a convolução, para chegar à sua resposta ao impulso.

```

1 % Leitura do arquivo
2 [x1,fs1] = audioread([dir_name,file_names(k,:)]);
3
4 % Convolui g(t) com f(-t). Resultado é a resposta ao impulso no ...
5 % dominio do tempo
6 y_lin = conv(x(:,1),flipud(x(:,2)));
7
8 % Magnitude em escala de dB do sinal convoluido
9 y = 20*log10(abs(y_lin));

```

A.2.3 Resposta em Frequência

Neste momento, usamos a FFT para computar a transformada de Fourier do sinal, então manipulamos esse resultado para a forma adequada e então geramos o gráfico do conteúdo de frequência do sinal.

```

1 % Compute the Fourier transform of the signal
2 Y_dft = fft(y_lin);
3
4 % Compute the two-sided spectrum P2. Then compute the single-sided ...
5 % spectrum P1 based on P2 and the even-valued signal length L
6 P2 = abs(Y_dft/L);
7 P1 = P2(1:L/2+1);
8 P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
9
10 % Define the frequency domain f and plot the single-sided amplitude ...
11 % spectrum P1
12 f = fs*(0:(L/2))/L;
13
14 % Plot the result
15 figure(9)
16 plot(f,P1)
17 title('Single-Sided Amplitude Spectrum of X(t)')
18 xlabel('f (Hz)')
19 ylabel('|P1(f)|');

```

A.2.4 Regressão Linear do Decaimento do Sinal

Cálculo da função de primeira ordem (regressão linear), que aproxima o ritmo de decaimento do sinal, após ser descontinuado.

```

1 % Valor maximo de y e indice correspondente a posicao desse valor
2 [y_max,idx_max] = max(y);
3
4 % Coloca a amostra de valor max no indice 1 e seleciona as proximas ...
    T*fs amostras, que correspondem a T segundos
5 y = y(idx_max+(0:T*fs));
6
7 % Vetor de tempo
8 t = (0:(length(y)-1))/fs;
9
10 % Coeficientes do polinomio de regressao linear da resposta temporal ...
    y do ambiente no intervalo de 1 a n0
11 coef = polyfit(t(1:n0)',y(1:n0),1);
12
13 % Polinomio correspondente
14 p = polyval(coef,t);

```

A.2.5 Gráfico do Decaimento do Sinal e de sua Regressão Linear

Nesta seção, geramos o gráfico de decaimento da resposta em frequência do ambiente, no tempo, junto com a reta de regressão linear que aproxima esse decaimento.

```

1 % Figura: Resposta temporal do ambiente considerando todo o espectro
2 figure(2*k-1);
3
4 % Plot de y e p normalizados em relacao a amplitude de p(1)
5 plot(t,y-p(1),'b',t, p-p(1), 'r') ;
6
7 % Parametros do grafico
8 set(gca, 'FontSize',15);
9 axis([0 T -80 20]);
10 title('Resposta Temporal do Ambiente');
11 xlabel('Tempo (s)');
12 ylabel('Amplitude (dB)');
13 legend({'Resposta Temporal Medida','Polinomio ...
    Aproximado'},'Location','northeast');
14 grid on;

```

A.2.6 Valor do RT60 Geral

Aqui, calculamos o valor do RT60.

```

1 % Calcula em qual amostra sao atingidos os 20dB de decaimento
2 n20 = length(t);
3 for m = 1:length(t)
4     if (p(1)-p(m)) ≥ 20
5         n20=m;
6         break;
7     end
8 end
9 % T20
10 T20(k) = t(n20)-t(1);
11 % T60: Multiplica-se o T20 por 3
12 T60(k) = T20(k)*3;
```

A.2.7 Vetor de Frequências de Terço de Oitava

Definição do vetor com as frequências individuais a serem analisadas, representando terços de oitava.

```

1 % Faixas de frequencia a terem sua resposta individual analisada. ...
    Separacao equivalente a tercos de oitava
2 fc = 100*nthroot(2,3).^(0:23);
3 fc = round(fc);
4 fc(24) = 19599;
```

A.2.8 Filtros de Butterworth Utilizados

Nesta seção, definimos os filtros de Butterworth, utilizados para se computar a resposta individual de cada região de frequência.

```

1 for n = 1:length(fc)
2     % Cria os coeficientes de um filtro de butterworth em torno da fc
3     [b(n,:),a(n,:)] = butter(3,fc(n)*[8/9 9/8]/(fs/2));
4
5     % Salva a resposta em frequencia do filtro numa matriz
6     [h(n,:), w(n,:)] = freqz(b(n,:),a(n,:), fc, fs);
7
8     % Plota a resposta em frequencia em dB
9     subplot(6,4,n);
10    semilogx(fc, 20*log10(abs(h(n,:))));
```

```

11     axis([100 20000 -60 0]);
12     title(['fc = ' num2str(fc(n)) ' Hz']);
13     grid on;
14 end

```

A.2.9 Filtragem do Sinal e Avaliação Individual para cada Região de Frequência

Aqui, a resposta ao impulso da sala é filtrada, cada vez em torno de uma frequência F_C , e então, todo o processo de cálculo do RT60 é feito novamente.

```

1 % Filtra o sinal da resposta do ambiente em fc
2 y_lin_fc = filtfilt(b(n,:),a(n,:),y_lin);
3
4 % Passa pra escala de dB
5 y_fc = 20*log10(abs(y_lin_fc));
6
7 % Valor maximo de y e indice correspondente a posicao desse valor
8 [y_fc_max,idx_fc_max] = max(y_fc);
9
10 % Coloca a amostra de valor max no indice 1 e seleciona as proximas ...
    % amostras, que correspondem a T segundos
11 y_fc = y_fc(idx_fc_max+(0:T*fs));
12
13 % Vetor de tempo
14 t = (0:(length(y_fc)-1))/fs;
15
16 % Coeficientes do polinomio que descreve (Aproximadamente) a ...
    % resposta temporal y do ambiente no intervalo de 1 a n0
17 coef_fc = polyfit(t(1:n0)',y_fc(1:n0),1);
18
19 % Polinomio correspondente
20 p_fc = polyval(coef_fc,t);
21
22 % Figura: Resposta temporal do ambiente em cada frequencia fc
23 figure(2*k);
24
25 % Posiciona no subplot de 4x4
26 subplot(6,4,n);
27
28 % Plota a resposta temporal para a frequencia fc em azul e a ...
    % aproximacao polinomial em vermelho
29 plot(t,y_fc-p_fc(1),'b',t,p_fc-p_fc(1),'r');
30
31 % Detalhes do grafico

```

```

32 axis([0 T -80 20]);
33 title(['fc = ' num2str(fc(n)) ' Hz']);
34 grid on;
35
36 % Calcula em qual amostra sao atingidos os 20dB de decaimento
37 n20 = length(t);
38 for m = 1:length(t)
39     if (p_fc(1)-p_fc(m)) ≥ 20
40         n20=m;
41         break;
42     end
43 end
44
45 % T20
46 T20_fc(n, k) = t(n20)-t(1);
47
48 % T60: Multiplica-se o T20 por 3
49 T60_fc(n, k) = T20_fc(n, k)*3;

```

A.2.10 Cálculo e Geração do Gráfico de RT60 Versus Frequência, com Desvio Padrão

Na última parte, fazemos a média e o desvio padrão, das medições feitas no ambiente, e plotamos um gráfico de RT60 e desvio padrão do RT60, em função da frequência.

```

1 % Matriz transposta com os valores de todos RT60 por frequencia para ...
2 % todas as medicoes
3 T60_fc_transp = transpose(T60_fc);
4
5 % Media das medicoes, para cada frequencia
6 T60_fc_mean = mean(T60_fc_transp);
7
8 % Desvio padrao das medicoes, para cada frequencia
9 T60_fc_std = std(T60_fc_transp);
10
11 % Grafico de RT60 e desvio padrao, por frequencia, em eixo logaritmico
12 figure(8);
13 semilogx(fc, T60_fc_mean, 'b', fc, T60_fc_std, 'r');
14
15 % Parametros do grafico
16 set(gca, 'FontSize',15);
17 axis([100 20000 0 max(T60_fc_mean)]);
18 title('RT60 Medio em Funcao da Frequencia');
19 xlabel('Frequencia (Hz)');
20 ylabel('Segundos');

```

```

20 legend({'RT60 Medio','Desvio Padrao'},'Location','northeast');
21 grid on;

```

A.3 Medição do Ruído

```

1 % Source file to evaluate noise level
2 source = dsp.AudioFileReader('Noise_Board.wav');
3 fs = source.SampleRate;
4
5 player = audioDeviceWriter('SampleRate',fs);
6
7 % Oscilloscope vision
8 scope = timescope('SampleRate',fs, ...
9     'TimeSpanOverrunAction','Scroll', ...
10    'TimeSpanSource','Property','TimeSpan',20,'ShowGrid',true, ...
11    'YLimits',[20 80],'AxesScaling','Auto', ...
12    'ShowLegend',true,'BufferLength',4*3*fs, ...
13    'ChannelNames', ...
14    {'Lt_AF','Leq_A','Lpeak_A','Lmax_AF'}, ...
15    'Name','Sound Pressure Level Meter');
16
17 % SPL meter object to make measures
18 SPL = splMeter('TimeWeighting','Fast', ...
19     'FrequencyWeighting','A-weighting', ...
20     'SampleRate',fs, ...
21     'TimeInterval',2);
22
23 % 1 kHz Reference tone to calibrate
24 [test_sig,test_fs] = audioread(['test_tone_1khz.wav']);
25 calibrate(SPL, test_sig, 114);
26
27 % Plot values
28 while ~isDone(source)
29     x = source();
30     player(x);
31     [Lt,Leq,Lpeak,Lmax] = SPL(x);
32     scope([Lt,Leq,Lpeak,Lmax])
33 end
34
35 release(source)
36 release(player)
37 release(SPL)
38 release(scope)

```

A.4 Cálculo dos Modos da Sala

O programa room_modes.m foi feito para calcular previamente, o valor da frequência dos modos ressonantes de cada ambiente, baseado em suas dimensões físicas.

```
1 % Parameter Definition
2 c = 344; % Speed of Sound
3 L = 3; % Room Length
4 W = 2; % Room Width
5 H = 5; % Room Height
6
7 n=1;
8
9 % Calculate modes for wave numbers 1 and 2
10 for p = 0:2
11     for q = 0:2
12         for r = 0:2
13
14             modes(n, 1) = p;
15             modes(n, 2) = q;
16             modes(n, 3) = r;
17             modes(n, 4) = (c/2)*sqrt((p/L)^2 + (q/W)^2 + (r/H)^2);
18
19             n = n+1;
20
21         end
22     end
23 end
24
25 % Remove null rows
26 modes = modes(~all(modes == 0, 2), :);
27
28 % Sort in ascending order, based on frequency
29 modes = sortrows(modes, 4);
```