
**Análise Comparativa de Métodos de Medição
de Parâmetros Acústicos em Salas de Pequeno
Porte**

Calebe Giaculi Júnior



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Belo Horizonte
2017

Calebe Giaculi Júnior

**Análise Comparativa de Métodos de Medição
de Parâmetros Acústicos em Salas de Pequeno
Porte**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Inteligência Computacional

Orientador: Hani Camille Yehia

Belo Horizonte
2017

G429a

Giaculi Júnior, Calebe.

Análise comparativa de métodos de medição de parâmetros acústicos em salas de pequeno porte [manuscrito] / Calebe Giaculi Júnior. - 2017. 105 f., enc.: il.

Orientador: Hani Camille Yehia.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f.103-105.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Acústica - Teses. 3. Testes de emissão acústica - Teses. 4. Ambiente de sala de aula - Teses. I. Yehia, Hani Camille. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

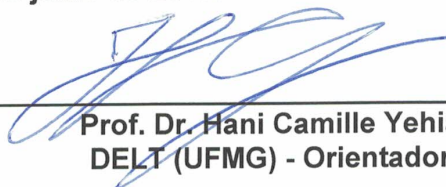
"Análise Comparativa de Métodos de Medição de Parâmetros Acústicos em Salas de Pequeno Porte"

Calebe Giaculi Júnior

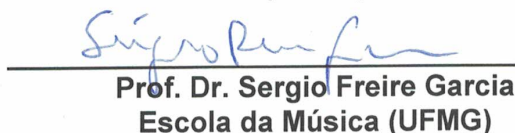
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 13 de julho de 2017.

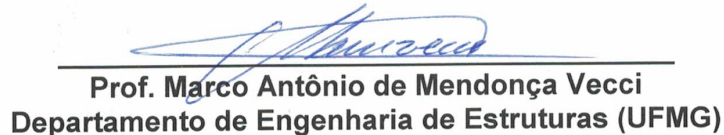
Por:


Prof. Dr. Hani Camille Yehia
DELT (UFMG) - Orientador


Prof. Dr. Maurílio Nunes Vieira
(UFMG)


Prof. Dr. Sergio Freire Garcia
Escola da Música (UFMG)


Prof. Dr. Paulo Medeiros Massarani
Laboratório de Ensaios Acústicos (INMETRO)


Prof. Marco Antônio de Mendonça Vecci
Departamento de Engenharia de Estruturas (UFMG)

Dedico este trabalho à minha família pelo apoio incondicional em todos os passos desta longa caminhada.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus e a Mãe Natureza por ter guiado meus passos e dado proteção nos mais de 50.000 km percorridos para a obtenção deste título.

À minha mãe, meu pai e meus irmãos por me apoiarem moralmente e financeiramente.

À minha namorada, Fernanda, pela paciência, críticas, doses de incentivo e pela companhia nos melhores e piores momentos.

Ao meu orientador, professor Hani, por ter me dado a liberdade na escolha da área a seguir e pela cobrança que tanto elevou o nível do trabalho.

Ao professor Vecci, que não pôde ser oficializado como orientador por questões burocráticas, por ter me despertado o interesse pela área de Acústica, pelas orientações percorrendo os corredores da Escola de Engenharia e por ter cedido parte de seu precioso tempo em inúmeras reuniões.

Agradeço ao ex-professor e amigo, Vicente Carioca, pela parceria nas viagens pela BR-262 e, juntamente com os amigos Eds e Santibas, pela hospedagem durante o primeiro semestre de 2015.

Ao amigo Renato Zanetti por ter compartilhado sua casa durante quase 2 anos.

Ao amigo Renato Nolli pela parceria nas aulas, mestrado e concursos.

Ao amigo Lucas Vilas Boas, aluno de mestrado da Escola de Música, pela companhia em algumas das madrugadas durante a fase dos testes acústicos.

Ao IFMG/Bambuú e ao CEFET-MG/Araxá por cederem parte do meu tempo de trabalho para a realização desta capacitação.

Aos membros da banca, Maurílio Nunes, Sérgio Freire e Paulo Massarani, pelas várias sugestões que tanto contribuíram com esta dissertação.

Agradeço o professor Alexander Mattioli pelo auxílio na compreensão do método de Varredura Exponencial dos Senos e empréstimo de equipamentos. E também ao professor Dimas Palhares pela confiança no empréstimo dos equipamentos da B&K.

Ao funcionário da B&K, Rafael Zocatelli, por ter cedido algumas licenças do Analisador Sonoro 2250 e do software *Dirac 6.0*, essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

E por fim, agradeço aos demais amigos de Araxá pelo companheirismo.

“E sonhos não envelhecem...”
(Milton Nascimento / Lô Borges / Márcio Borges)

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados da análise de parâmetros acústicos para testes realizados em duas salas de aula com dimensões iguais da Escola de Música da UFMG (salas 06 e 08). Apenas a primeira possui tratamento acústico com painéis variáveis. Três situações acústicas foram geradas para estudo: Sala 06 com painéis abertos (pouca reverberação), Sala 06 com painéis fechados e Sala 08 (muita reverberação). Descritores acústicos foram calculados a cada terço de oitava utilizando três métodos de medição: varredura exponencial de senos, estouro do balão e fonte de ruído interrompida. Nas medições, foi utilizada uma fonte omnidirecional (dodecaedro) ou monitor de áudio. Foram utilizadas 3 posições para a fonte e 5 para o microfone afim de comparar a variação causada pelas alteração de tais pontos de medição. Foi possível comparar a influência no cálculo do tempo de reverberação causada pela fonte sonora, pelo método de medição e pelas posições da fonte e do microfone. Para a faixa de frequências entre 100 Hz e 10 kHz, os métodos não apresentaram discrepâncias significativas, o que é uma evidência de todos poderem ser utilizados de forma confiável. Porém para as frequências subgraves, isto é, de 25 Hz a 80 Hz, os métodos exibiram inconsistências elevadas e, frequentemente, o tempo de reverberação não pôde ser calculado a partir de T_{20} . Nessa faixa de frequências, apenas o método da fonte de ruído interrompida apresentou valores dentro do esperado para todas as salas. Uma análise preliminar também foi realizada para o cálculo do tempo de decaimento inicial (EDT), clareza (C_{80}), definição (D_{50}) e tempo central (T_5). Tais descritores foram usados para comparar as diferenças entre o uso do monitor de áudio e do dodecaedro como fonte sonora, sendo que apenas EDT não apresentou qualquer variação com respeito à diretividade da fonte sonora. Por fim, verificou-se que a variabilidade do campo acústico com a posição relativa entre fonte e microfone para o T_{20} é inversamente proporcional à reverberação da sala, medida por meio do desvio padrão relativo (RSD).

Palavras-chave: Acústica Variável. Estouro do Balão. Varredura Exponencial dos Senos. Fonte de Ruído Interrompido. Tempo de Reverberação. Sala de Pequeno Porte.

Abstract

This work presents the results of acoustic parameter analysis for tests performed in two classrooms of equal dimensions at the School of Music of the Universidade Federal de Minas Gerais (rooms 06 and 08). Only one of them has changeable acoustic paneling, which generated 3 types of acoustic conditions: Room 06 with open panels (little reverberation), Room 06 with closed panels and Room 08 (highly reverberated). Acoustic parameters were calculated at intervals of one third of octave using three measurement methods: exponential sine sweep, impulsive source and interrupted noise source. Either an omnidirectional source (dodecahedron) or an audio monitor was used. The source was placed at three positions and the microphone at five measuring positions to analyze the variation caused by changes in positions. From the measurements, it was possible to compare the influence on the calculation of the reverberation time caused by the type of sound source, by the method of measurement, and by the positions of source and microphone. For the frequency range between 100 Hz and 10 kHz, the measurement methods did not present significant discrepancies, which is an evidence that all of them are reliable. However for the subwoofer frequencies, i.e. from 25 Hz to 80 Hz, the methods exhibited large inconsistencies, and often the reverberation time could not be calculated from T_{20} . In this frequency range only the noise interrupted method presented values within the expected range for all rooms. A preliminary analysis was also carried out to calculate early decay time (EDT), clarity (C_{80}), definition (D_{50}) and central time (T_S). These descriptors were used to compare the differences between using an audio monitor e a dodecahedron as sound source. Only EDT did not show any difference with respect to sound source directivity. Finally, it was verified that the variation of the acoustic field with the relative position between source and microphone for T_{20} is inversely proportional to the reverberation of the room, measured by the relative standard deviation (RSD).

Keywords: Variable Acoustics. Impulsive Source. Exponential Sine Sweep. Interrupted Noise. Reverberation Time. Small Room Acoustic.

Lista de ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Diagrama em blocos do modelo acústico de uma sala. | 29 |
| Figura 2 – Densidade Espectral de Potência (<i>Power Spectral Density</i>) (PSD) para um ruído com espectro rosa utilizado para a implementação do método Fonte de Ruído Interrompida (FRI). | 32 |
| Figura 3 – Amplitude da pressão sonora do sinal de ruído rosa aplicado em uma sala longo do tempo: fase inicial ($t < 1$ s), estacionária ($1 \text{ s} < t < 5,8$ s) e de decaimento ($t > 5,8$ s). | 32 |
| Figura 4 – Amplitude em dB do sinal de ruído rosa aplicado em uma sala longo do tempo. | 33 |
| Figura 5 – Amplitude da pressão sonora para o sinal de Estouro do Balão (EB) captado em uma sala com pouca reverberação. | 34 |
| Figura 6 – Espectrograma de um sinal senoidal com frequência variando exponencialmente de 20 Hz até 20 kHz em 10 s. | 36 |
| Figura 7 – Espectro de um sinal senoidal com frequência variando exponencialmente de 20 Hz até 20 kHz em 10 s e de seu filtro utilizado para o cálculo da resposta ao impulso da sala. | 37 |
| Figura 8 – Diagrama de blocos de um modelo real considerando a presença do ruído ambiente ($n(t)$) e da distorção não linear causada pelo alto-falante ($K[\]$). | 37 |
| Figura 9 – Sinal de varredura exponencial na prática, onde é possível observar a distorção não linear causada pelo alto-falante. | 38 |
| Figura 10 – Respostas ao impulso do sistema linear (a partir de 10 s) e as causadas pelas distorções harmônicas (aparecem para $t < 10$ s). | 39 |
| Figura 11 – Respostas ao impulso do sistema linear em dB e as causadas pelas distorções harmônicas. | 40 |
| Figura 12 – Nível de energia em dB da resposta ao impulso filtrada para as bandas de 250 Hz e 1 kHz (azul), suas respectivas Integrais de Schroeder (verde) e atenuação do ruído pelo método de Chu (vermelho). | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 13 – Dimensões em cm das salas 06 e 08. | 48 |
| Figura 14 – Painel acústico de parede com suas aletas abertas. | 49 |
| Figura 15 – Painel acústico de teto com suas aletas abertas. | 49 |
| Figura 16 – Módulo de armadilha de grave à direita. | 50 |
| Figura 17 – Fontes Sonoras Utilizadas: Monitor de Áudio à esquerda e Dodecaedro à direita. | 51 |
| Figura 18 – Resposta em frequência em terço de oitava para o Dodecaedro com o amplificador 2734 utilizando como sinal sonoro o gerador de ruído rosa do próprio equipamento. | 51 |
| Figura 19 – Resposta Direcional para o plano horizontal medida para as bandas de 1, 2, 4 e 8 kHz. Não há desvio significativo para frequências abaixo de 1 kHz. | 52 |
| Figura 20 – Resposta em Frequência do Analisador Sonoro B&K 2250 com o microfone B&K 4189. | 53 |
| Figura 21 – Resposta Direcional do analisador sonoro 2250. | 54 |
| Figura 22 – Resposta em Frequência do microfone ECM8000. | 55 |
| Figura 23 – Resposta Direcional do microfone ECM8000. | 55 |
| Figura 24 – Pontos de posicionamento das fontes sonoras. | 57 |
| Figura 25 – Pontos de posicionamento dos microfones. | 57 |
| Figura 26 – Pontos de posicionamento das fontes e dos microfones. | 58 |
| Figura 27 – Diagrama em Blocos dos equipamentos e <i>softwares</i> utilizados para implementação do método de Estouro do Balão. | 58 |
| Figura 28 – Diagrama em Blocos dos equipamentos e <i>softwares</i> utilizados para implementação do método de Fonte de Ruído Interrompida. | 59 |
| Figura 29 – Diagrama em Blocos dos equipamentos e <i>softwares</i> utilizados para implementação do método de Varredura Exponencial dos Senos. | 61 |
| Figura 30 – Resultado da variação do método de medição para a Sala 06 com painéis fechados. | 64 |
| Figura 31 – Resultado da variação do método de medição para a Sala 06 com painéis abertos. | 65 |
| Figura 32 – Resultado da variação do método de medição para a Sala 08. | 66 |
| Figura 33 – Resultado da variação do tipo de fonte sonora (Dodecaedro e Monitor de Áudio) para a Sala 06 com painéis fechados. | 67 |
| Figura 34 – Resultado da variação do tipo de fonte sonora (Dodecaedro e Monitor de Áudio) para a Sala 06 com painéis abertos. | 68 |
| Figura 35 – Resultado da variação do tipo de fonte sonora (Dodecaedro e Monitor de Áudio) para a Sala 08. | 68 |
| Figura 36 – Resultado da variação da posição do microfone (<i>M1</i> até <i>M5</i>) para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF). | 69 |

| | |
|--|----|
| Figura 37 – Resultado da variação da posição do microfone ($M1$ até $M5$) para a Sala 06 com Painéis Abertos (06PA). | 70 |
| Figura 38 – Resultado da variação da posição do microfone ($M1$ até $M5$) para a Sala 08 (08). | 71 |
| Figura 39 – Resultado da variação da posição do dodecaedro ($F1$ até $F3$) para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF). | 71 |
| Figura 40 – Resultado da variação da posição do dodecaedro ($F1$ até $F3$) para a Sala 06 com Painéis Abertos (06PA). | 72 |
| Figura 41 – Resultado da variação da posição do dodecaedro ($F1$ até $F3$) para a Sala 08. | 73 |
| Figura 42 – Tempo de reverberação médio para os 3 tipos de sala calculado a partir do método Varredura Exponencial dos Senos (VES) (Sala 06 com Painéis Abertos (06PA), Sala 06 com Painéis Fechados (06PF) e Sala 08 (08)). | 74 |
| Figura 43 – Tempo de reverberação médio dos 3 métodos de medição para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF). | 76 |
| Figura 44 – Tempo de reverberação médio dos 3 métodos de medição para a Sala 06 com Painéis Abertos (06PA). | 78 |
| Figura 45 – Tempo de reverberação médio dos 3 métodos de medição para a Sala 08. | 79 |
| Figura 46 – Tempo de reverberação médio para o Monitor de Áudio e o Dodecaedro utilizando o método VES para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF). | 80 |
| Figura 47 – Tempo de reverberação médio para o Monitor de Áudio e o Dodecaedro utilizando o método VES para a Sala 06 com Painéis Abertos (06PA). | 80 |
| Figura 48 – Tempo de reverberação médio para o Monitor de Áudio e o Dodecaedro utilizando o método VES para a Sala 08 | 81 |
| Figura 49 – Desvio padrão calculado a partir da variação da posição do microfone para os 3 tipos de sala utilizando o dodecaedro posicionado em $F1$ para o método VES. | 82 |
| Figura 50 – Desvio padrão relativo calculado a partir da variação da posição do microfone para os 3 tipos de sala utilizando o dodecaedro posicionado em $F1$ para o método VES. | 83 |
| Figura 51 – Desvio padrão relativo do tempo de reverberação para os 3 tipos de sala. | 83 |
| Figura 52 – Comparação entre o Tempo de Decaimento Inicial (EDT) medido com o Dodecaedro e o Monitor posicionados em $F1$ e o microfone em $M1$ para a Sala 06PF utilizando o VES. | 86 |
| Figura 53 – Comparação entre a Clareza (C_{80}) medida com o Dodecaedro e o Monitor posicionados em $F1$ e o microfone em $M1$ para a Sala 06PF utilizando o VES. | 87 |

| | |
|---|----|
| Figura 54 – Comparação entre a Definição (D_{50}) medida com o Dodecaedro e o Monitor posicionados em $F1$ e o microfone em $M1$ para a Sala 06PF utilizando o VES. | 88 |
| Figura 55 – Comparação entre o Tempo Central (T_S) medido com o Dodecaedro e o Monitor posicionados em $F1$ e o microfone em $M1$ para a Sala 06PF utilizando o VES. | 89 |
| Figura 56 – Resultado da variação no cálculo de T_{20} para 2 medições realizadas no ponto $F1$ e $M1$ com o método Varredura Exponencial dos Senos (VES) na Sala 06PF utilizando o Monitor de Áudio. | 92 |
| Figura 57 – Resultado da variação no cálculo de T_{20} para 10 medições realizadas no ponto $F1$ e $M1$ com o método Estouro do Balão (EB) na Sala 06PF. | 93 |
| Figura 58 – Resultado da variação no cálculo de T_{20} para 10 medições realizadas no ponto $F1$ e $M1$ com o método Fonte de Ruído Interrompida (FRI) na Sala 06PF utilizando o Dodecaedro. | 93 |
| Figura 59 – Comparação entre o Desvio Padrão Relativo (RSD) de 10 medições realizadas no ponto $F1$ e $M1$ para os métodos Estouro do Balão (EB) e Fonte de Ruído Interrompida (FRI). | 94 |
| Figura 60 – Exemplo de valor não medido para o terço de oitava de 200 Hz do método VES com o Dodecaedro para o ponto $M1-F1$ na Sala 06PF. | 95 |
| Figura 61 – Comparação entre os espectros do sinal VES do Dodecaedro, do Monitor e do ruído ambiente para as medições do ponto $M1-F1$ na Sala 06PF. | 96 |
| Figura 62 – Região subgrave para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF). | 97 |
| Figura 63 – Região subgrave para a Sala 06 com Painéis Abertos (06PA). | 97 |
| Figura 64 – Região subgrave para a Sala 08. | 97 |
| Figura 65 – Comparação entre os espectros do sinal do EB e do ruído ambiente para as medições do ponto $M1-F1$ na Sala 06PF. | 98 |
| Figura 66 – Comparação entre os espectros do sinal do FRI e do ruído ambiente para as medições do ponto $M1-F1$ na Sala 06PF. | 99 |
| Figura 67 – Comparação entre os espectros do sinal VES e dos ruídos ambiente para as medições do ponto $M1-F1$ nas salas 06PF e 08. | 99 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Dimensões e volume das salas 06 e 08. | 48 |
| Tabela 2 – Distância mínima (m) entre as posições de fonte e de microfone para as salas Sala 06 com Painéis Abertos (06PA), Sala 06 com Painéis Abertos (06PA) e Sala 08 (08). | 56 |
| Tabela 3 – Lista de materiais e equipamentos utilizados para a implementação dos métodos Varredura Exponencial dos Senos (VES), Estouro do Balão (EB) e Fonte de Ruído Interrompida (FRI) | 62 |
| Tabela 4 – Valores médios para o tempo de reverberação (s) por região do espectro para os 3 tipos de sala (B - graves, M - médias, T - agudas e A - global). 75 | 75 |
| Tabela 5 – Valores para as frequências de Schroeder (Hz) de cada sala. | 75 |
| Tabela 6 – Valores médios para o tempo de reverberação (s) por região do espectro para os métodos FRI e EB e seus respectivos erros relativos (Erro Relativo (Er)) em comparação com os do VES para a Sala 06PF (B - graves, M - médias, T - agudas e A - global). | 77 |
| Tabela 7 – Valores médios para o tempo de reverberação (s) por região do espectro para os métodos FRI e EB e seus respectivos erros relativos (Er) em comparação com os do VES para a Sala 06PA (B - graves, M - médias, T - agudas e A - global). | 77 |
| Tabela 8 – Valores médios para o tempo de reverberação (s) por região do espectro para os métodos FRI e EB e seus respectivos erros relativos (Er) em comparação com os do VES para a Sala 08 (B - graves, M - médias, T - agudas e A - global). | 79 |
| Tabela 9 – Valores de Erro Relativo (Er) por região do espectro para as medições utilizando o método VES com o Monitor em comparação com o Dodecaedro para os 3 tipos de salas (B - graves, M - médias, T - agudas e A - global). | 81 |

Lista de siglas

DAW *Digital Audio Workstation*

PSD Densidade Espectral de Potência (*Power Spectral Density*)

Er Erro Relativo

EB Estouro do Balão

FRI Fonte de Ruído Interrompida

PA Parâmetros Acústicos

RI Resposta ao Impulso

RIS Resposta ao Impulso da Sala

RSD Desvio Padrão Relativo

06PA Sala 06 com Painéis Abertos

06PF Sala 06 com Painéis Fechados

08 Sala 08

SNR Relação Sinal Ruído (*Signal to Noise Ratio*)

SLIT Sistema Linear Invariante no Tempo

RT Tempo de Reverberação

UFMG Universidade Federal de Minas Gerais

VES Varredura Exponencial dos Senos

Sumário

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 25 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 29 |
| 2.1 | Modelo Acústico de uma Sala | 29 |
| 2.2 | Procedimentos para Cálculo de Parâmetros Acústicos | 30 |
| 2.2.1 | Fonte de Ruído Interrompida (FRI) | 31 |
| 2.2.2 | Métodos Baseados na Resposta ao Impulso | 33 |
| 2.2.3 | Cálculo de Parâmetros Acústicos a Partir da Resposta ao Impulso da Sala (RIS) | 39 |
| 2.2.4 | Definição - D_{50} e D_{80} | 43 |
| 2.2.5 | Frequência de Schroeder | 44 |
| 2.3 | Cálculos dos Valores Médios e Dispersão de Parâmetros Acústicos | 45 |
| 3 | METODOLOGIA | 47 |
| 3.1 | Descrição das Salas | 47 |
| 3.1.1 | Dimensões da Sala | 47 |
| 3.1.2 | Tratamento e Controle Acústico da Sala 06 | 48 |
| 3.2 | Configurações Acústicas | 49 |
| 3.3 | Tipos de Equipamentos de Reprodução Sonora | 50 |
| 3.4 | Tipos de Equipamentos de Captação Sonora | 52 |
| 3.5 | Determinação dos Pontos de Medição | 53 |
| 3.6 | Implementação dos Métodos de Medição de Parâmetros Acústicos | 56 |
| 3.6.1 | Estouro do Balão | 56 |
| 3.6.2 | Fonte de Ruído Interrompida (FRI) | 58 |
| 3.6.3 | Varredura Exponencial dos Senos (VES) | 59 |
| 3.7 | Divisão do Espectro em Regiões | 60 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.8 | Lista de Materiais e Equipamentos | 60 |
| 4 | RESULTADOS: TEMPO DE REVERBERAÇÃO | 63 |
| 4.1 | Comparação entre os métodos de medição | 64 |
| 4.2 | Comparação entre os equipamentos de reprodução sonora | 66 |
| 4.3 | Comparação entre as posições de receptor | 69 |
| 4.4 | Comparação entre as posições de fonte | 70 |
| 4.5 | Tempo de Reverberação Médio | 73 |
| 4.5.1 | Tempo de Reverberação Médio por Região do Espectro | 74 |
| 4.5.2 | Cálculo da Frequência de Schroeder | 75 |
| 4.5.3 | Comparação Entre os Valores Médios de T_{20} Para os 3 Métodos de Medição | 76 |
| 4.5.4 | Comparação Entre os Valores Médios de T_{20} Para os Tipos de Equipamentos de Reprodução Sonora | 78 |
| 4.6 | Análise da Variabilidade do Cálculo do Tempo de Reverberação em Função da Posição da Fonte e do Receptor | 81 |
| 5 | RESULTADOS: OUTROS PARÂMETROS ACÚSTICOS | 85 |
| 5.1 | Tempo de Decaimento Inicial - EDT | 85 |
| 5.2 | Clareza - C_{80} | 86 |
| 5.3 | Definição - D_{50} | 87 |
| 5.4 | Tempo Central - T_S | 88 |
| 6 | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 91 |
| 6.1 | Variação em um Ponto de Medição Para os Métodos VES, FRI e EB | 91 |
| 6.2 | Problemas Durante as Medições ou Valores Não Medidos | 94 |
| 6.3 | Região Subgrave do Espectro | 96 |
| 7 | CONCLUSÃO | 101 |
| | REFERÊNCIAS | 103 |

Introdução

Acústica de salas é uma área interdisciplinar que envolve conceitos que vão além da engenharia, como das áreas de arquitetura e música. Durante o último século foram identificados diversos parâmetros acústicos que são relacionados com a impressão de qualidade acústica de um ouvinte (VORLÄNDER, 2011), o que tem impulsionado a busca por parâmetros e métodos capazes de descrever de forma robusta a impressão subjetiva da qualidade acústica.

O estudo de descritores acústicos iniciou-se a partir do trabalho realizado por Sabine (1922), o qual foi demandado a partir de problemas acústicos na sala de aula do Museu Fogg Art, localizado na Universidade de Harvard. Nesse trabalho, é apresentada a famosa relação empírica entre Tempo de Reverberação (RT), volume e absorção.

Após algumas décadas de estudos, foi identificado que nem sempre salas com o mesmo RT possuem características acústicas parecidas (SKÅLEVIK, 2010), alimentando a busca por novos parâmetros. A partir dos anos 1950 diversas pesquisas foram realizadas a partir da observação da Resposta ao Impulso da Sala (RIS), dando início aos estudos que relacionaram parâmetros objetivos calculados a partir da RIS aos aspectos subjetivos (VORLÄNDER, 2011).

Esses parâmetros acústicos podem ser utilizados para relacionar a qualidade acústica de salas destinadas a música clássica (Hidaka e Beranek (2000), Beranek (2003) e Schroeder, Gottlob e Siebrasse (1974)), para música popular e rock (ADELMAN-LARSEN; THOMPSON; GADE, 2010), assim como para classificar a inteligibilidade da fala (BRADLEY; REICH; NORCROSS, 1999). Como grande parte destes descritores acústicos são obtidos a partir da RIS, diversos métodos capazes de calculá-la foram desenvolvidos ao longo dos anos, o que foi aprimorado e diversificado com o aumento da capacidade de processamento dos computadores (VORLÄNDER, 2011).

Os métodos utilizados para o cálculo da resposta impulsiva da sala vão desde os métodos clássicos, como o de Fonte de Ruído Interrompida (FRI) e o de fonte impulsiva, até métodos mais modernos como o de Varredura Exponencial dos Senos (VES), o qual foi descrito inicialmente por Farina (2000). O método FRI não realiza o cálculo de parâmetros

acústicos a partir da Resposta ao Impulso da Sala (RIS) e possui a desvantagem de que, para um sistema ergódico, ser necessária a medição de infinitos decaimentos para que se encontre uma curva de decaimento igual à obtida pelo processo da integração reversa da resposta ao impulso (SCHROEDER, 1965).

Diversos trabalhos comparando esses métodos são encontrados na literatura. Vorländer e Bietz (1994) compararam os métodos de Fonte Impulsiva, FRI e MLS (*Maximum Length Sequence*), e os principais resultados são: estes métodos podem ser utilizados de forma confiável desde que haja um nível de sinal de 10 dB acima do ruído ambiente; são necessárias medições de 3 a 5 decaimentos pelo método de FRI para que se tenha uma repetibilidade comparada a dos métodos de integração da RIS; o método MLS é o mais poderoso entre os abordados.

Guy-Bart, Jean-Jacques e Dominique (2002) compararam dois métodos que utilizam ruído branco pseudo-aleatório, MLS e IRS (*Inverse Repeated Sequence*), com outros dois que utilizam varredura de senos, TSP (*Time-Stretched Pulses*) e VES, sendo este último considerado o melhor dentre eles por eliminar completamente as distorções harmônicas do alto-falante, dispensar múltiplas medições, possuir a melhor Relação Sinal Ruído (*Signal to Noise Ratio*) (SNR) e dispensar a calibração para obter bons resultados.

Müller e Massarani (2001) aprofundaram o estudo dos procedimentos que utilizam a varredura de senos, assim como o TSP e o VES, os quais se mostraram mais vantajosos na comparação com o MLS.

No estudo apresentado pela empresa AJA (2004), são utilizados os métodos de medição de varredura dos senos, fonte impulsiva e MLS para a comparação de diversos equipamentos de reprodução e captação sonora para uma sala pequena e uma grande, e as principais conclusões foram: em ambas as salas não houve diferenças para os valores de RT medidos a partir de T_{30} e T_{20} ; o desvio padrão no cálculo de valores para o RT foi maior para a sala pequena; o tipo de diretividade da fonte não influenciou de forma significativa nos valores de RT.

Esses estudos foram realizados para salas de pequeno ou grande porte, porém até o presente momento, não foi encontrado na literatura um estudo comparativo entre os procedimentos para cálculos de parâmetros acústicos realizado em um sala com acústica variável, sendo esta a principal motivação deste trabalho.

Outro ponto que alimentou o interesse na realização do presente trabalho é que parâmetros acústicos, como o RT, podem influenciar outras análises, como no cálculo de isolamento em edificações, onde a medição do tempo de reverberação pode impactar de forma significativa o resultado final.

Assim, o objetivo desta dissertação de mestrado é a realização de uma análise comparativa dos procedimentos de medição de tempo de reverberação e de outros parâmetros acústicos em uma sala de pequeno porte com característica acústica variável.

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa dos principais métodos, equipamentos e softwa-

res¹ utilizados para o cálculo de parâmetros acústicos, e optou-se pela utilização do método que utiliza o estouro do balão como fonte impulsiva, por ser o mais tradicional, o de Varredura Exponencial dos Senos (VES), considerado na literatura como o mais robusto (GUY-BART; JEAN-JACQUES; DOMINIQUE, 2002) e o de Fonte de Ruído Interrompida (FRI), como alternativa aos que utilizam a obtenção da resposta ao impulso.

O Analisador Sonoro B&K 2250 foi utilizado para a implementação do Estouro do Balão (EB) e do FRI, sendo que neste último foram utilizadas como fonte sonora uma caixa acústica omnidirecional e o monitor de áudio. Essas fontes também foram comparadas para o método VES, o qual teve seus sinais gerados pelo programa Aurora (CAMPANINI; FARINA, 2009), e para o cálculo dos parâmetros foi utilizado o programa Dirac 6.0. Ambos os métodos foram analisados em terços de oitava. Como objetos de estudos foram utilizadas as salas de aula 06 e 08 da Escola de Música da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Essas salas possuem as mesmas dimensões, porém uma delas (06) é dotada de painéis de controle acústico, chegando assim a 3 situações acústicas: Sala 06 com Painéis Abertos (06PA), Sala 06 com Painéis Fechados (06PF) e Sala 08 (08). Em cada uma delas foram realizadas medições para 3 pontos de fonte e 5 de microfones, a fim de obter informação detalhada para o campo acústico no interior destas salas.

Dessa forma, foi possível comparar em uma situação com acústica variável os impactos no cálculo do Tempo de Reverberação (RT) com a variação do tipo do procedimento de medição, de equipamento de reprodução sonora, posição de fonte e posição de receptor. Posteriormente, calculou-se o tempo de reverberação médio para cada sala e uma análise comparativa entre os métodos EB e FRI, tendo como referência o Varredura Exponencial dos Senos (VES).

Em seguida, realizou-se uma análise inicial da influência da diretividade da fonte sonora em uma posição de fonte e receptor para os parâmetros de Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e Tempo Central (T_S).

Na etapa de análise dos resultados, verificou-se que o método Varredura Exponencial dos Senos (VES) dispensa a medição de múltiplas varreduras para o mesmo ponto, o que não acontece para o EB, e principalmente para o FRI, onde foi identificada uma alta variabilidade para múltiplos decaimentos realizados no mesmo ponto de medição, o que é mais crítico para a região de frequências grave.

Para a região subgrave do espectro, isto é, de 25 Hz até 80 Hz, o método EB não apresentou resultados para alguns terços de oitava para ambas as salas, e o VES apresentou problemas apenas para a sala mais reverberante (08). Para esta faixa de frequências, o método Fonte de Ruído Interrompida (FRI) apresentou os melhores resultados, pois foi identificada uma maior Relação Sinal Ruído (*Signal to Noise Ratio*) (SNR) em comparação com os demais.

¹ Lista com softwares de análise acústica: <http://www.catt.se/meas_soft.htm>. Acesso em: 30/5/2017

Esta dissertação apresenta os fundamentos teóricos para a implementação dos métodos de cálculo de parâmetros acústicos no Capítulo 2. A seguir, no Capítulo 3, são apresentadas as salas medidas, os equipamentos de reprodução e captação sonora, e os procedimentos, equipamentos e softwares utilizados para a implementação dos métodos EB, VES e FRI.

Uma extensa e detalhada gama de resultados para a comparação no cálculo do RT em uma situação de acústica variável causadas pelos diferentes métodos de medição utilizados, pelo tipo de fonte sonora e pela variação na posição do microfone e da fonte é apresentada no Capítulo 4, o qual também apresenta os valores médios para cada sala e a análise da variabilidade com relação à alteração na posição da fonte e receptor.

Posteriormente, são apresentados, no Capítulo 5, os resultados de uma análise inicial da comparação entre a utilização do Dodecaedro ou do Monitor de Áudio no cálculo dos parâmetros de Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Claridade (C_{80}), Definição (D_{50}) e Tempo Central(T_S).

A análise dos resultados é apresentada no Capítulo 6, onde é avaliada a repetibilidade de cada método, os problemas encontrados durante a fase de testes acústicos e alguns resultados iniciais para a região subgrave do espectro.

Por último, as conclusões e trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 7.

Fundamentação Teórica

2.1 Modelo Acústico de uma Sala

Criar um modelo acústico capaz de descrever todos os fenômenos sonoros que ocorrem em uma sala é uma tarefa muito complicada. Porém, nos dias atuais, a resposta acústica de uma sala (RIS) é aceita como um modelo físico-matemático (FARINA, 2007b) que é capaz de representar suas características sonoras. A RIS funciona como uma espécie de impressão digital, tendo em vista que cada sala tem sua própria reverberação.

A RIS é obtida para um ponto considerando que a sala é um Sistema Linear Invariante no Tempo (SLIT), podendo assim ser representada de acordo com a Figura 1.

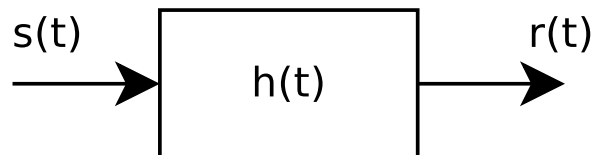


Figura 1 – Diagrama em blocos do modelo acústico de uma sala.

onde:

t é o tempo (s),

$s(t)$ é o sinal sonoro,

$h(t)$ é a resposta ao impulso da sala,

$r(t)$ é o sinal sonoro reverberado.

De acordo com Oppenheim e Willsky (2010), a resposta do sistema representado pela Figura 1 pode ser calculada de acordo com a integral de convolução, representada na Equação 1.

$$r(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau)h(t - \tau)d\tau. \quad (1)$$

A Equação 1 também pode ser representada simbolicamente pelo operador de convolução (*), sendo expressa de acordo com a Equação 2.

$$r(t) = h(t) * s(t). \quad (2)$$

Uma forma alternativa de se relacionar o sinal sonoro, a resposta da sala e o sinal reverberado é utilizando a Transformada de Fourier em ambos os lados das equações 1 ou 2, o que nos leva a Equação 3.

$$R(j\omega) = H(j\omega)S(j\omega), \quad (3)$$

onde:

$$j = \sqrt{-1},$$

$\omega = 2\pi f$ é a frequência angular (rad/s),

f é frequência (Hz).

A Transformada de Fourier leva um sinal no domínio do tempo contínuo para o domínio da frequência, podendo ser calculada de acordo com a Equação 4 para um sinal $s(t)$. O processo reverso pode ser realizado pela Equação 5, a qual é denominada Transformada Inversa de Fourier:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (4)$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(j\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (5)$$

Através da RIS podemos calcular diversos descritores acústicos, como o tempo de reverberação (T_{60}) e a clareza (C_{80}). Além disso, é possível simular a reverberação desse ambiente utilizando a convolução do sinal de entrada com a RIS de acordo com o exposto nas equações 2 e 3. Tal classe de simulação de reverberação é conhecida como *reverb de convolução* e têm o poder de criar uma impressão mais real de como um som gravado sem reverberação soaria em tal ambiente. Dessa forma, é evidente que a medição da resposta ao impulso é uma das mais importantes tarefas na análise acústica de salas (KUTTRUFF, 2000).

2.2 Procedimentos para Cálculo de Parâmetros Acústicos

Ao longo do tempo, diversos procedimentos para cálculo de parâmetros acústicos foram desenvolvidos e a grande maioria deles baseia-se na obtenção de parâmetros a partir da identificação da Resposta ao Impulso da Sala (RIS), assim como o método do Estouro do Balão (EB) e o de Varredura Exponencial dos Senos (VES). O método Fonte de Ruído Interrompida (FRI), por não utilizar este procedimento para cálculo será abordado separadamente.

2.2.1 Fonte de Ruído Interrompida (FRI)

O método que utiliza a Fonte de Ruído Interrompida (FRI) para realizar a medição de alguns dos parâmetros acústicos é o mais tradicional, fazendo parte de uma classe singular dentre outros procedimentos, pois em nenhuma etapa do cálculo chega a medir a Resposta ao Impulso da Sala (RIS). Nesse procedimento, o ruído sonoro deve excitar o campo acústico da sala por um tempo até que se possa obter o estado estacionário (BRANDAO, 2016) e, como o nome diz, posteriormente o sinal é interrompido bruscamente, sendo gravada a curva de decaimento a fim de se calcular alguns descritores como o Tempo de Reverberação (RT).

A norma ISO3382-2:2008 aborda esse método estabelecendo os requisitos para sua implementação. Dentre os principais estão a necessidade do sinal sonoro possuir uma faixa de frequências maior ou igual à que se pretende medir, a emissão do nível de pressão sonora deve ser suficiente para se medir o decaimento desejado, o espectro do ruído com uma característica razoavelmente plana ou de ruído rosa, o som interrompido de forma aleatória não podendo utilizar de uma sequência repetida na medição de vários decaimentos e, por último, o sinal enviado para as caixas acústicas gerado a partir de um ruído aleatório ou pseudo-aleatório.

Um sinal aleatório é aquele cujos valores no tempo não dependem uns dos outros, e o pseudo-aleatório é um sinal determinístico que possui algumas características próximas às dos sinais aleatórios (AGUIRRE, 2007).

Segundo NOCETI FILHO, o ruído branco possui uma Densidade Espectral de Potência (*Power Spectral Density*) (PSD) constante, e o rosa se difere nesta característica, possuindo uma PSD proporcional a $1/f$, o que gera um espectro com um decaimento de -3 dB por oitava. A Figura 2 representa a análise espectral de um ruído rosa gerado pelo Analisador Sonoro B&K 2250 utilizado na implementação do método FRI, cujos resultados são apresentados nos capítulos 4, 5 e 6. Verificou-se que o sinal possui uma intensidade de -5.2 dB na frequência de 199.2 Hz e de -8.2 dB na frequência de 398,4 Hz, conferindo assim um decaimento de -3 dB em uma oitava.

O sinal representado na Figura 2 é aplicado à sala em que se deseja realizar a medição. A seguir, o som é gravado para a análise de seu decaimento. De acordo com Brandao (2016) o sinal aplicado na sala é composto pelo ataque, estado estacionário e decaimento, os quais podem ser identificados no gráfico da pressão sonora ao longo do tempo para o sinal de FRI representado na Figura 3 respectivamente para os tempos $t < 1$ s, 1 s $< t < 5$, 8s e $t > 5$, 8s.

A Figura 4 mostra a amplitude da pressão sonora em dB, onde fica evidente o decaimento a partir do tempo de 5, 8 s. Nessa figura, observa-se que o sinal sonoro aplicado teve uma amplitude de aproximadamente 60 dB acima do ruído ambiente, o qual predomina antes de 0, 5 s e a partir de 8 s.

O próximo passo na implementação do método de FRI é filtrar o sinal para que se

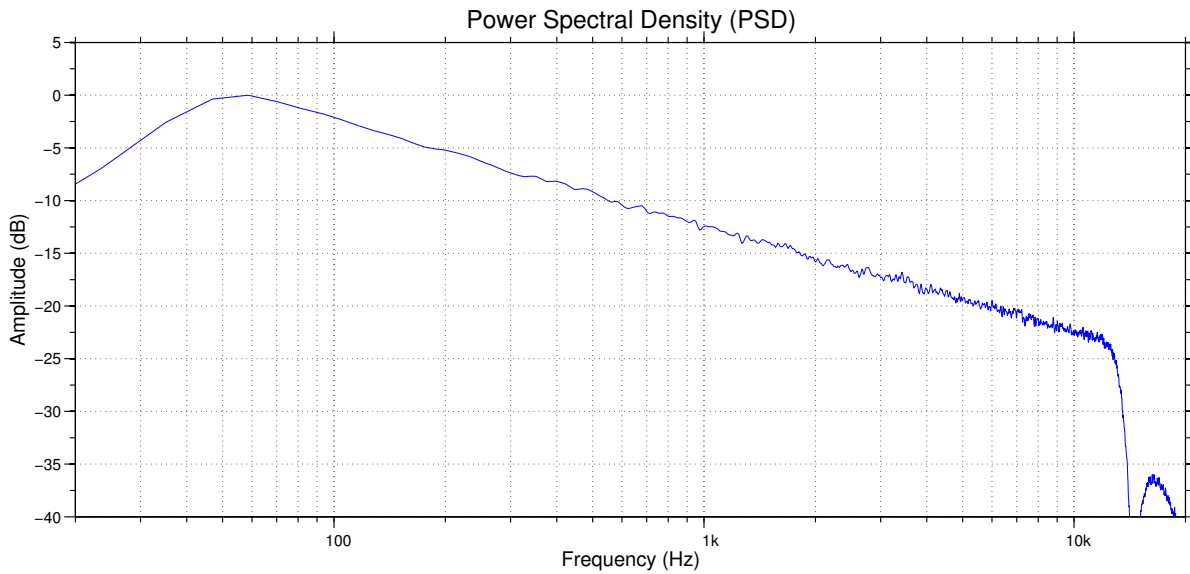


Figura 2 – Densidade Espectral de Potência (*Power Spectral Density*) (PSD) para um ruído com espectro rosa utilizado para a implementação do método FRI.

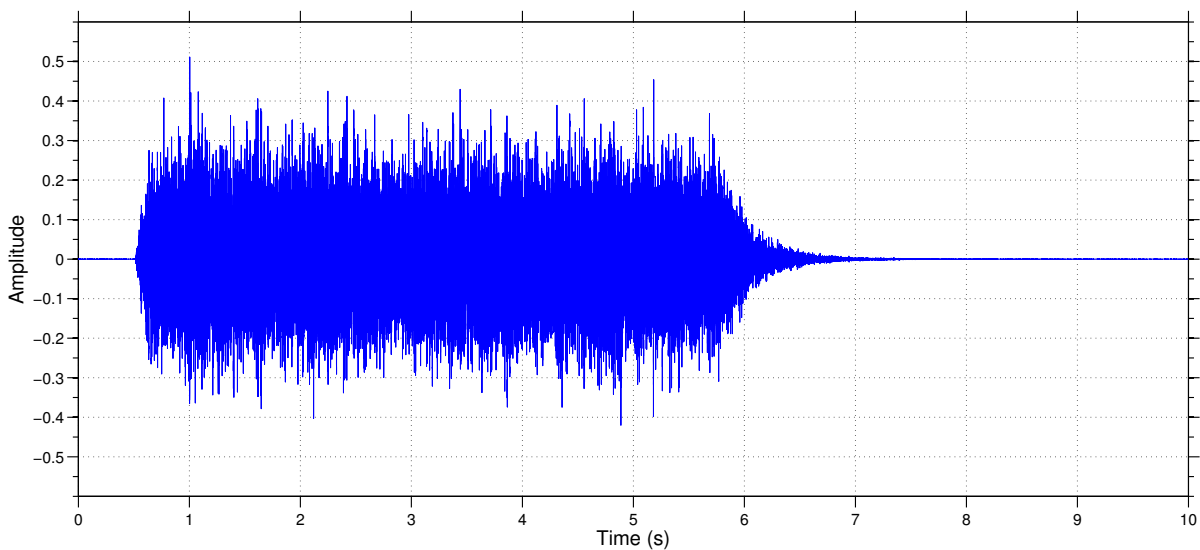


Figura 3 – Amplitude da pressão sonora do sinal de ruído rosa aplicado em uma sala longo do tempo: fase inicial ($t < 1$ s), estacionária ($1 \text{ s} < t < 5,8 \text{ s}$) e de decaimento ($t > 5,8 \text{ s}$).

possa calcular o descritor acústico desejado em cada banda de frequência. Essa etapa é composta por um banco de filtros com largura de banda usualmente de uma oitava ou de um terço de oitava (BRANDAO, 2016).

Como a queda da pressão sonora em dB nem sempre possui uma forma perfeitamente linear, pode ser realizado um procedimento de regressão linear para se medir o decaimento em cada faixa de frequências desejada (ISO3382-2:2008, 2008).

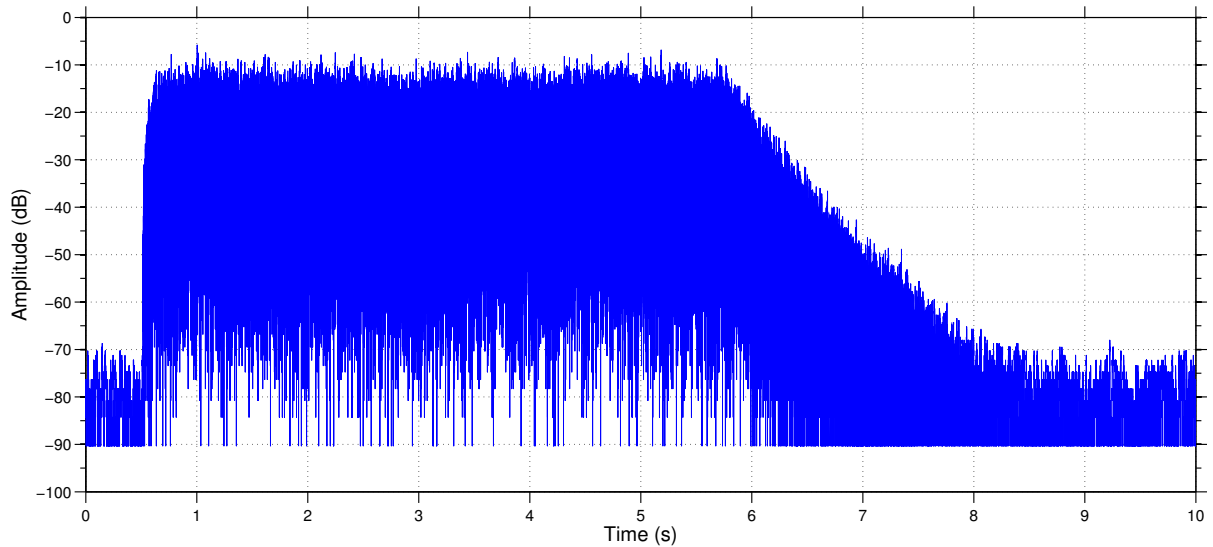


Figura 4 – Amplitude em dB do sinal de ruído rosa aplicado em uma sala longo do tempo.

A Subseção 3.6.2 detalha os programas e equipamentos utilizados neste trabalho para a implementação do método de Fonte de Ruído Interrompida (FRI).

2.2.2 Métodos Baseados na Resposta ao Impulso

Ao longo do tempo diversos procedimentos foram desenvolvidos com o objetivo de capturar a RIS. Como exemplos podemos citar:

- ❑ Fonte Impulsiva
- ❑ *MLS (Maximum Length Sequence)*
- ❑ *TDS (Time Delay Spectrometry)*
- ❑ Varredura Exponencial dos Senos (VES)

A seguir, são apresentados os fundamentos teóricos do método de Fonte Impulsiva, considerando como fonte sonora o Estouro do Balão (EB) e do método de Varredura Exponencial dos Senos (VES). Uma descrição completa dos métodos *MLS (Maximum Length Sequence)* e *TDS (Time Delay Spectrometry)* pode ser encontrada em Farina (2007b), porém tais métodos não foram utilizados neste trabalho.

2.2.2.1 Estouro do Balão (EB)

A Resposta ao Impulso da Sala (RIS) é a saída de um sistema igual ao representado pela Figura 1 quando a entrada é uma função de Delta de Dirac ($\delta(t)$)¹. Como esse sinal

¹ A função Delta de Dirac, também conhecida como impulso unitário, possui uma duração infinitesimal e área igual a 1 (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010)

sonoro não pode ser obtido na prática, fontes impulsivas como o estouro de balão e o disparo de uma pistola podem ser consideradas aproximações aceitáveis para uma certa faixa de frequências (VORLÄNDER; BIETZ, 1994).

A partir dessas considerações, podemos reescrever a Equação 2 da seguinte forma:

$$\text{considerando } s(t) = \delta(t), \quad (6)$$

$$\text{temos que } r(t) = \delta(t) * h(t), \quad (7)$$

$$\text{logo } r(t) = h(t). \quad (8)$$

Assim, a medição da RIS a partir do método de Fonte Impulsiva pode ser obtida com a gravação sonora em um ponto de receptor para o estouro de um balão posicionado em um ponto de fonte sonora.

A Figura 5 representa o resultado prático das equações 6, 7 e 8, ou seja, ao considerar que a fonte impulsiva ($s(t)$) é uma aproximação para o impulso unitário ($\delta(t)$), tem-se que o sinal gravado na sala ($r(t)$) é uma aproximação para a resposta ao impulso ($h(t)$). Dessa forma, o sinal representado na Figura 5 pode ser utilizado para calcular os parâmetros acústicos para os pontos de fonte e receptor na sala em que a medição foi realizada.

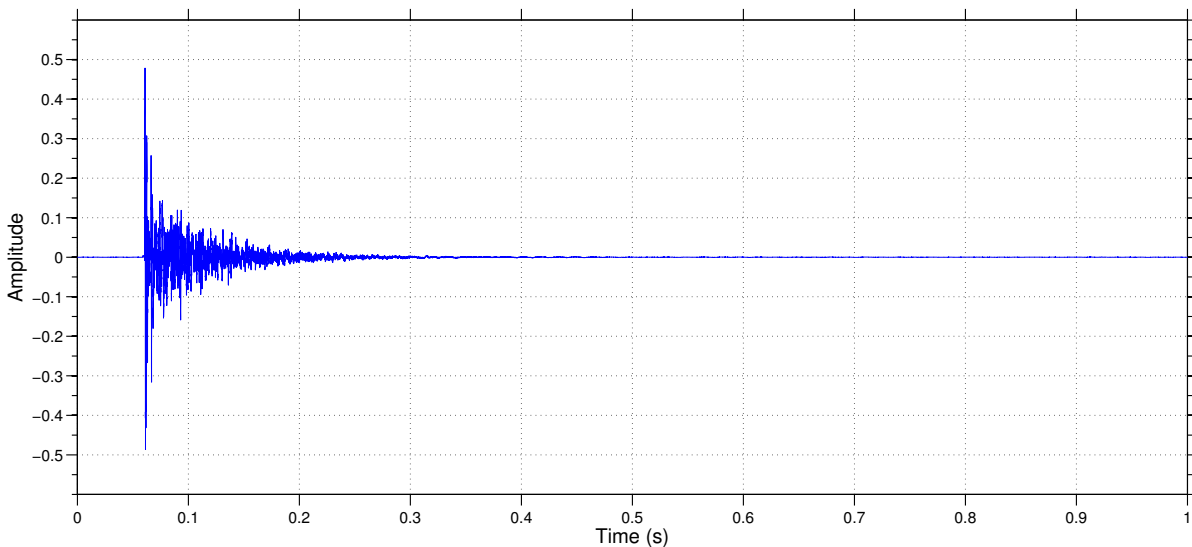


Figura 5 – Amplitude da pressão sonora para o sinal de Estouro do Balão (EB) captado em uma sala com pouca reverberação.

A Subseção 3.6.1 detalha os programas e equipamentos utilizados neste trabalho para a implementação do método de Estouro do Balão (EB).

2.2.2.2 Varredura Exponencial dos Senos (VES)

O método de Varredura Exponencial dos Senos (VES) foi originalmente descrito no trabalho de Farina (2000), onde são apresentados os aspectos teóricos e práticos para sua implementação. A grande vantagem desse método em comparação com os outros que realizam o cálculo da resposta ao impulso a partir da reprodução sonora por meio de um alto-falante é remover a distorção não linear causada por esse tipo de equipamento. Posteriormente esse trabalho foi aprimorado e os resultados são apresentados em Farina (2007a).

Os requisitos para a implementação do método de Varredura Exponencial dos Senos (VES), assim como os que consistem na aplicação de qualquer forma de sinal senoidal, como por exemplo o de varredura linear, e também os necessários para a implementação do *MLS* são descritos na norma ISO18233:2006. Tal procedimento é utilizado para determinar a resposta acústica de um ambiente através do cálculo da Resposta ao Impulso (RI). A seguir são descritos sua parte teórica e aspectos práticos de sua implementação.

O método VES simplificado

O método VES consiste na aplicação de um sinal senoidal com sua frequência variando de forma exponencial, o qual pode ser gerado pela Equação 9 (FARINA, 2007b):

$$s(t) = \sin \left\{ \frac{\omega_1 \cdot T}{\ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} \cdot \left[\exp \left(\frac{t}{T} \cdot \ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \right) - 1 \right] \right\}, \quad (9)$$

onde:

ω_1 é a frequência inicial (*rad/s*),

ω_2 é a frequência final (*rad/s*),

T é o tempo de duração do sinal (*s*).

A Figura 6 mostra um sinal de varredura exponencial com frequência variando de 20 Hz até 20 kHz em 10s no domínio do tempo e seu espectrograma. Nessa figura o eixo das frequências está em escala logarítmica.

A partir da análise da Figura 7 observa-se que esse sinal possui a mesma quantidade de energia por faixa de frequências, o que melhora a Relação Sinal Ruído (*Signal to Noise Ratio*) (SNR) na região de frequências graves, sendo esta a principal vantagem em relação ao método que usa como sinal de entrada uma Varredura Linear dos Senos (FARINA, 2007b).

Este sinal ($s(t)$) é aplicado a uma sala cujo modelo está representado na Figura 1, e o resultado de sua reverberação pela sala ($r(t)$) é gravado para uma análise futura. O cálculo da resposta ao impulso ($h(t)$) pode ser realizado de acordo com a Equação 10, na qual faz-se necessário a utilização de um filtro de resposta ao impulso ($f(t)$).

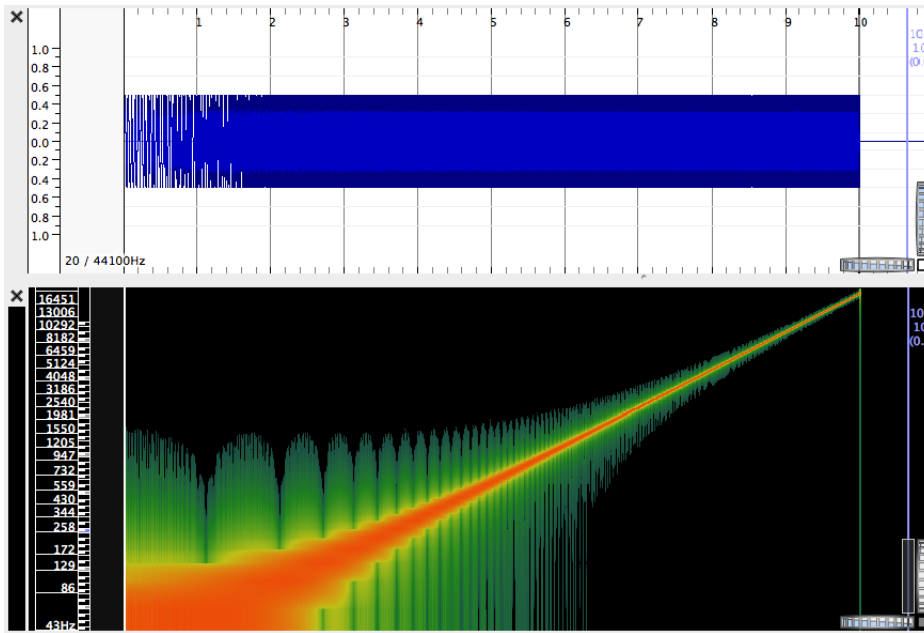


Figura 6 – Espectrograma de um sinal senoidal com frequência variando exponencialmente de 20 Hz até 20 kHz em 10 s.

$$h(t) = r(t) * f(t), \quad (10)$$

onde: $f(t)$ é o filtro de resposta ao impulso (*filtering impulse response*).

Este filtro pode ser gerado de acordo com a Equação 12 (LARA; PASQUAL; VECCI, 2016).

$$f(t) = \sin \left\{ \frac{\omega_1 \cdot T}{\ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} \cdot \left[\exp \left(\frac{-t + T}{T} \cdot \ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \right) - 1 \right] \right\} \frac{\omega_1}{\omega(t)}, \quad (11)$$

onde:

$$\omega(t) = \omega_1 \left[\exp \left(\frac{t}{T} \cdot \ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \right) \right]. \quad (12)$$

A Figura 7 ilustra a análise espectral do sinal senoidal com frequência variando exponencialmente e de seu respectivo filtro de resposta ao impulso gerado. É possível observar que o sinal possui um espectro rosa, ou seja uma variação de -3 dB por oitava, e o filtro possui uma resposta em frequência contrária de $+3$ dB para compensar a atenuação no sinal aplicado.

O método VES na prática

O procedimento para obter a RIS na prática torna-se mais complexo devido à presença de um ruído ambiente ($n(t)$) e principalmente devido à característica não linear dos alto-falantes. Podemos ver um diagrama em blocos contemplando estes dois fenômenos representados na Figura 8.

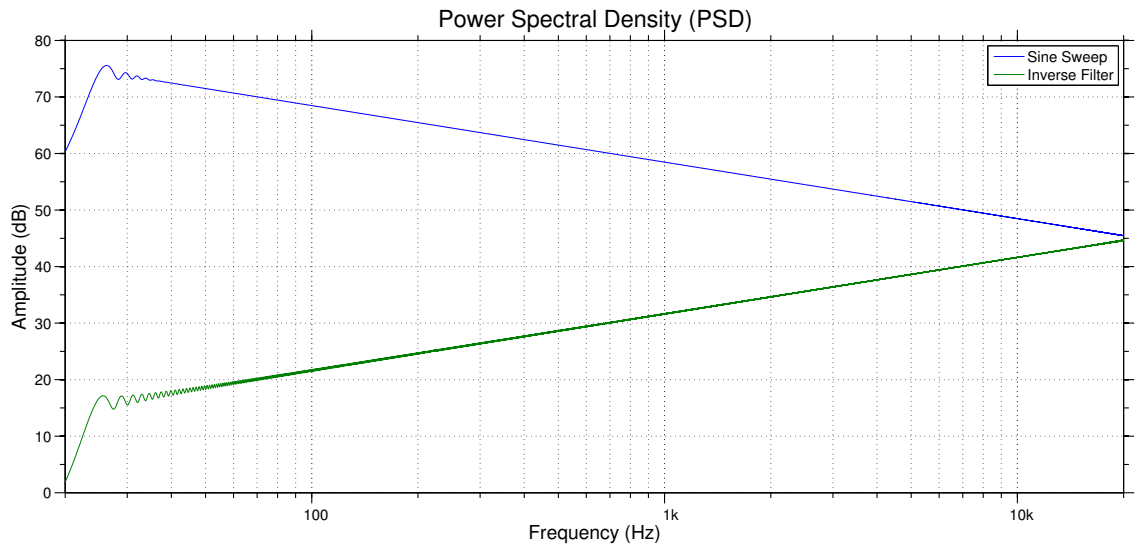


Figura 7 – Espectro de um sinal senoidal com frequência variando exponencialmente de 20 Hz até 20 kHz em 10 s e de seu filtro utilizado para o cálculo da resposta ao impulso da sala.

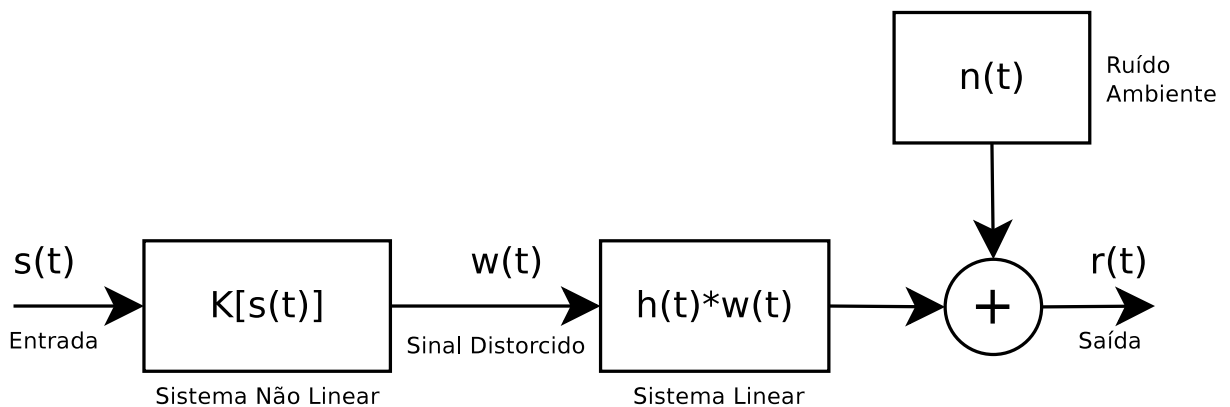


Figura 8 – Diagrama de blocos de um modelo real considerando a presença do ruído ambiente ($n(t)$) e da distorção não linear causada pelo alto-falante ($K[\]$).

Adaptado de: Farina (2007b).

A distorção do alto-falante pode ser caracterizada por um sistema não linear e sem memória, podendo ser modelada utilizando o método *Volterra kernel* ($k_N(t)$) (FARINA, 2007b), gerando um sinal distorcido ($w(t)$), o qual pode ser modelado de acordo com a equação:

$$w(t) = s(t) * k_1(t) + s^2(t) * k_2(t) + \dots + s^N(t) * k_N(t). \quad (13)$$

Este sinal é então reverberado por um filtro linear $h(t)$, assim a saída do sistema será dada pela equação (FARINA, 2007b):

$$r(t) = n(t) + s(t) * k_1(t) * h(t) + s^2(t) * k_2(t) * h(t) + \dots + s^N(t) * k_N(t) * h(t). \quad (14)$$

Na prática, é difícil separar a reverberação linear da distorção não linear. Pode-se então assumir que a parte determinística da Resposta ao Impulso da Sala (RIS) é obtida a partir de várias respostas ao impulso, cada uma convolvida com uma potência diferente do sinal de entrada (FARINA, 2007b). Assim, a saída do sistema pode ser calculada de acordo com a equação:

$$r(t) = n(t) + s(t) * h_1(t) + s^2(t) * h_2(t) + \dots + s^N(t) * h_N(t) \quad (15)$$

A saída do sistema ($r(t)$) representado pela figura Figura 8 é composta de múltiplas exponenciais deslocadas na frequência, as quais representam a distorção não linear do alto-falante. Posteriormente, todas são reverberadas pela sala e, por último, é acrescentado o ruído ambiente. A Figura 9 ilustra a forma de onda e o espectrograma para um sinal de varredura exponencial amplificado por um monitor de áudio em uma sala com pouca reverberação.

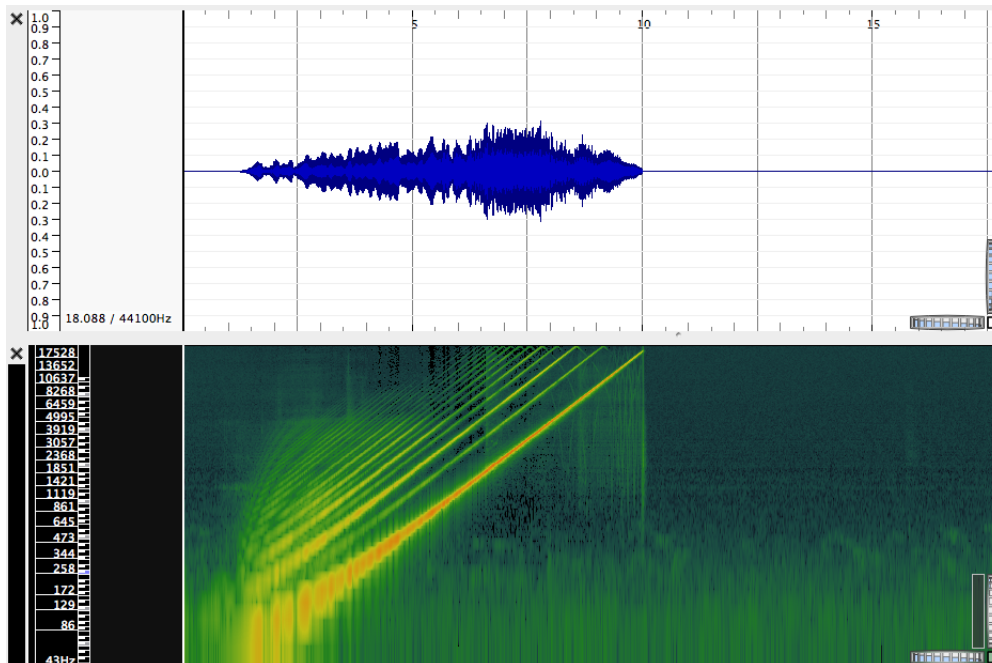


Figura 9 – Sinal de varredura exponencial na prática, onde é possível observar a distorção não linear causada pelo alto-falante.

Ao comparar-se as figuras 6 e 9 podemos ver como o sinal sai distorcido ao passar pelo alto-falante. Perceber-se as raiais superiores a do sinal de varredura exponencial puro assim como ilustrado na Figura 9. Pode-se explicar a característica não linear do alto-falante através deste espectrograma, pois em determinado instante de tempo temos apenas uma frequência sendo aplicada na entrada, e diversas frequências sendo reproduzidas na saída.

Ao considerar o sinal gravado para a obtenção da resposta ao impulso da sala de acordo com a Equação 10, as respostas referente ao sistema linear e as referentes às distorções de cada harmônico aparecem deslocadas no tempo assim como ilustrado na Figura 10. Observa-se a resposta do sistema linear localizada a partir do tempo de 10s e as outras antes deste tempo.

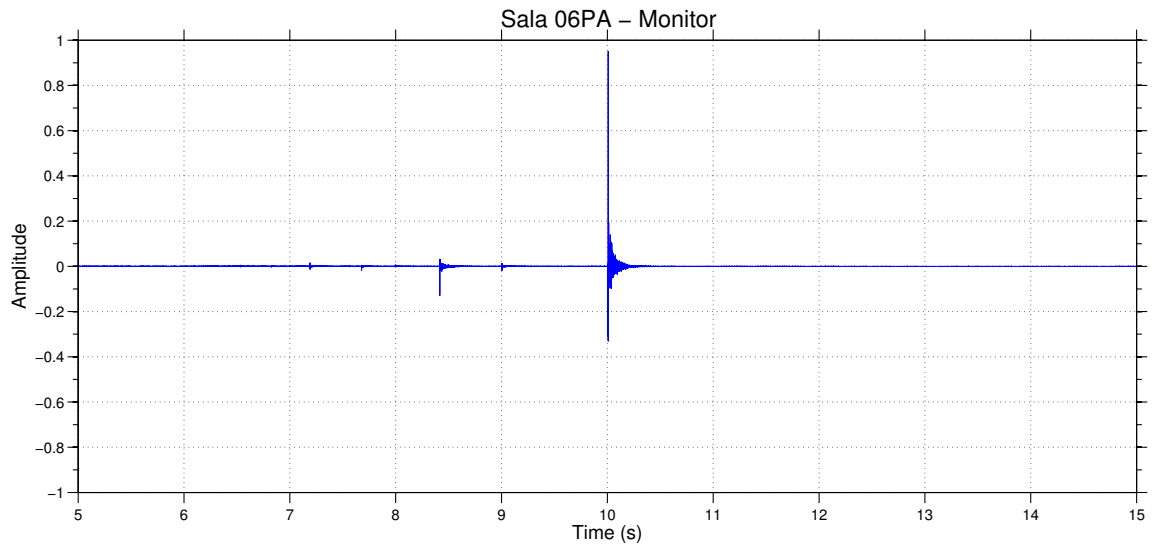


Figura 10 – Respostas ao impulso do sistema linear (a partir de 10s) e as causadas pelas distorções harmônicas (aparecem para $t < 10$ s).

A separação das respostas referentes às distorções harmônicas ficam mais evidentes ao plotarmos o sinal representado na Figura 10 em dB, cujo resultado está representado na Figura 11.

A Figura 10 e principalmente a Figura 11 evidenciam a separação da parte referente à distorção não linear causada pelo alto-falante, podendo ser eliminadas janelando este sinal no domínio do tempo, sendo esta uma das principais vantagens do método de Varredura Exponencial dos Senos (VES).

2.2.3 Cálculo de Parâmetros Acústicos a Partir da Resposta ao Impulso da Sala (RIS)

Os parâmetros acústicos são descritores objetivos calculados na tentativa de quantificar efeitos subjetivos de como os seres humanos percebem o som no interior de uma sala (BRANDAO, 2016) e, de acordo com Kuttruff (2000), considerando a sala como Sistema Linear Invariante no Tempo (SLIT), todas características relativas a esta natureza estão contidas na sua Resposta ao Impulso (RI).

Assim, boa parte dos parâmetros acústicos podem ser calculados a partir da RIS. Porém, se faz necessário seu processamento antes destes cálculos. Como a RIS carrega a

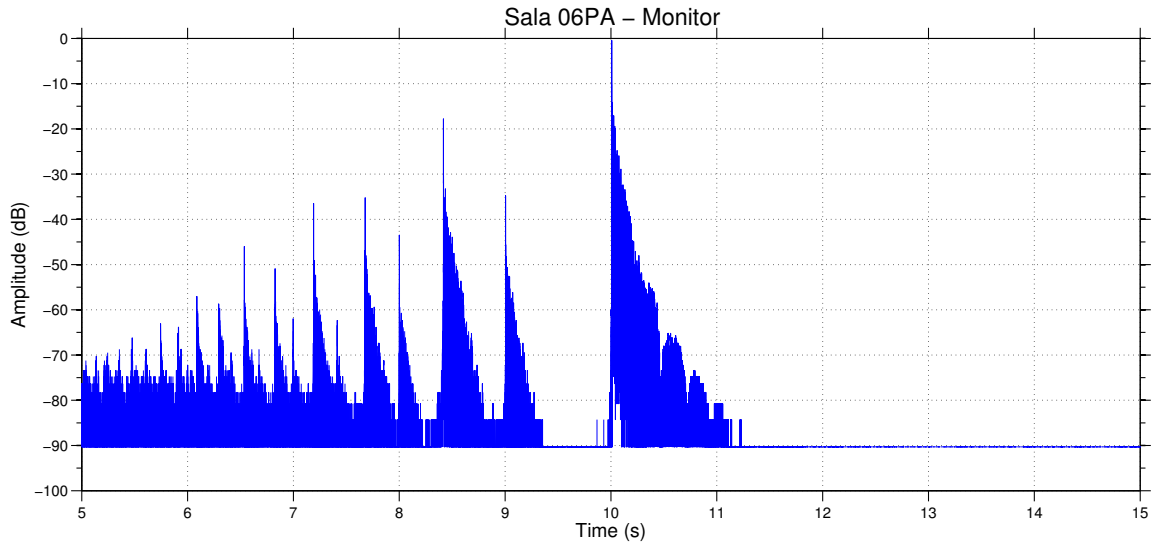


Figura 11 – Respostas ao impulso do sistema linear em dB e as causadas pelas distorções harmônicas.

informação de todo o espectro audível, levando em consideração que suas características não são uniformes ao longo da faixa de frequências medida, o primeiro passo é filtrar este sinal para que se possa calcular os descritores por banda de frequência. Usualmente, os descritores acústicos são calculados por banda de oitava ou por terço de oitava. Os requisitos para a implementação destes filtros são descritos pela norma IEC61260:1995.

Após a filtragem da RIS é realizada a Integral de Schroeder, a qual é definida pela equação (SCHROEDER, 1965):

$$E(t) = \int_t^{\infty} h^2(t) dt. \quad (16)$$

Como a energia contida na resposta ao impulso não possui um decaimento perfeitamente linear, torna-se difícil a identificação do decaimento exato em um instante de tempo, e o cálculo da Integral de Schroeder auxilia neste processo suavizando a curva de decaimento.

Chu (1978), Hirata (1982) e Lundeby et al. (1995) apresentam métodos para compensar o ruído presente na RIS. A seguir, é descrito e exemplificado apenas o primeiro deles.

No método de Chu, é calculada a média do valor RMS considerando os últimos 10% da RIS. Tal valor é subtraído da resposta impulsiva quadrática antes de se calcular a Integral de Schroeder. Este procedimento pode ser realizado de acordo com a equação:

$$E_{Chu}(t) = \int_t^{\infty} (h^2(t) - RMS_{10\%}^2) dt, \quad (17)$$

onde: $RMS_{10\%}^2$ é a média do valor RMS dos últimos 10% de $h(t)$.

A Figura 12 ilustra o processo de filtragem da resposta ao impulso em duas bandas de oitava (250 Hz e 1 kHz), o processo de integral cumulativa invertida obtido pela Integral de Schroeder e a compensação do ruído obtido pelo método de Chu. Ao analisar estas imagens, fica claro que o método de Schroeder ajuda a precisar a diminuição da energia sonora contida na resposta ao impulso, facilitando assim a identificação de parâmetros acústicos calculados a partir deste decaimento. Esse processo é aprimorado a partir da compensação do ruído, pois o método estende o decaimento sonoro da cauda reverberante, aumentando assim a diferença entre o maior nível de energia e o ruído.

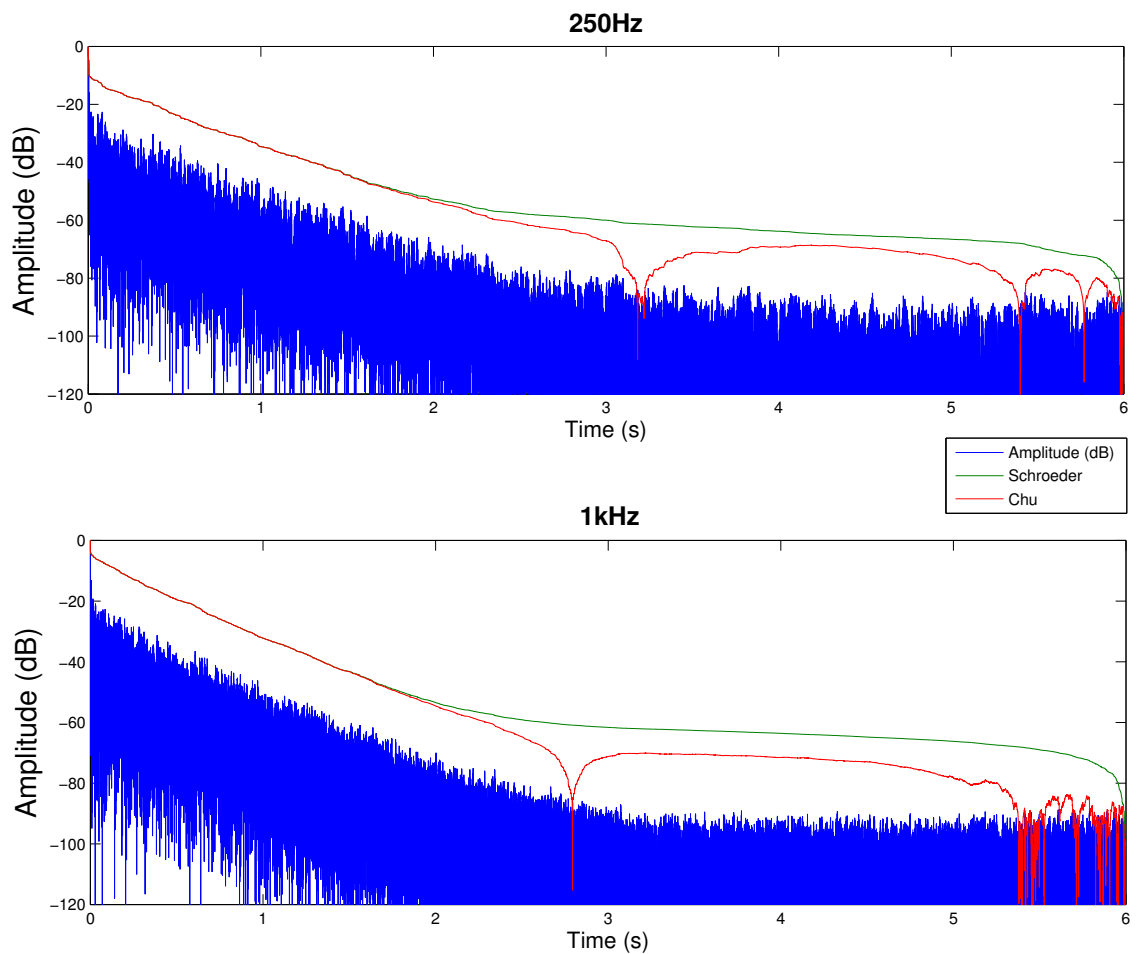


Figura 12 – Nível de energia em dB da resposta ao impulso filtrada para as bandas de 250 Hz e 1 kHz (azul), suas respectivas Integrais de Schroeder (verde) e atenuação do ruído pelo método de Chu (vermelho).

Após o processo de compensação do ruído, os parâmetros acústicos são calculados de acordo com o disposto a seguir.

Tempo de Reverberação - RT

O Tempo de Reverberação (RT), também especificado como T_{60} , é um dos principais parâmetros de qualidade sonora, e se refere ao tempo necessário para que o um som se torne completamente inaudível. Em termos técnicos é definido como o tempo necessário para que a energia contida em um sinal sonoro tenha um decaimento igual a 60 dB (BERANEK, 2004).

Para que se possa medir este decaimento, na prática, é necessário que a fonte emita um sinal com energia sonora 60 dB acima do ruído ambiente para cada faixa de frequência medida, o que nem sempre é praticável. Assim, usualmente, pode ser medido o valor do decaimento de 20 dB ou de 30 dB (BRANDAO, 2016) e, como o decaimento sonoro em dB é aproximadamente linear, basta multiplicar estes tempos por 3 e por 2 respectivamente para se chegar ao RT.

A norma (ISO3382-2:2008, 2008) especifica que para que as medidas de decaimento sejam confiáveis, deve-se considerar o decaimento até que a Integral de Schroeder chegue a 10 dB acima do ruído ambiente e o início deve ser considerado a partir do decaimento de 5 dB. Assim, para as medições de T_{20} e T_{30} são necessários as emissão de sinais sonoros com energia de 35 dB e de 45 dB acima do ruído ambiente.

Desta forma podemos calcular os descritores T_{20} e T_{30} de acordo com as equações 18 e 19 (BRANDAO, 2016).

$$T_{20} = 60 \frac{t_{-25} - t_{-5}}{25 - 5} = 3(t_{-25} - t_{-5}), \quad (18)$$

$$T_{30} = 60 \frac{t_{-35} - t_{-5}}{35 - 5} = 2(t_{-35} - t_{-5}), \quad (19)$$

onde: t_{-5} , t_{-25} e t_{-35} são os tempos em que a curva de decaimento atinge os níveis de -5, -25 e -35 dB respectivamente.

Tempo de Decaimento Inicial - EDT

O Tempo de Decaimento Inicial (EDT)² é definido como o intervalo de tempo que o som leva para decair de 10 dB multiplicado por 6. A multiplicação por 6 é útil para se ter uma comparação com o T_{60} (BERANEK, 2004).

De acordo com a ISO3382-2:2008, o *EDT* também deve ser calculado para o tempo de decaimento dos 10 dB iniciais (de 0 até -10 dB) da curva de decaimento obtida a partir da Integral de Schroeder. Do ponto de vista subjetivo, este descritor acústico é melhor relacionado com a reverberação percebida pelo ser humano, enquanto o T_{60} está mais relacionado com as propriedades físicas da sala.

De forma parecida com as equações para cálculo do T_{20} e T_{30} (equações 18 e 19), o *EDT* pode ser calculado de acordo com a equação (BRANDAO, 2016):

² Em inglês o termo Tempo de Decaimento Inicial é expresso por *Early Decay Time*

$$EDT = 60 \frac{t_{-10} - t_0}{10 - 0} = 6(t_{-10} - t_0) \quad (20)$$

onde: t_0 e t_{-10} são o início e o tempo em que a curva de decaimento atinge o nível de -10 dB respectivamente.

Claridade - C_{50} e C_{80}

A Claridade é uma razão logarítmica entre a taxa de energia inicial e a taxa de energia do sinal restante, podendo ser expressa pelos descritores C_{50} e o C_{80} , sendo que a diferença entre eles é justamente o tempo considerado para a separação destas duas partes da Resposta ao Impulso da Sala (RIS). No primeiro, é considerado o intervalo de 0 até 50 ms como sendo o som inicial e, no outro, esse limite é dado pelo tempo de 80 ms (BRANDAO, 2016).

Segundo a norma ISO3382-2:2008, a Claridade pode ser utilizada para caracterizar a qualidade acústica de salas destinadas à prática musical e para a fala e, desta forma, este parâmetro é melhor aplicado pelos descritores C_{80} e C_{50} respectivamente, os quais podem ser calculados a partir das equações 21 e 22.

$$C_{80} = 10 \cdot \log \left(\frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(t) dt} \right) \quad dB, \quad (21)$$

$$C_{50} = 10 \cdot \log \left(\frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} h^2(t) dt} \right) \quad dB. \quad (22)$$

Na teoria, a energia do sinal reverberante vai do tempo em que este é separado do início do sinal até o infinito mas, na prática esse valor pode ser truncado após o nível de energia do ruído de ambiente ser maior do que o da RIS.

De acordo com Kuttruff (2000), o valor maior para o limite de tempo do C_{80} se deve ao fato de uma reflexão sonora ser menos perceptível para música do que para a fala.

2.2.4 Definição - D_{50} e D_{80}

A Definição é uma razão linear entre a energia do som inicial e a energia do som total e, assim como a Claridade, pode ser calculada considerando os tempos de 50 ms (D_{50}) e de 80 ms (D_{80}) de acordo com as equações 23 e 24 (BRANDAO, 2016).

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_{0ms}^{\infty} h^2(t) dt}, \quad (23)$$

$$D_{80} = \frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_{0ms}^{\infty} h^2(t) dt}. \quad (24)$$

As formas de cálculo da Clareza e da Definição são parecidas e, na verdade, existe uma relação entre tais parâmetros, a qual está expressa nas equações 25 e 26 (ISO3382-2:2008):

$$C_{50} = 10 \cdot \log \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) \text{ dB}. \quad (25)$$

E, de forma análoga, temos que:

$$C_{80} = 10 \cdot \log \left(\frac{D_{80}}{1 - D_{80}} \right) \text{ dB}. \quad (26)$$

Tempo Central - T_S

De acordo com a norma ISO3382-2:2008, o Tempo Central é o centro gravitacional da energia contida na Resposta ao Impulso da Sala (RIS) e, juntamente com a Claridade e a Definição, formam um conjunto de parâmetros que estabelecem um balanço entre a energia inicial e a final (BRANDAO, 2016), podendo ser calculado de acordo com a equação:

$$T_S = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}. \quad (27)$$

A principal diferença entre o T_S e os outros parâmetros desta classe é que este dispensa a separação da RIS entre parte inicial e final (ISO3382-2:2008).

2.2.5 Frequência de Schroeder

A Frequência de Schroeder (F_S) é considerada como a frequência de transição entre duas regiões no espectro. Na primeira os modos acústicos são percebidos de forma individual e com suas ressonâncias separadas. Na outra, os modos se sobrepõem no espectro, tornando seus efeitos individuais imperceptíveis (SCHROEDER, 1996). Na área de acústica de salas, a Frequência de Schroeder pode ser calculada de acordo com a equação:

$$F_S = 2000 \cdot \sqrt{\frac{RT}{V}}, \quad (28)$$

onde:

F_S é a frequência de schroeder (Hz),

RT é o tempo de reverberação (s),

V é o volume da sala (m^3).

2.3 Cálculos dos Valores Médios e Dispersão de Parâmetros Acústicos

Para se ter uma boa medição da qualidade acústica no interior de uma sala, a norma ISO3382-2:2008 especifica que se deve medir a resposta acústica da sala em diversos pontos de fonte e de receptor, o que torna necessário a análise estatística dos dados. A seguir são apresentadas as principais variáveis utilizadas para o cálculo da média dos parâmetros acústicos e de suas respectivas dispersões.

O cálculo da média de N medições para o parâmetro x pode ser realizado de acordo com a equação:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (29)$$

onde:

x_i é a i -ésima medida do parâmetro x ,

N é o número de elementos da amostra,

\bar{x} é a média.

Para a avaliação da dispersão dos dados, foram utilizadas duas variáveis. A primeira delas é o desvio padrão (σ), o qual pode ser calculado de acordo com a equação:

$$\sigma = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right)^{1/2}, \quad (30)$$

onde: σ é o desvio padrão

A outra variável utilizada para quantizar a dispersão dos dados foi o Desvio Padrão Relativo (RSD)³, a qual se mostrou mais adequada, pois este trabalho analisou salas com tempos de reverberação muito distintos, assim como apresentado na Seção 4.6. O Desvio Padrão Relativo (RSD) é calculado de acordo com a equação:

$$RSD = \frac{\sigma}{\bar{x}}, \quad (31)$$

onde: RSD é o desvio padrão relativo

E por último, fez-se necessário o cálculo do Erro Relativo (Er), o qual foi utilizado para comparar os métodos de medição. O Erro Relativo (Er) é calculado de acordo com a equação:

$$Er = \frac{X_m - X_v}{X_v}, \quad (32)$$

³ A sigla RSD vem do inglês *Relative Standard Deviation*

onde:

Er é o erro relativo,

X_v é o valor verdadeiro ou mais provável,

X_m é o valor medido.

Considerações

Neste capítulo, foram apresentados os fundamentos teóricos para o modelo matemático de uma sala acústica e as etapas para cálculo de parâmetros acústicos através dos procedimentos de Fonte de Ruído Interrompida (FRI), de Estouro do Balão (EB) e de Varredura Exponencial dos Senos (VES). Por último, definiu-se as variáveis utilizadas para cálculo dos valores médios e dispersão de parâmetros acústicos. A seguir, são apresentadas as salas em que os testes acústicos foram realizados, os equipamentos e os *softwares* utilizados na implementação dos métodos abordados neste trabalho.

Metodologia

Para a realização dos testes acústicos, utilizou-se a comparação de três métodos de medição de parâmetros acústicos: Estouro do Balão (EB), Fonte de Ruído Interrompida (FRI) e Varredura Exponencial dos Senos (VES). Este capítulo apresenta os dados técnicos que levaram à escolha dos dois tipos de equipamentos de reprodução sonora utilizados, sendo que um deles utiliza uma fonte omnidirecional e o outro uma fonte convencional, os tipos de microfones utilizados, ambos de resposta omnidirecional. Por fim, é apresentada uma lista dos materiais e equipamentos utilizados para a realização dos testes acústicos.

3.1 Descrição das Salas

Como objeto de estudo optou-se pela escolha das salas de aula 06 e 08 da Escola de Música da UFMG. A Sala 06 foi escolhida por possuir tratamento acústico com módulos de acústica variável. Já a Sala 08 foi escolhida por ser da mesma dimensão que a Sala 06, mas sem tratamento acústico.

Essas salas são utilizadas como espaço de aulas teóricas e para a prática de diversos instrumentos e canto, o que caracteriza sua aplicação como sendo diversificada. Dentro dessas salas, haviam diversas carteiras para a acomodação dos alunos, uma mesa para o professor, e algumas estantes de partituras. Todos esses itens foram retirados diariamente antes da realização dos processos de medição. Em cada uma das salas havia um piano e um móvel metálico contendo um aparelho de som, TV e alguns objetos, os quais não puderam ser retirados pois não passavam pela porta.

3.1.1 Dimensões da Sala

A Figura 13 representa as dimensões das salas 06 e 08 em centímetros e, como a parede localizada a direita da planta não é reta, foi considerado um valor médio, resultando assim nas dimensões e volume apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões e volume das salas 06 e 08.

| | | |
|----------------------|-------|---------------------|
| Largura média | L_X | 5,59 m |
| Comprimento | L_Y | 5,22 m |
| Altura | L_Z | 2,97 m |
| Volume | V | 86,7 m ³ |

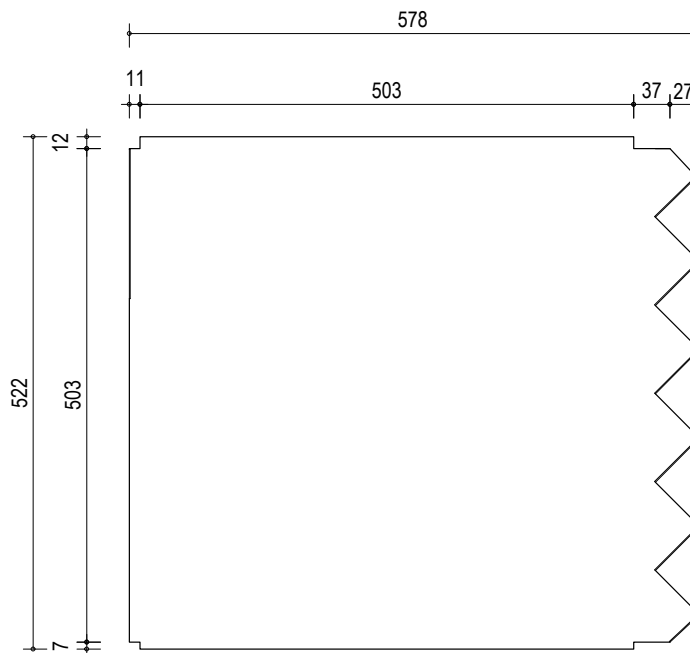


Figura 13 – Dimensões em cm das salas 06 e 08.

3.1.2 Tratamento e Controle Acústico da Sala 06

A acústica desta sala é controlada através de painéis acústicos de parede dotados de absorvedores sonoros em seu fundo e com aletas flexíveis em sua face frontal, o que permite controlar se o som irá bater nas aletas, que refletem o som, ou no fundo dos painéis, onde está fixado o material absorvente. A Figura 14 representa uma foto destes painéis.

Além destes painéis de parede, foram fixados módulos semelhantes no teto da sala, o qual está representado na Figura 15. A principal diferença destes painéis é a presença de abertura nas laterais.

Ao todo a Sala 06 possui 23 painéis de parede e 28 painéis de teto, e além destes, a sala possui 4 módulos de "armadilha de grave", os quais possuem a função de diminuir a reverberação em faixas de frequências grave. Uma foto destes painéis está representada na Figura 16.

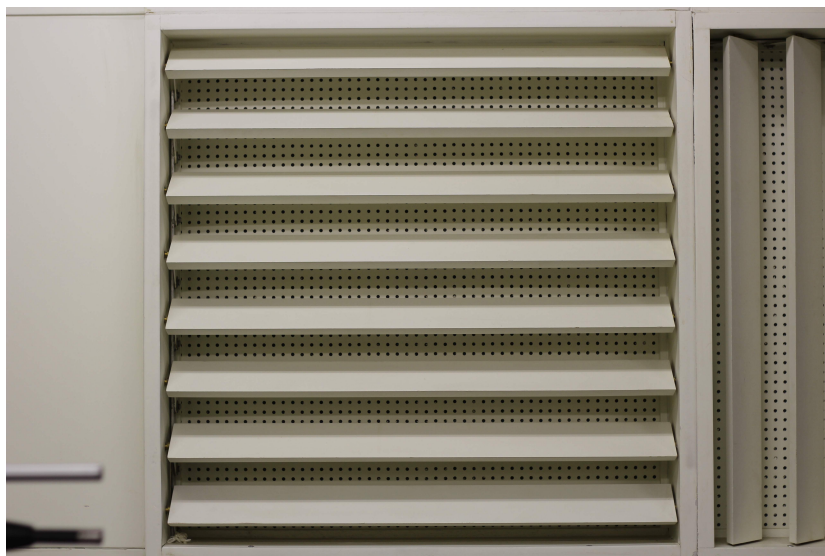


Figura 14 – Painel acústico de parede com suas aletas abertas.



Figura 15 – Painel acústico de teto com suas aletas abertas.

3.2 Configurações Acústicas

Após a realização de testes preliminares, notou-se que a abertura ou o fechamento dos painéis de acústica variável alterava pouco os parâmetros acústicos da Sala 06. Dessa forma, optou-se por estudar tal ambiente com todos os painéis fechados ou com todos abertos. Assim, chegou-se a 3 configurações acústicas:

1. Sala 06 com Painéis Abertos (06PA);
2. Sala 06 com Painéis Fechados (06PF);
3. Sala 08 (08).



Figura 16 – Módulo de armadilha de grave à direita.

3.3 Tipos de Equipamentos de Reprodução Sonora

O tipo de equipamento utilizado para a reprodução sonora pode influenciar na qualidade e exatidão dos descritores acústicos medidos. Para a realização de uma comparação da diferença obtida pela utilização de duas fontes diferentes, utilizou-se uma fonte em conformidade com a norma ISO3382-2:2008, a qual exige que a fonte sonora seja o mais omnidirecional possível para medições precisas e que o nível de pressão sonora seja o suficiente para fornecer curvas de decaimento como o mínimo exigido acima do ruído ambiente.

A Figura 17 representa as duas fontes sonoras utilizadas, isto é, o monitor de áudio de marca e modelo M-Audio BX5 (esquerda) e o dodecaedro da B&K modelo 4292-L (direita).

A Figura 18 representa a resposta em frequência para o Dodecaedro e seu amplificador de modelo B&K 2734. Como sinal sonoro desta medição, o fabricante utilizou o gerador de ruído rosa interno ao amplificador. Pode-se observar que o sistema possui uma resposta em frequência maior ou aproximadamente igual a 100dB para a faixa de espectro mostrada, que compreende os terços de oitava de 50 Hz até 5 kHz.

Outro ponto importante é a Resposta Direcional da fonte sonora, a qual irá dizer se esta possui um padrão omnidirecional ou não. Tal informação para o Dodecaedro B&K



Figura 17 – Fontes Sonoras Utilizadas: Monitor de Áudio à esquerda e Dodecaedro à direita.

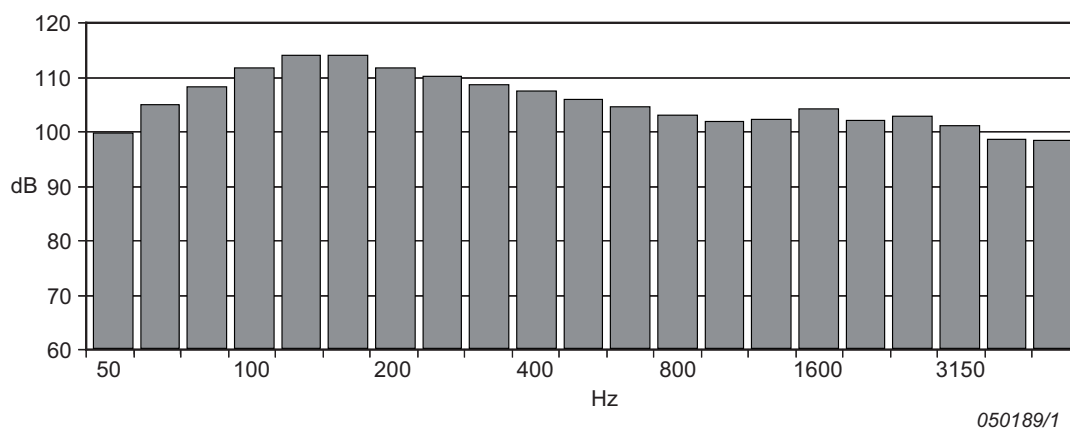


Figura 18 – Resposta em frequência em terço de oitava para o Dodecaedro com o amplificador 2734 utilizando como sinal sonoro o gerador de ruído rosa do próprio equipamento.

Fonte: B&K (2016).

está representada na Figura 19, a qual traz as respostas para as seguintes bandas de oitava: 1, 2, 4 e 8 kHz. A norma ISO3382-1 exige um desvio máximo de ± 3 dB, ± 5 dB e ± 6 dB respectivamente para as três primeiras bandas. O valor para a de 8 kHz não é especificado.

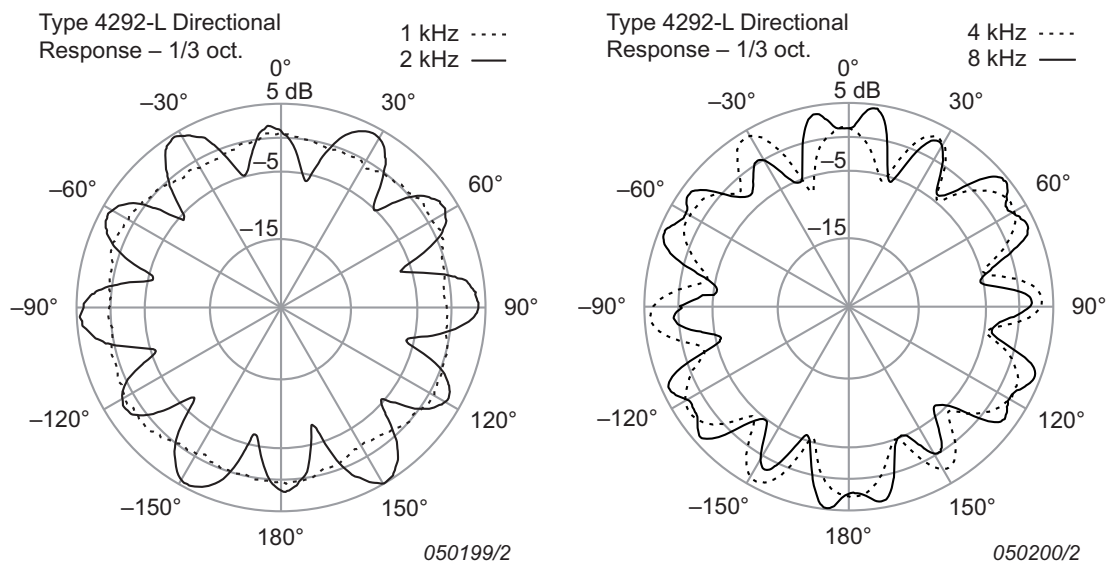


Figura 19 – Resposta Direcional para o plano horizontal medida para as bandas de 1, 2, 4 e 8 kHz. Não há desvio significativo para frequências abaixo de 1 kHz.

Fonte: B&K (2016).

A partir da análise da Figura 19, que informa que para frequências abaixo de 1 kHz não há perda significativa em relação a direção da fonte, observa-se que o Dodecaedro está praticamente em conformidade com as exigências da norma, com exceção para a banda de 2 kHz, onde podemos observar um desvio menor que -5 dB para a direção aproximada de -135° , por exemplo.

Informações detalhadas para a resposta em frequência e a resposta direcional do Monitor de Áudio M-Audio BX5 não são fornecidas pelo fabricante ¹ e, no manual M-AUDIO existe apenas a informação de que a resposta em frequência vai de 56 Hz até 20 kHz.

3.4 Tipos de Equipamentos de Captação Sonora

Os equipamentos de captação sonora, os quais incluem principalmente o microfone, também têm algumas exigências técnicas para sua utilização para a medição de parâmetros acústicos. A norma ISO3382-2:2008 apresenta apenas a necessidade de um padrão de captação omnidirecional, porém também se faz necessária a análise da resposta em frequência.

Para os testes acústicos foram utilizados dois principais sistemas para a captação e análise. O primeiro foi o Analisador Sonoro B&K 2250, que foi projetado especificamente para este tipo de aplicação, sendo utilizado para a implementação dos métodos Estouro do Balão (EB) e Fonte de Ruído Interrompida (FRI).

¹ Foi enviado um e-mail para o endereço destinado ao suporte técnico fornecido no manual M-AUDIO (<techsupt@m-audio.com>), porém não houve resposta

A Figura 20 mostra a resposta em frequência para o Analisador Sonoro B&K 2250 juntamente com o microfone utilizado (B&K 4189). Observou-se que o sistema possui uma resposta com uma variação menor que 1dB para todo o espectro audível, o qual vai além da faixa de frequência analisada neste trabalho.

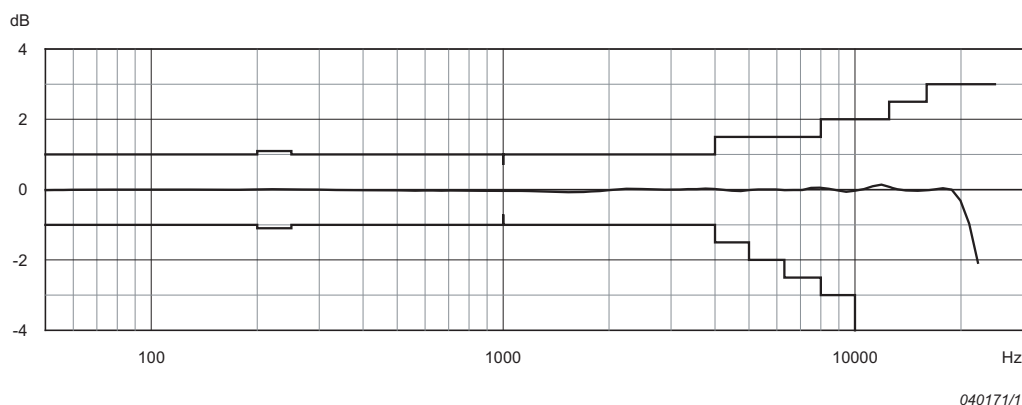


Figura 20 – Resposta em Frequência do Analisador Sonoro B&K 2250 com o microfone B&K 4189.

Fonte: B&K.

A Resposta Direcional para este sistema é apresentada na Figura 21, onde pode-se observar um padrão praticamente omnidirecional até o terço de 8 kHz. Para frequências compreendidas pelo terço de 10 kHz e seus superiores, o equipamento tende a perder sua característica omnidirecional com o aumento da frequência. Porém, estas frequências elevadas, como as do terço de 20 kHz estão fora do escopo de análise deste trabalho.

O segundo sistema de captação foi utilizado para a implementação do método Varredura Exponencial dos Senos (VES), e tem como componente principal o microfone ECM8000 da Behringer. A Resposta em Frequência e a Resposta Direcional para este equipamento estão representadas respectivamente nas figuras 22 e 23. Nestes gráficos foi possível observar sua conformidade com a aplicação desejada, pois sua Resposta em Frequência possui uma variação máxima de 3dB em todo o espectro audível e sua Resposta Direcional começa a apresentar pequenas perdas na direcionalidade apenas para a banda de 8 kHz, o que coloca o microfone ECM8000 dentro das exigências da norma ISO3382-2:2008.

3.5 Determinação dos Pontos de Medição

O campo acústico no interior de uma sala não é uniforme, desta forma faz-se necessária a medição dos parâmetros acústicos em diversos pontos de fonte e receptor para se medir com mais precisão a resposta acústica da sala. A quantidade mínima de pontos é determinada pela norma ISO3382-2:2008 de acordo com a classe de acurácia desejada.

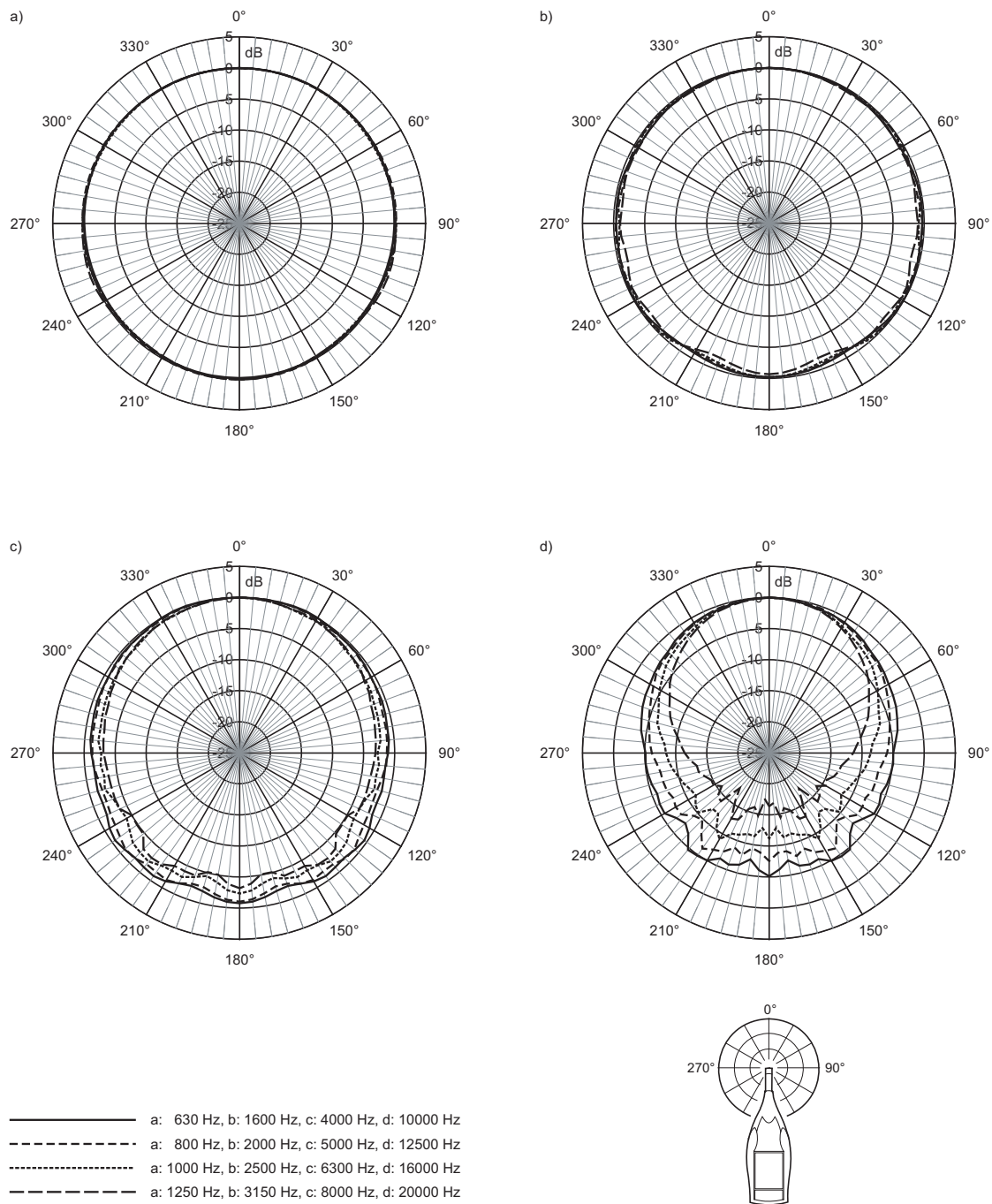


Figura 21 – Resposta Direcional do analisador sonoro 2250.

Fonte: B&K.

Para a classe de maior precisão, é especificado um número de posições de fonte ≥ 2 , de microfones ≥ 3 e um número para as combinação de fonte-microfone ≥ 12 .

Outro ponto importante é a distância das posições de microfones, de fonte e das superfícies da sala. A distância entre as posições de microfones deverão ser maiores que a metade do comprimento de onda para a faixa de frequências de medição, podendo ser considerada como distância mínima 2 metros (ISO3382-2:2008), o que resulta em uma

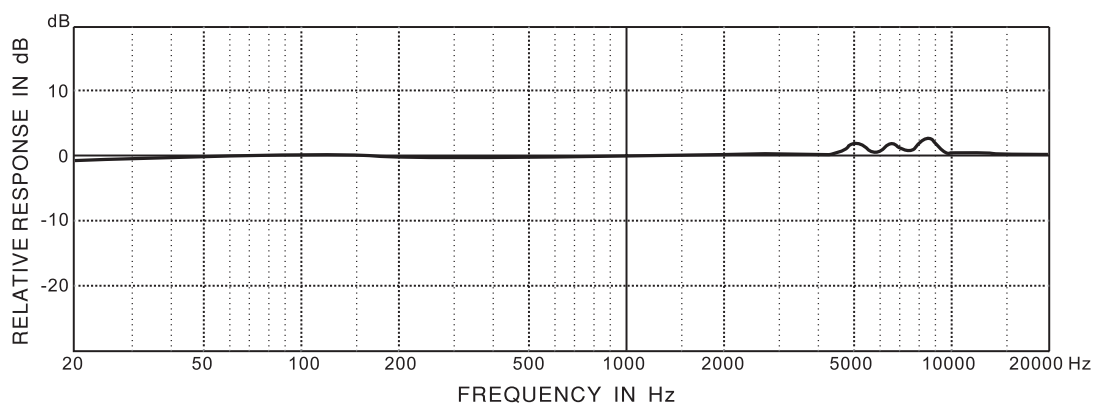


Figura 22 – Resposta em Frequência do microfone ECM8000.

Fonte: BEHRINGER.

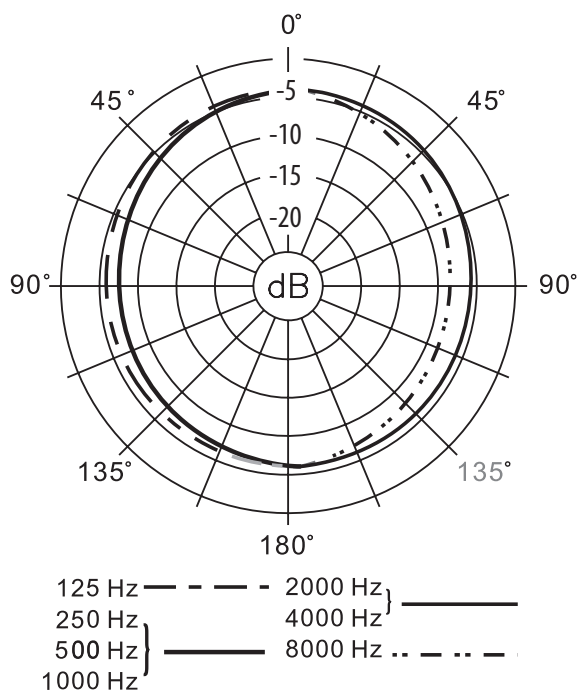


Figura 23 – Resposta Direcional do microfone ECM8000.

Fonte: BEHRINGER.

frequência de:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{4 \text{ m}} = 85 \text{ Hz}, \quad (33)$$

onde:

 f é a frequência (Hz), c é a velocidade do som (m/s), λ é o comprimento de onda (m).

A distância de qualquer posição de microfone às superfícies refletoras, incluindo o chão, deverá ser no mínimo 1/4 do comprimento de onda (ISO3382-2:2008) e, utilizando a distância de 1 m, temos a mesma frequência calculada na Equação 33.

E, por último, existe a distância mínima entre as posições de fonte e microfone, a qual pode ser calculada de acordo com a Equação 34 (ISO3382-2:2008).

$$d_{min} = 2\sqrt{\frac{V}{c.RT}}, \quad (34)$$

onde:

V é o volume da sala (m^3),

c é a velocidade do som (m/s),

RT é o tempo de reverberação (s).

Para o volume apresentado na Tabela 1 e os tempos de reverberação de cada sala apresentados na Tabela 4 ($T_{20,A}$), temos as distâncias mínimas para cada configuração acústica apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Distância mínima (m) entre as posições de fonte e de microfone para as salas Sala 06 com Painéis Abertos (06PA), Sala 06 com Painéis Abertos (06PA) e Sala 08 (08).

| Sala | d_{min} |
|-------------|-----------|
| 06PA | 1,40 |
| 06PF | 1,34 |
| 08 | 0,73 |

Quando os pontos de fonte e de microfone foram determinados, não se tinha o valor dos tempos de reverberação de cada sala. Assim foi considerada como distância mínima para todas as salas o comprimento de 1m.

Os pontos de fonte e de microfone foram determinados e marcados no chão das salas de acordo com as condições apresentadas nesta seção, chegando a um número de 5 posições de microfone ($M1$ até $M5$) e de 3 posições de fonte ($F1$ até $F3$), totalizando 15 posições fonte-receptor. Uma representação para tais pontos é apresentada nas figuras 24, 25 e 26.

3.6 Implementação dos Métodos de Medição de Parâmetros Acústicos

3.6.1 Estouro do Balão

O método que tem o estouro do balão como sinal de excitação utilizou o analisador sonoro b&k 2250 para gravar a resposta das salas e realizar o cálculos de parâmetros acústicos. Posteriormente, estes dados foram transferidos para o computador e exportados

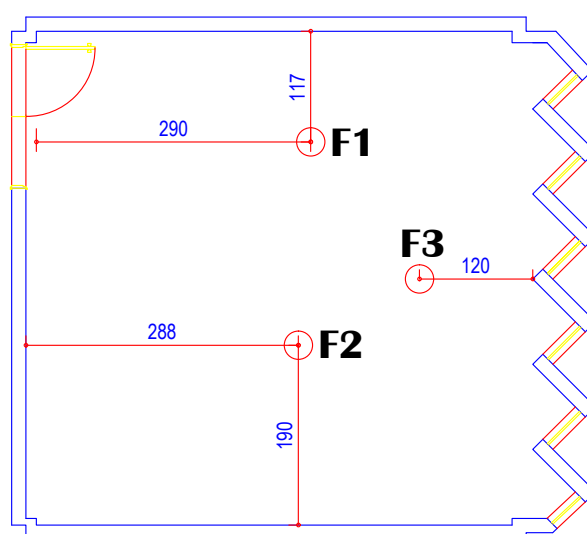


Figura 24 – Pontos de posicionamento das fontes sonoras.

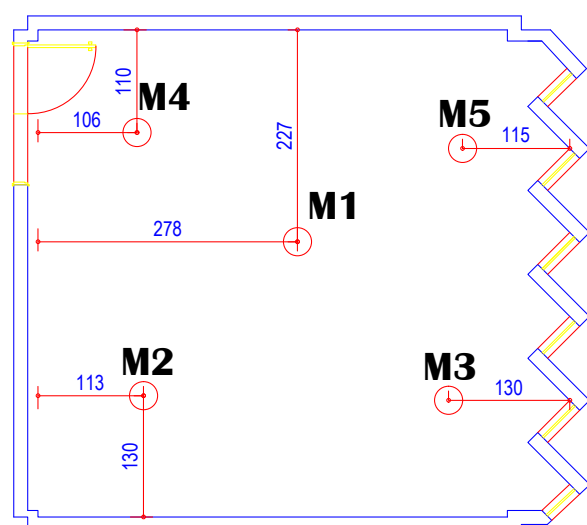


Figura 25 – Pontos de posicionamento dos microfones.

para o *software Excel* através do *software BZ-5503*. Por último, os dados foram importados para o *software Matlab* para a realização de análises e comparações mais apuradas.

A Figura 27 representa um diagrama em blocos dos equipamentos utilizados para a implementação do método que utiliza o estouro do balão como fonte impulsiva e também dos *softwares* utilizados para o cálculos dos parâmetros e análises comparativas entre os métodos.

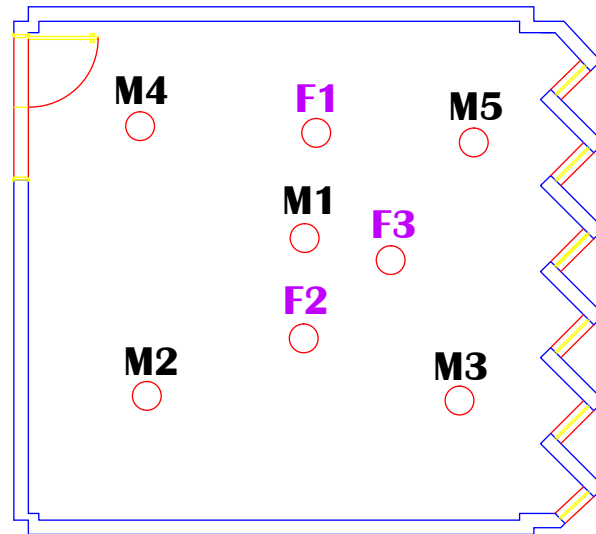


Figura 26 – Pontos de posicionamento das fontes e dos microfones.

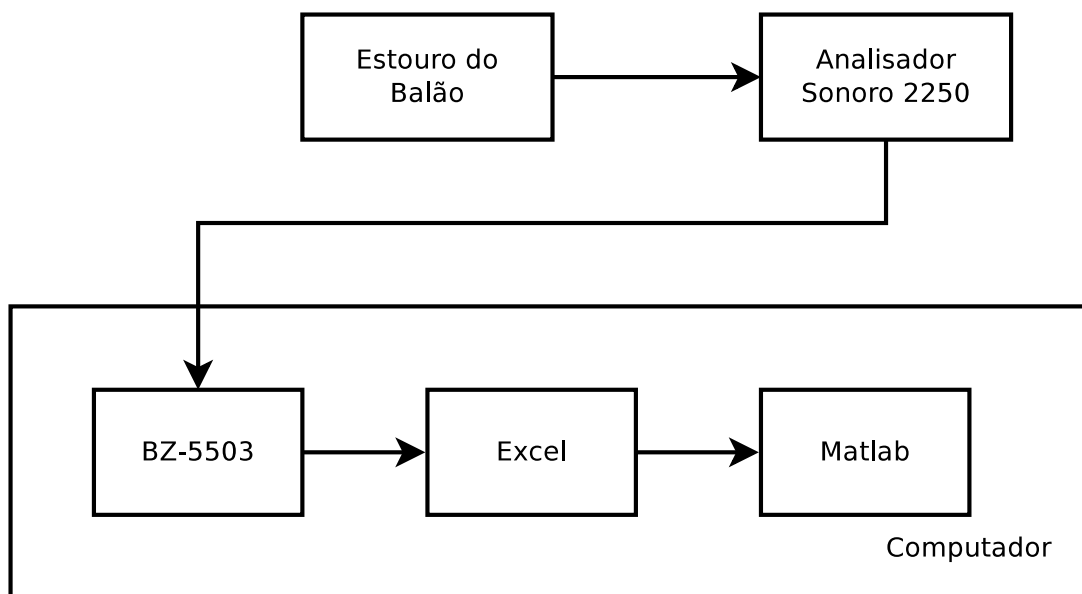


Figura 27 – Diagrama em Blocos dos equipamentos e *softwares* utilizados para implementação do método de Estouro do Balão.

3.6.2 Fonte de Ruído Interrompida (FRI)

Para a implementação do método FRI, foi utilizado um *setup* bem parecido com o descrito na subseção 3.6.1, diferindo apenas no sinal, que era gerado pelo próprio analisador sonoro B&K 2250 e reproduzido por um dos dois tipos de fonte (o dodecaedro ou o monitor de áudio).

O diagrama em blocos representado na Figura 28 ilustra os *softwares* e equipamentos utilizados na análise dos parâmetros acústicos da sala utilizando o método de Fonte de Ruído Interrompida.

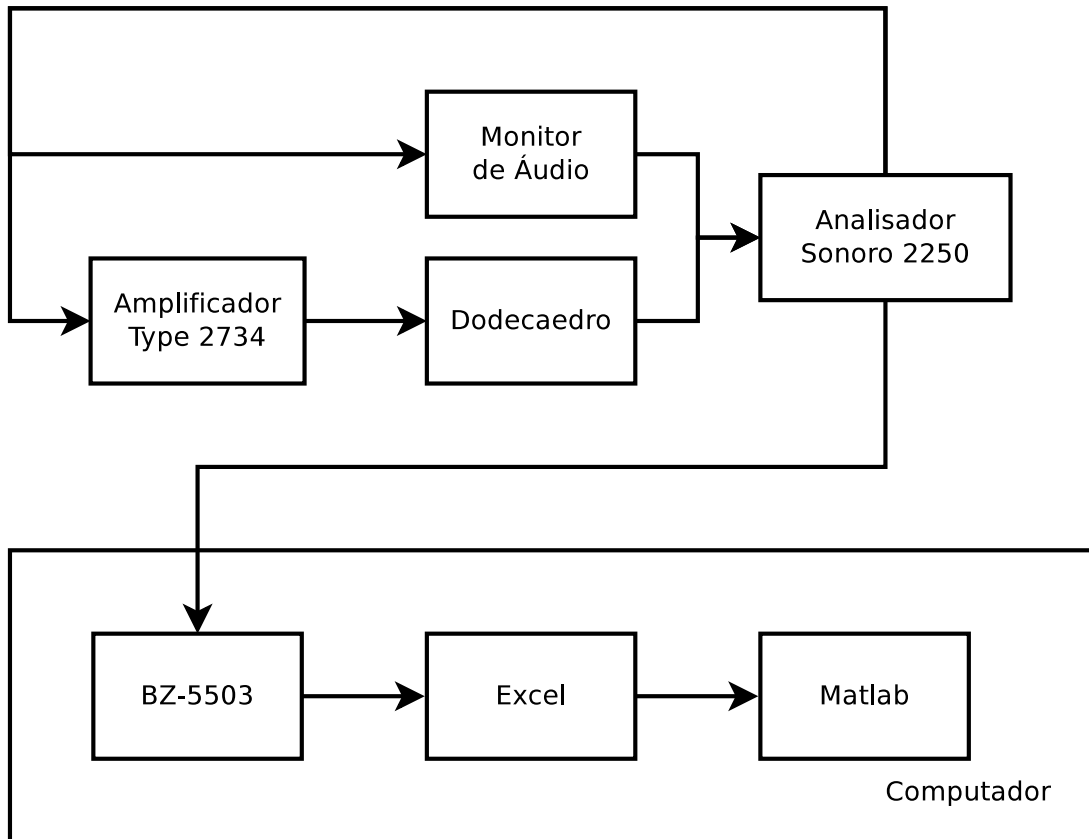


Figura 28 – Diagrama em Blocos dos equipamentos e *softwares* utilizados para implementação do método de Fonte de Ruído Interrompida.

3.6.3 Varredura Exponencial dos Senos (VES)

O método VES foi implementado de forma particionada, utilizando diversos *softwares*. Optou-se por este procedimento sequencial para se ter o acompanhamento de cada etapa do processo, fugindo assim de *softwares* que realizassem todos os passos de geração de sinais e cálculos dos parâmetros de forma automática.

Os passos realizados para a implementação deste método estão enumerados a seguir:

1. Criação do Sinal Exponencial e do Filtro Inverso - Os arquivos de áudio do sinal utilizado para realizar a varredura exponencial dos senos e o seu filtro inverso (utilizado para realizar a deconvolução) foram criados utilizando o *plugin Aurora 2.0.0* (FARINA), o qual opera no *software Audacity*.

Dados do sinal gerado pelo *plugin Aurora*:

- Duração do sinal de varredura: 10 s
 - Tempo de silêncio gerado após o Sinal de varredura: 8s
2. Reprodução da VES e gravação de suas respostas em cada posição de medição nas salas - Utilizou-se o *Logic PRO X* como *Digital Audio Workstation* (DAW) por questão de familiaridade, mas qualquer outro programa de gravação de áudio poderia

ter sido utilizado. A principal vantagem deste tipo de *software* é a visualização em tempo real do sinal gravado, facilitando assim a detecção de erros como a saturação.

3. Deconvolução dos sinais gravados - Para a obtenção das RI referente a cada ponto da sala, foi criado um *script* no *Matlab* para realizar a deconvolução dos sinais gravados nas salas com o filtro inverso gerado pelo *Aurora*.
4. Cálculo dos Parâmetros Acústicos (PA) - O cálculo dos PA em terço de oitava foi realizado utilizando o *software Dirac 6.0*. O *plugin Aurora* também realiza tal procedimento, porém o cálculo é realizado apenas em banda de oitava, justificando assim a escolha do primeiro programa.
5. Análise e comparação dos resultados - O último passo foi importar os PA calculados pelo *Dirac 6.0* para o *Matlab* para realizar análises mais apuradas e comparações entre os diferentes métodos de medição das RI.

Assim como no método FRI descrito na seção 3.6.2, a VES foi gravada utilizando dois tipos de fonte: o monitor de áudio (direcional) e o dodecaedro (omnidirecional). Além disto, este procedimento foi realizado utilizando dois tipos de receptor sonoro, o analisador sonoro 2250 e o microfone ECM 8000.

A Figura 29 ilustra o diagrama em blocos contendo os equipamentos e softwares utilizados para a implementação da VES com o microfone ECM 8000 e os dois tipos de fonte.

3.7 Divisão do Espectro em Regiões

Os resultados para os terços de oitava abordam uma extensa faixa do espectro cujas frequências centrais vão de 25 Hz até 10 kHz. Para facilitar as análises e a apresentação dos resultados, o espectro foi dividido nas seguintes regiões:

- ❑ Sub-Grave: terços de oitava com frequências centrais de 25 Hz até 80 Hz;
- ❑ Grave: de 100 Hz até 315 Hz;
- ❑ Média: de 400 Hz até 1,25 kHz;
- ❑ Aguda: de 1,6 kHz até 10 kHz.

3.8 Lista de Materiais e Equipamentos

A implementação de métodos de medição de parâmetros acústicos requer uma montagem cuidadosa e bem planejada para gerar dados com alta confiabilidade e evitar falsas

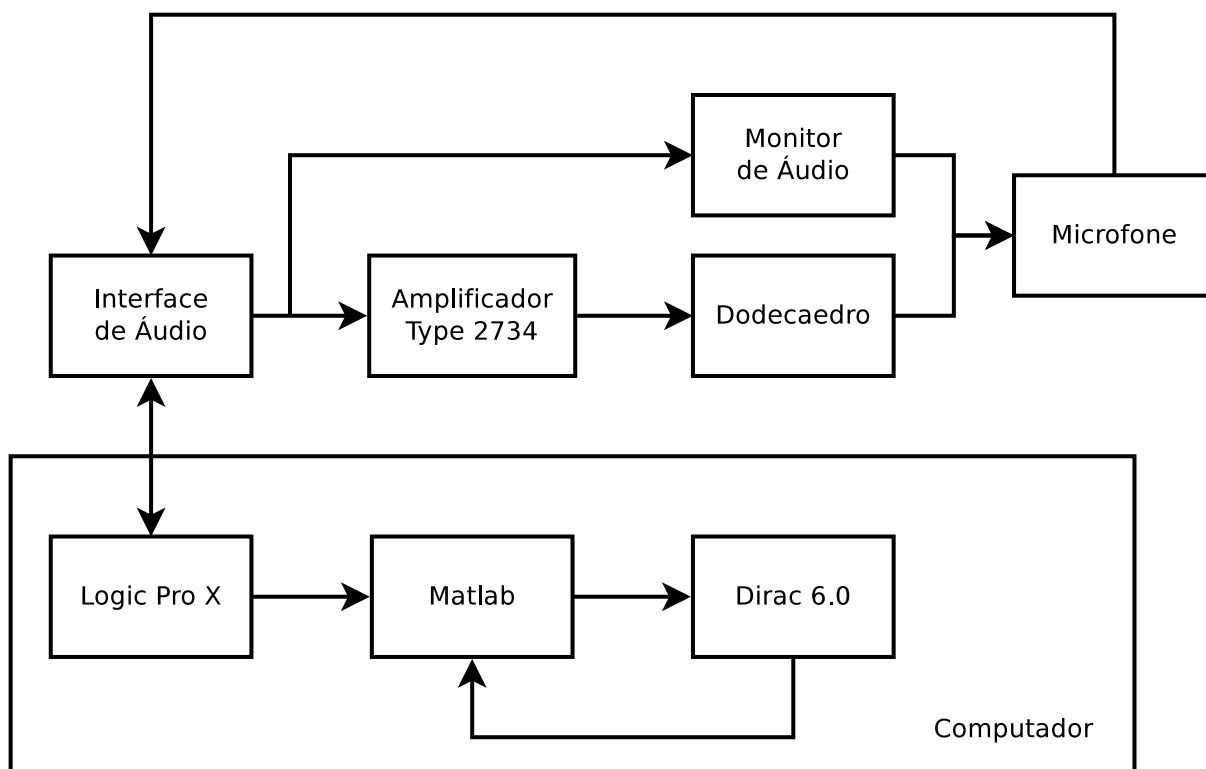


Figura 29 – Diagrama em Blocos dos equipamentos e *softwares* utilizados para implementação do método de Varredura Exponencial dos Senos.

medições, que podem levar a uma análise equivocada da qualidade acústica de determinado ambiente. Desta forma, durante a fase de testes acústicos foram utilizados os melhores equipamentos e materiais disponíveis, que foram montados e conectados com extrema cautela, sempre mantendo a atenção para evitar possíveis erros durante as medições. Quando houve a ocorrência de algum erro (como a saturação de algum sinal gravado), a medição era refeita para não interferir nos resultados.

A Tabela 3 apresenta a lista de materiais e equipamentos utilizados para a implementação dos métodos VES, EB e FRI.

Considerações

Neste capítulo foram apresentadas as salas utilizadas e os materiais inseridos na sala 06 para tratamento e controle acústico. Em seguida, foram detalhados os equipamentos de reprodução e captação sonora, os pontos de medição e a implementação dos métodos de Estouro do Balão (EB), de Fonte de Ruído Interrompida (FRI) e de Varredura Exponencial dos Senos (VES). Por fim, apresentou-se uma lista de materiais e equipamentos. No capítulo a seguir, são apresentados os principais resultados para uma posição de medição para o Tempo de Reverberação (RT) em cada sala considerando a comparação entre os métodos de medição, entre os equipamentos de reprodução sonora, entre as posições de

Tabela 3 – Lista de materiais e equipamentos utilizados para a implementação dos métodos Varredura Exponencial dos Senos (VES), Estouro do Balão (EB) e Fonte de Ruído Interrompida (FRI)

| Material/Equipamento | Modelo | Quantidade |
|-----------------------------|---------------------------|-------------------|
| Analisador Sonoro | B&K <i>Type</i> 2250 | 1 |
| Tripé de Câmera Fotográfica | - | 1 |
| <i>Notebook</i> | Macbook Pro 13" | 1 |
| Interface de Áudio | MOTU UltraLite-mk3 Hybrid | 1 |
| Dodecaedro | B&K <i>Type</i> 4292-L | 1 |
| Pedestal do Dodecaedro | - | 2 |
| Amplificador do Dodecaedro | B&K <i>Type</i> 2734-A | 1 |
| Monitor de Áudio | M-Audio Studiophile BX5 | 1 |
| Microfone | Behringer ECM8000 | 1 |
| Cabo XLR | 10 metros | 3 |
| Pedestal de Microfone | - | 2 |
| Estante de Partitura | - | 1 |
| Adaptador de Áudio | XLR para P10 estéreo | 1 |
| Pedestal de Microfone | - | 2 |
| Saco de Balão | 50 peças | 3 |
| Alfinete | - | 1 |
| Extensão de energia | 10 metros | 2 |
| Fita Crepe | - | 1 |
| Fita Isolante | - | 1 |
| Trena | - | 1 |
| Câmera Fotográfica | Canon EOS Rebel T3i | 1 |
| Caderno de Anotações | - | 1 |

receptor e de fonte. Posteriormente, são apresentados os valores médios para o RT e uma análise de sua variabilidade em função da posição da fonte e do receptor.

Resultados: Tempo de Reverberação

Através dos experimentos realizados para as 3 configurações acústicas estudadas, Sala 06 com Painéis Fechados (06PF), Sala 06 com Painéis Abertos (06PA) e Sala 08 (08), foi obtido um grande número de resultados que possibilitaram a análise e a comparação de diversas características dos procedimentos para a medição de descritores acústicos, como o Tempo de Decaimento Inicial (EDT), a Clareza (C_{80}), a Definição (D_{50}), o Tempo Central (T_S) e o Tempo de Reverberação (RT). Este último, por ser o parâmetro mais conhecido e de mais relevância em projetos acústicos, foi abordado de forma aprofundada neste capítulo, resultando no estudo da alteração dos seguintes materiais e métodos:

- ❑ Fonte Sonora: Monitor de Áudio e Dodecaedro ¹.
- ❑ Método de Medição: Varredura Exponencial dos Senos (VES), Fonte de Ruído Interrompida (FRI) e Estouro do Balão (EB).
- ❑ Configuração Acústica: Sala 06 com Painéis Abertos (06PA) (menor reverberação), Sala 06 com Painéis Fechados (06PF) e Sala 08 (sem tratamento e maior reverberação).
- ❑ Posição da Fonte: 3 Posições para as fontes (F1, F2 e F3).
- ❑ Posição do Microfone: 5 Posições para o microfone (M1, M2, M3, M4 e M5).

Devido à grande quantidade de variações que poderiam ser comparadas, foi adotada a seguinte configuração padrão, para que o impacto da alteração de cada um destes materiais e métodos pudesse ser estudado em uma situação de acústica variável:

- ❑ Fonte Sonora: Dodecaedro;
- ❑ Método de Medição: Varredura Exponencial dos Senos (VES) ²;

¹ A variação do tipo de fonte sonora ocorreu apenas nos métodos VES e FRI, pois no método impulsivo utilizou-se como fonte apenas o estouro do balão.

² Para o método impulsivo (EB) foi utilizado o estouro do balão como fonte sonora.

- Posição da Fonte: F1;
- Posição do Microfone: M1.

O impacto da alteração de cada um destes materiais e métodos está apresentado nas seções 4.1 a 4.4, e posteriormente é apresentado o T_{20} médio por terço de oitava, por região do espectro e a Frequência de Schroeder (F_s) para cada sala. Em seguida, nas seções 4.5.3 e 4.5.4 é mostrado o resultado da comparação entre os valores médios de T_{20} para os 3 métodos de medição e para os tipos de equipamentos de reprodução sonora. Por último, na Seção 4.6 é apresentado o resultado do estudo da variabilidade do RT em função da posição da fonte e do receptor.

Um estudo inicial para os outros parâmetros acústicos medidos é apresentado no Capítulo 5.

4.1 Comparação entre os métodos de medição

A Figura 30 apresenta os resultados obtidos para o parâmetro T_{20} por terço de oitava para cada um dos 3 métodos utilizados na análise: Varredura Exponencial dos Senos (VES), Estouro do Balão (EB) e Fonte de Ruído Interrompida (FRI). Estes testes foram realizados na Sala 06 com painéis fechados (Sala 06PF), utilizando o dodecaedro como fonte no ponto F1 e o microfone no M1.

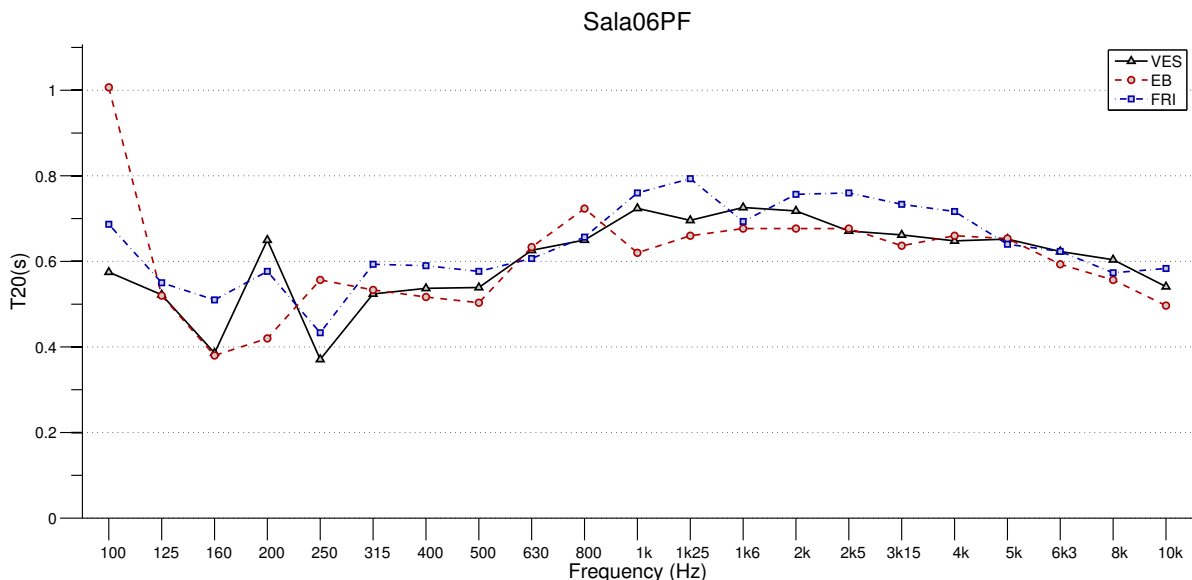


Figura 30 – Resultado da variação do método de medição para a Sala 06 com painéis fechados.

De forma geral, nenhum dos métodos trouxe resultados discrepantes. Porém, em algumas faixas de frequências, observaram-se valores com diferenças significativas, como

pode ser observado para $f = 100$ Hz, onde o método EB calculou um tempo de reverberação com valor de quase o dobro do encontrado com o método VES (1,007 s e 0,575 s respectivamente).

Outras diferenças significativas também aparecem na região grave, assim como para as frequências de 200 Hz e 250 Hz, que apresentaram diferenças para o T_{20} de 0,23 s e de 0,19 s. Para as frequências citadas, pôde-se observar uma alternância entre os maiores e menores valores, pois para $f = 100$ Hz o método VES foi o que obteve o menor valor e o EB o maior. Já para $f = 200$ Hz, o EB foi o que obteve o menor valor e o VES o maior. Para $f = 250$ Hz os métodos com valores máximo e mínimo novamente se alternaram.

Para a faixa de frequência acima de 1,25 kHz, os métodos VES e EB apresentaram resultados muito próximos com diferenças de até 0,05 s. Já o método FRI apresentou valores maiores que os dos outros métodos apenas na faixa de frequência de 2,5 kHz até 4 kHz, apresentando valores que divergem em até cerca de 0,1 s. Já para as faixas de frequência de 125 Hz, 630 Hz e 5 kHz, os valores encontrados foram praticamente os mesmos para os testes realizados com os 3 métodos.

As figuras 31 e 32 apresentam os resultados para as outras configurações acústicas: a Sala 06, desta vez com os painéis abertos (Sala 06PA), e a Sala 08, sendo que ambas as medições também foram realizadas com o dodecaedro e o microfone nas mesmas posições em relação aos resultados apresentados para a Sala 06PF. Para as duas salas, de forma geral, não houve resultados discrepantes, novamente, em nenhum dos 3 métodos de medição utilizados.

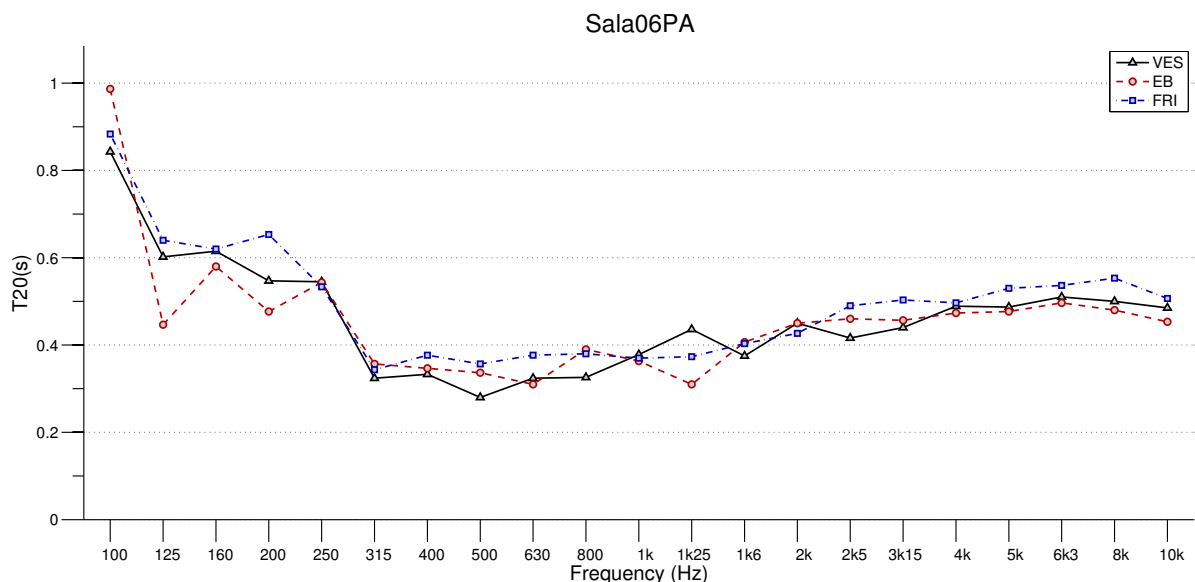


Figura 31 – Resultado da variação do método de medição para a Sala 06 com painéis abertos.

Para os resultados de tempo de reverberação calculados para a Sala 06PA por terço de oitava (Figura 31), as maiores diferenças também apareceram na região grave do espectro,

e mais uma vez as maiores discrepâncias foram de cerca de 0,2 s para $f = 200$ Hz, e neste caso para $f = 125$ Hz, e não para 100 Hz como nos resultados da Sala 06PA.

Os métodos VES e EB apresentaram resultados semelhantes para frequências acima de 1,6 kHz. Já o método FRI apresentou valores um pouco maiores que os dos outros métodos para frequências acima de 2,5 kHz.

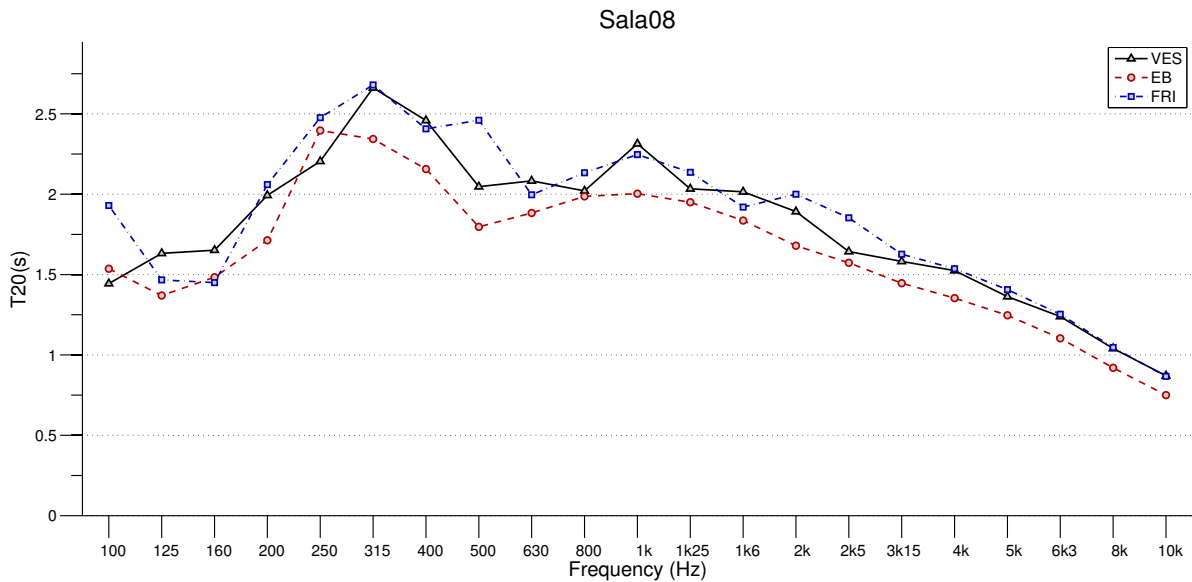


Figura 32 – Resultado da variação do método de medição para a Sala 08.

Os valores para o parâmetro acústico T_{20} calculados para a Sala 08 (figura 32) apresentaram maior discrepância para as frequências $f = 100$ Hz e $f = 500$ Hz, com diferenças de 0,49 s e 0,66 s respectivamente. Este resultado diverge dos obtidos para as salas 06PA e 06PF onde as maiores discrepâncias apareceram apenas na região dos graves.

Nesta sala, a qual possui a maior reverberação, o método EB apresentou valores menores em comparação com os outros dois procedimentos de medição para todas as frequências acima de 315 Hz, obtendo valores menores para o tempo de reverberação em 0,25 s para $f = 315$ Hz, $f = 400$ Hz e $f = 1$ kHz com relação aos métodos VES e FRI. Estes dois obtiveram resultados muito próximos para valores de frequências acima de 630 Hz, e praticamente iguais para frequências acima de 3,15 kHz.

4.2 Comparação entre os equipamentos de reprodução sonora

A variação do tipo de fonte sonora foi realizada para os métodos de Varredura Exponencial dos Senos (VES) e Fonte de Ruído Interrompida (FRI), pois o método de Estouro do Balão (EB) não utiliza a reprodução de sinais previamente gravados. O objetivo desta comparação foi averiguar a importância da utilização de uma fonte omnidirecional e que

esteja de acordo com as recomendações da norma ISO3382-2:2008, contrastando os resultados obtidos utilizando o dodecaedro com os obtidos a partir da reprodução dos sinais com o monitor de áudio.

Os resultados mostrados na Figura 33 são referentes aos valores do tempo de reverberação a partir do T_{20} para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF) e calculados a partir do método VES.

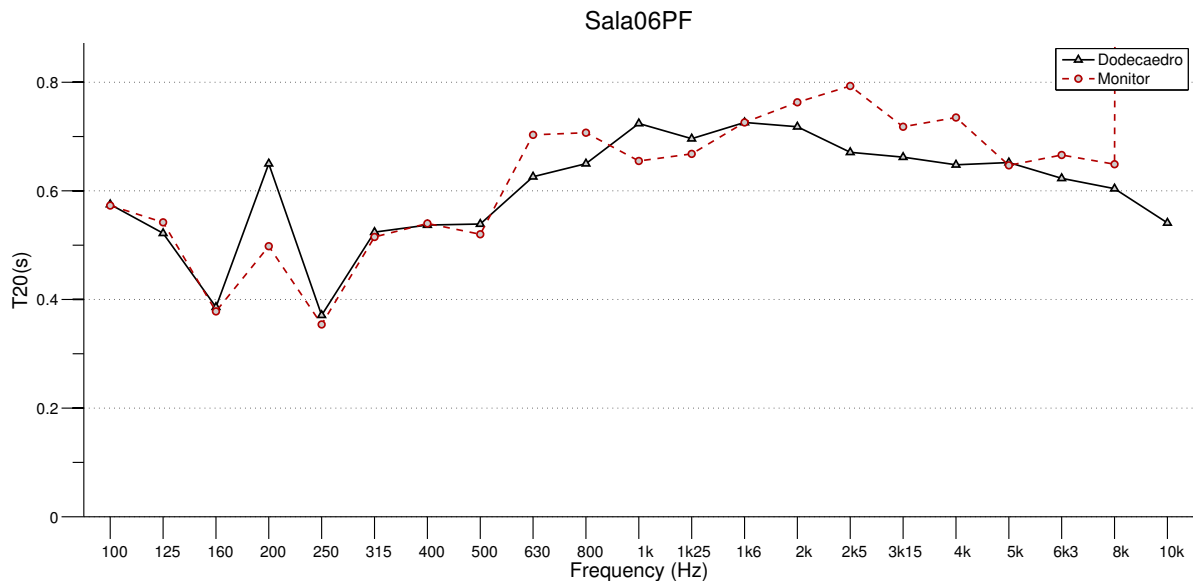


Figura 33 – Resultado da variação do tipo de fonte sonora (Dodecaedro e Monitor de Áudio) para a Sala 06 com painéis fechados.

Percebe-se que os resultados obtidos com o monitor de áudio foram bem próximos para 9 das 21 faixas de frequências (100 Hz, 125 Hz, 160 Hz, 250 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 1,6 kHz e 5 kHz). As maiores diferenças apareceram para $f = 200$ Hz e $f = 2,5$ kHz, divergindo em 0,15 s e 0,12 s respectivamente.

O valor para o tempo de reverberação calculado com o monitor de áudio para $f = 10$ kHz foi muito discrepante e errôneo. Isto ocorreu devido ao fato de o *tweeter* estar queimado, defeito que só foi detectado após a realização dos testes acústicos. Este componente é responsável pela reprodução de sons mais agudos e, neste caso, tal fonte sonora não possuía boa resposta em frequência para valores de $f > 8$ kHz (Figura 61).

Esta falha de medição também pôde ser verificada na análise referente a Sala 06 com Painéis Abertos (06PA), como representado na Figura 34. Para este caso, com exceção de tal ponto, a discrepância entre os cálculos de T_{20} para os dois tipos de fonte sonora não apresentaram valores maiores que 0,075 s.

A sala mais reverberante (Sala 08) apresentou maior concordância na comparação entre a utilização do dodecaedro e do monitor de áudio, como pode-se observar na Figura 35. Os valores calculados foram praticamente os mesmos para valores de frequências abaixo

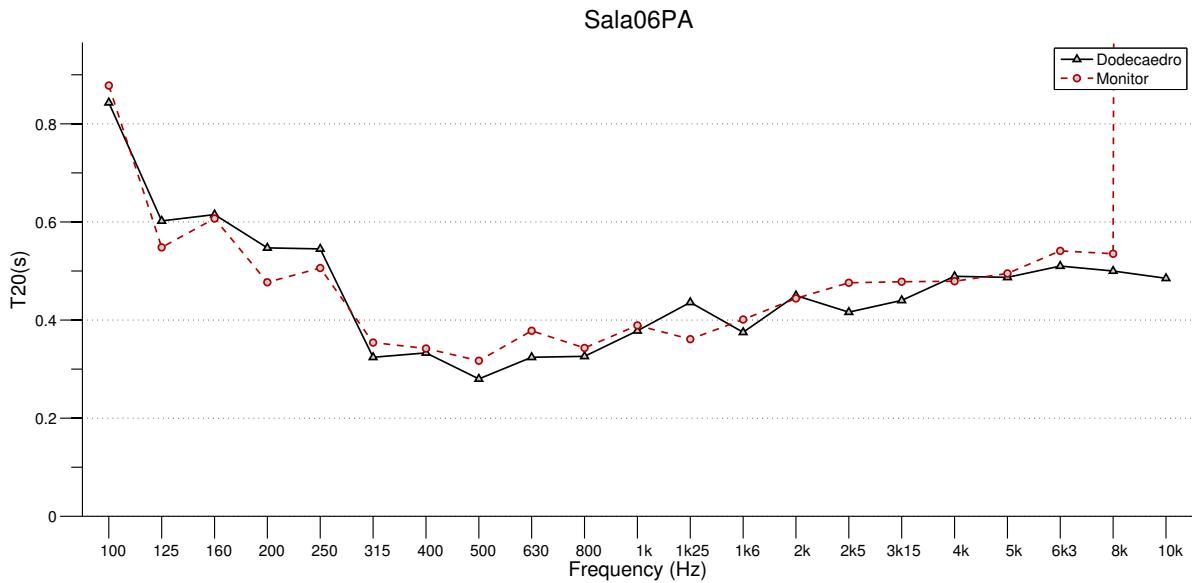


Figura 34 – Resultado da variação do tipo de fonte sonora (Dodecaedro e Monitor de Áudio) para a Sala 06 com painéis abertos.

de 315 Hz e acima de 1,25 kHz. Um fato notado, foi que o valor calculado para o tempo de reverberação em $f = 10$ kHz utilizando o monitor de áudio não apresentou erro assim como nos resultados obtidos para as salas 06PF (Figura 33) e 06PA (Figura 34). Isto ocorreu devido a alta reverberação da sala 08, o que aumenta a energia sonora do sinal captado pelo microfone.

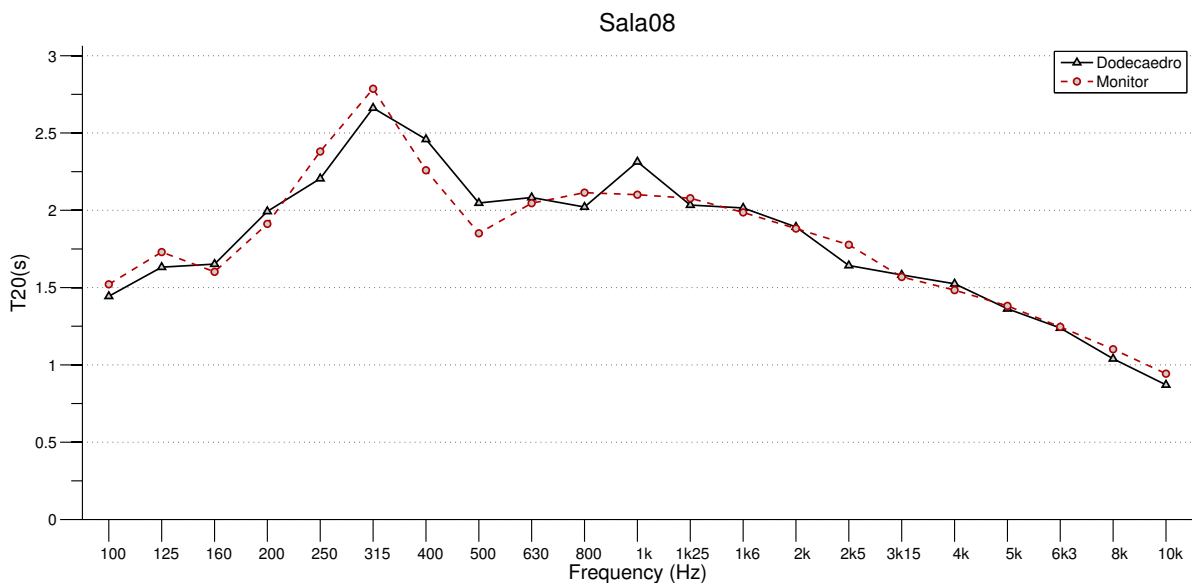


Figura 35 – Resultado da variação do tipo de fonte sonora (Dodecaedro e Monitor de Áudio) para a Sala 08.

4.3 Comparação entre as posições de receptor

Para ter uma completa caracterização do campo acústico no interior das salas analisadas, optou-se pela utilização de 5 posições de receptor ($M1$ até $M5$). Tal análise também foi realizada para as 3 configurações acústicas estudadas (salas Sala 06 com Painéis Abertos (06PA), Sala 06 com Painéis Fechados (06PF) e Sala 08. Os resultados apresentados a seguir foram obtidos com a implementação do método Varredura Exponencial dos Senos (VES) utilizando o dodecaedro como fonte sonora e posicionado no ponto $F1$.

O resultado para o cálculo de T_{20} para a Sala 06PF está representado na Figura 36 e, como é possível observar, a oscilação de valores foi baixa para a região de frequências agudas, com variação até 0,07 s, como a obtida para o terço de oitava de frequência central igual a 2,5 kHz. Já nas regiões de frequências médias e principalmente na de graves a flutuação foi significativa.

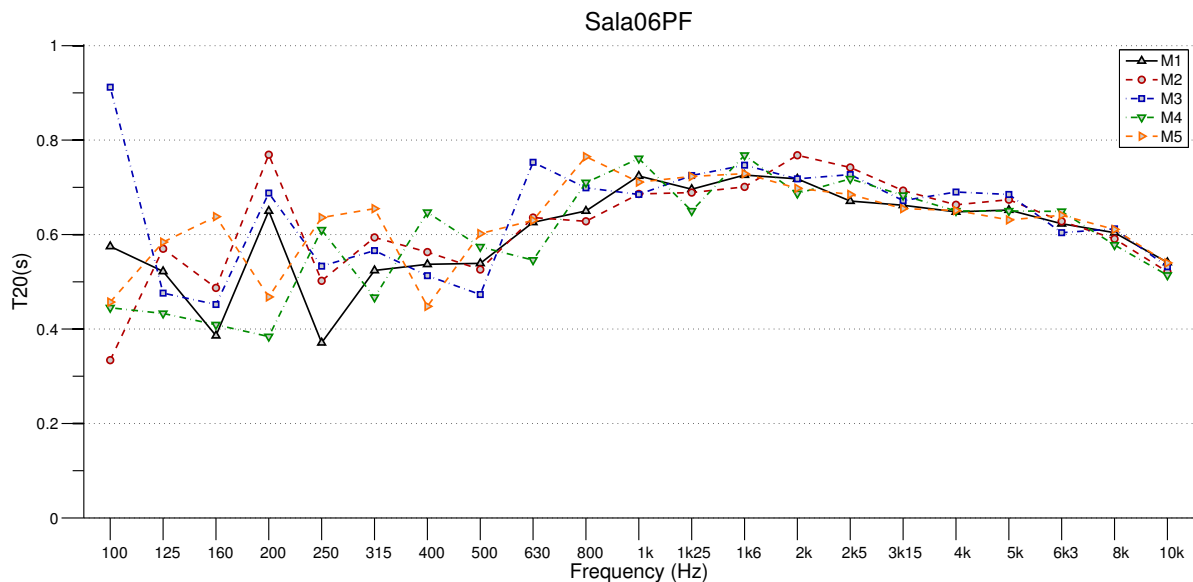


Figura 36 – Resultado da variação da posição do microfone ($M1$ até $M5$) para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF).

A maior diferença entre os valores medidos foi para as análises nos pontos $M3$ e $M2$ na frequência de 100 Hz, igual a 0,58 s. Outros pontos que apresentaram grande variabilidade foram os de frequências iguais a 160 Hz, 200 Hz e 250 Hz, com diferenças máximas de 0,25 s, 0,38 s e 0,26 s entre os pontos $M5$ e $M1$, $M2$ e $M4$, e $M5$ e $M1$ respectivamente.

Em comparação com a sala 06PF, a sala 06PA também apresentou baixa variabilidade para o cálculo de T_{20} na região de agudos (ver Figura 37), com um valor máximo de 0,073 s entre os pontos $M2$ e $M3$ para $f = 2,5$ kHz. Já para a região de médios, flutuação para os dados calculados nos diferentes pontos foi menor, com diferenças de até 0,15 s (valor entre $M2$ e $M3$ para $f = 500$ Hz).

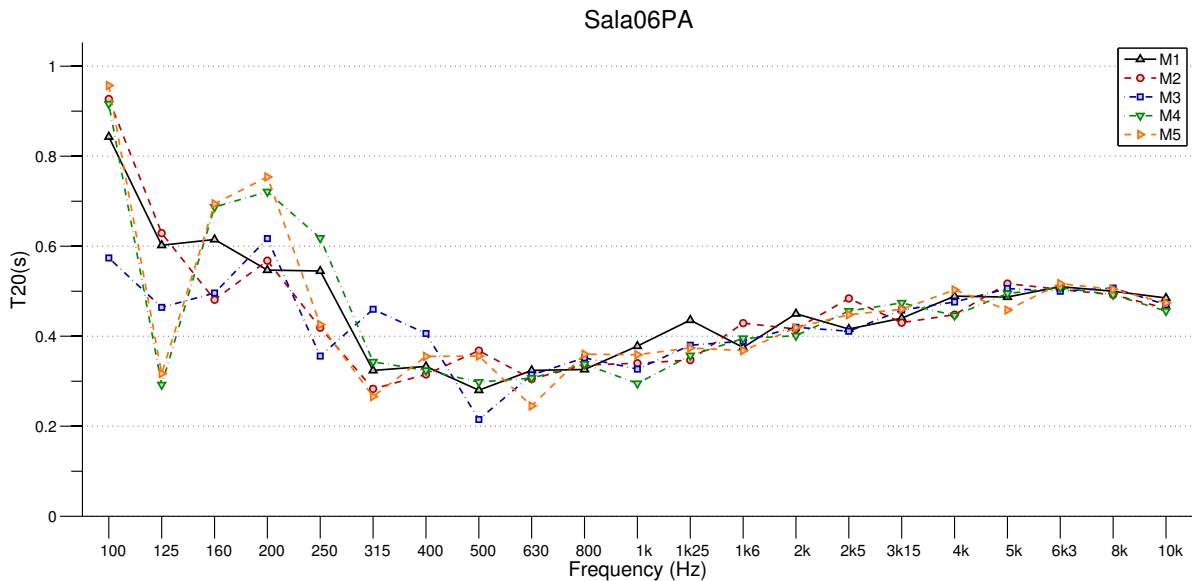


Figura 37 – Resultado da variação da posição do microfone ($M1$ até $M5$) para a Sala 06 com Painéis Abertos (06PA).

Para a Sala 06PA, a região de graves também apresentou as maiores discrepâncias na variação da posição do microfone, com maiores diferenças de 0,38 s, 0,33 s e 0,26 s para as frequências de 100 Hz, 125 Hz e 250 Hz entre os pontos $M5$ e $M3$, $M2$ e $M4$, e $M4$ e $M3$ respectivamente.

Os resultados para a variação da posição do microfone da Sala 08 estão ilustrados na Figura 38, onde observou-se uma menor variação no cálculo do tempo de reverberação para todas as faixas de frequências em comparação com as demais salas.

4.4 Comparação entre as posições de fonte

O estudo do efeito da variação da posição da fonte foi realizado através do posicionamento do dodecaedro em 3 pontos distintos das salas: $F1$, $F2$ e $F3$. Tal experimento foi realizado para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF), Sala 06 com Painéis Abertos (06PA) e Sala 08 (08) e a seguir é mostrada uma análise detalhada para o método Varredura Exponencial dos Senos (VES) e com o microfone posicionado em $M1$.

A Figura 39 ilustra o resultado da variação da posição da fonte para a Sala 06PF, sendo possível observar que a partir de $f = 1,25$ kHz ambas as posições apresentaram resultados muito parecidos, com pontos em divergência de apenas 0,08 s e 0,054 s para a fonte em $F1$ em $f = 2,5$ kHz e $f = 3,15$ kHz respectivamente.

Para a faixa de frequências médias, as posições $F1$ e $F3$ obtiveram resultados parecidos para o cálculo de T_{20} , exceto em $f = 400$ Hz onde o valor do tempo de reverberação foi menor em 0,128 s. Entretanto, para a fonte posicionada em $F2$, houve divergência em

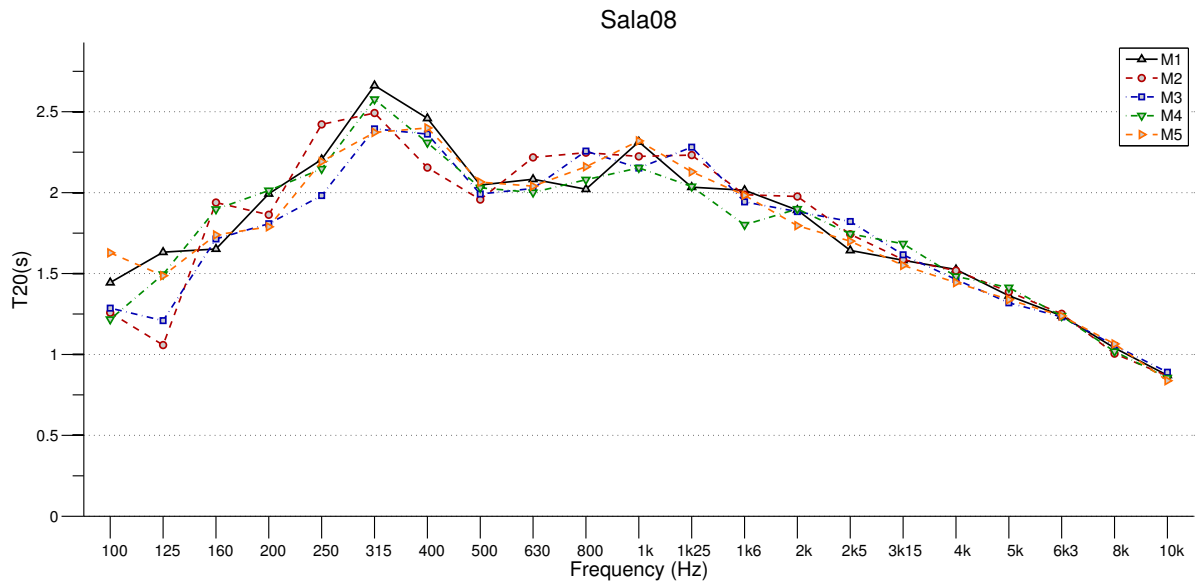


Figura 38 – Resultado da variação da posição do microfone ($M1$ até $M5$) para a Sala 08 (08).

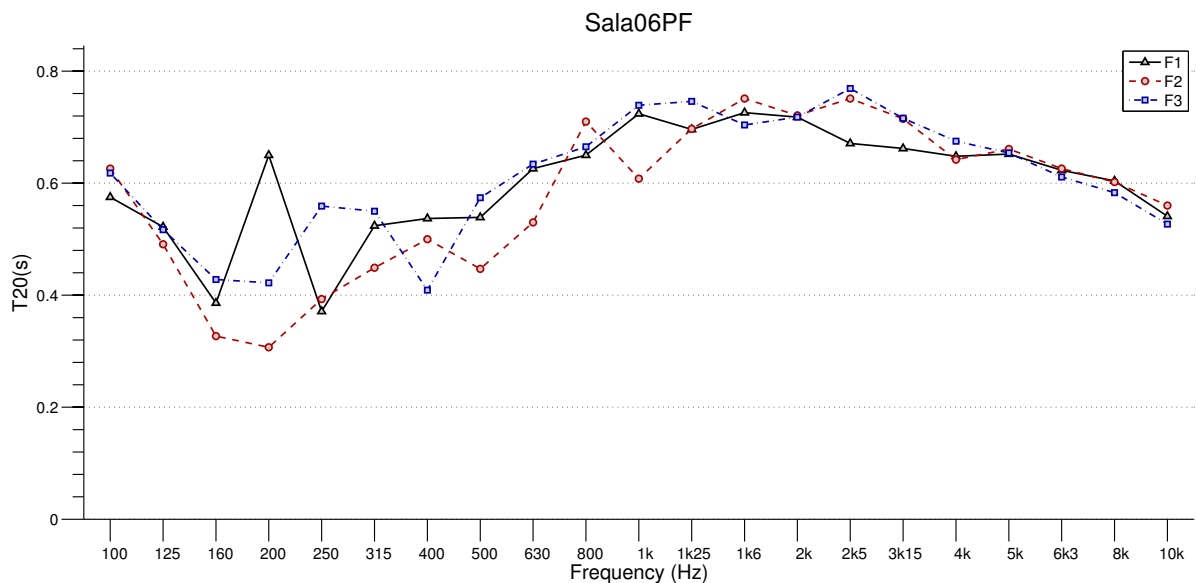


Figura 39 – Resultado da variação da posição do dodecaedro ($F1$ até $F3$) para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF).

comparação com as demais posições para todos os terços de oitava analisados na faixa de médios.

A faixa de frequências graves apresentou resultados próximos para frequências até $f = 160$ Hz, mas também as maiores discrepâncias, assim como para $f = 200$ Hz onde o valor para $F1$ foi maior que o dobro do calculado para $F2$, com diferença de 0,343 s, e para $f = 250$ Hz variando de 0,188 s entre $F3$ e $F1$.

Em comparação com a Sala 06PF, a Sala 06PA apresentou menor variabilidade no cálculo do tempo de reverberação em relação ao posicionamento da fonte para o método VES, assim como representado no gráfico da Figura 40. A região de frequências agudas, novamente foi a que teve a maior similaridade nos valores calculados para o T_{20} , onde a maior diferença apresentada foi o acréscimo de 0,066 s para o tempo de reverberação no ponto $F3$ em relação aos demais para $f = 1,6$ kHz. Na região de médios, também não se observaram grandes discrepâncias, com a maior delas de 0,153 s ocorrendo para a frequência de 400 Hz.

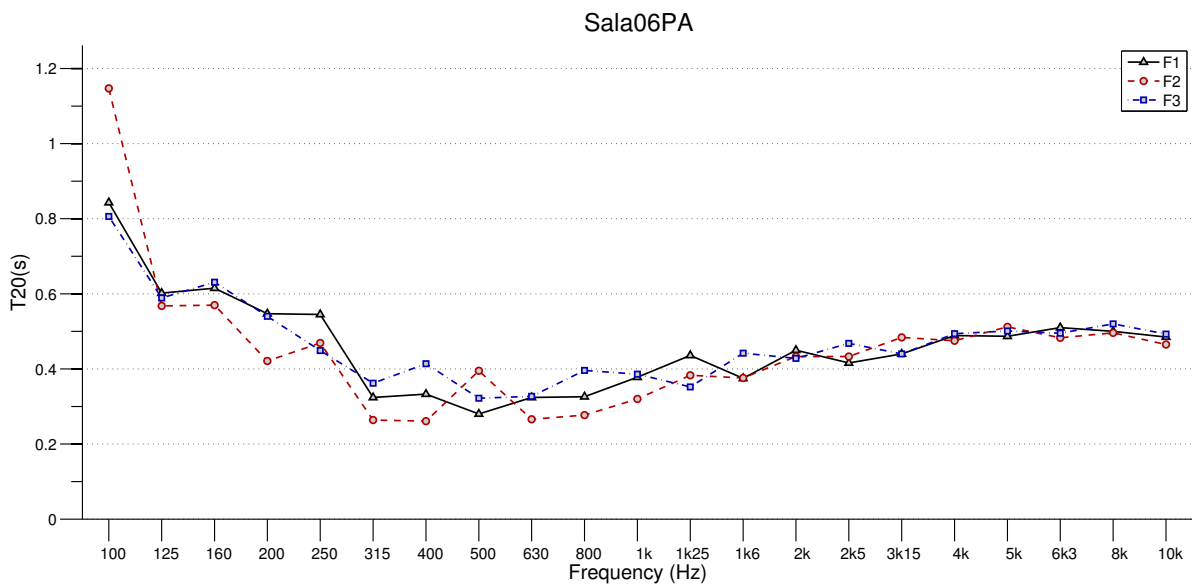


Figura 40 – Resultado da variação da posição do dodecaedro ($F1$ até $F3$) para a Sala 06 com Painéis Abertos (06PA).

Em contraste com a Sala 06PF, a sala menos reverberante apresentou valores muito próximos para as posições de fonte $F1$ e $F3$ na faixa de frequências graves, com exceção em $f = 250$ Hz onde o valor para $F1$ foi 0,096 s maior e para $f = 100$ Hz, onde o valor de T_{20} foi maior em 0,304 s comparando os pontos $F2$ e $F1$. De forma geral, os resultados tiveram uma menor variabilidade em comparação aos da sala 06PF para frequências até 315 Hz.

Os resultados obtidos para a Sala 08 estão representados na Figura 41, sendo que na região de agudos, as três posições de fonte apresentaram resultados praticamente iguais exceto para $f = 2,5$ kHz, na qual a posição de fonte $F1$ apresentou um valor para o T_{20} menor em 0,14 s do que o calculado para $F2$ e $F3$.

Para as frequências a partir de 400 Hz os dados obtidos com o dodecaedro posicionado em $F2$ e $F3$ foram praticamente iguais, com exceção do ponto para $f = 1,25$ kHz, ou seja, podemos considerar que para estas posições de fonte, o tempo de reverberação varia apenas na região de frequências graves na sala mais reverberante. Em tal região do

espectro os resultados também foram parecidos, tendo como pontos mais divergentes os de $f = 100$ Hz e $f = 250$ Hz com diferenças de 1,087 s e 0,718 s entre $F2$ e $F3$.

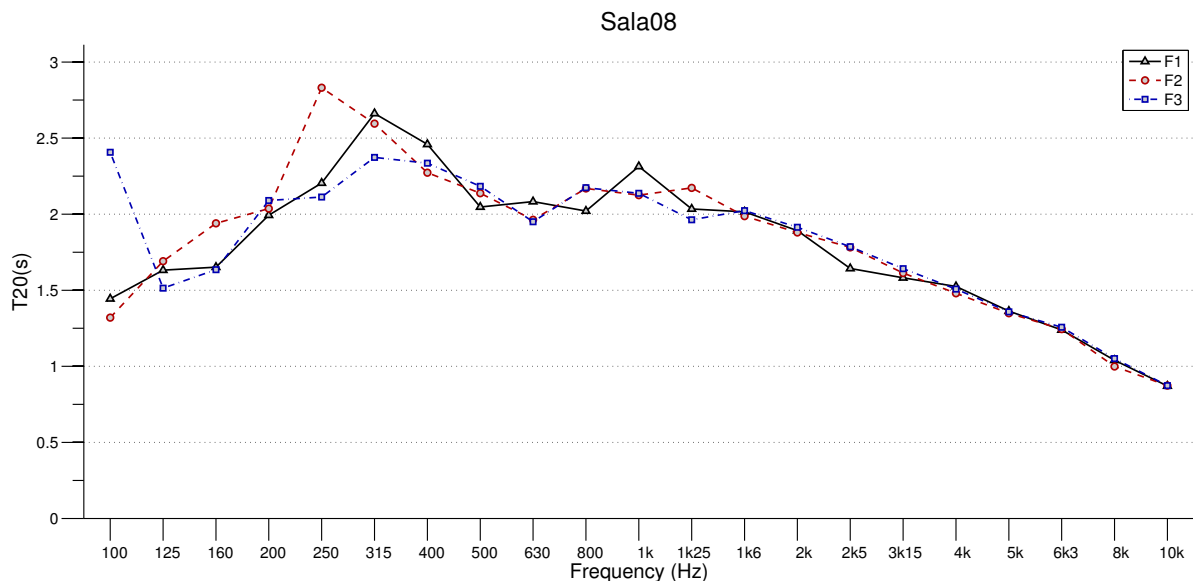


Figura 41 – Resultado da variação da posição do dodecaedro ($F1$ até $F3$) para a Sala 08.

4.5 Tempo de Reverberação Médio

A norma ISO3382-2:2008 apresenta duas formas para o cálculo do tempo de reverberação médio: medir o parâmetro acústico para cada curva de decaimento e depois calcular uma média; ou calcular a média das curvas de decaimento e depois calcular o tempo de reverberação. Para a análise apresentada nesta seção, optou-se pela utilização do primeiro método.

A Figura 42 apresenta o resultado do T_{20} médio obtido com o método Varredura Exponencial dos Senos (VES) para os 3 tipos de sala. Ao se realizar a média espacial dos valores, pode-se observar uma suavização da curva do tempo de reverberação para cada sala, ou seja, os picos que aparecem principalmente nas regiões frequências grave e médias são reduzidos, o que pode ser observado ao comparar esta figura com as apresentadas nas seções 4.1 a 4.4.

A análise da Figura 42 deixa claro a grande alteração no tempo de reverberação causada pela inserção do tratamento acústico, como por exemplo para terço de oitava de 315 Hz, onde o valor obtido para o T_{20} para a Sala 08 foi de 2,54 s e para a Sala 06PA foi de 0,35 s, uma redução de 86,2 %.

Com as alterações nas aletas dos módulos de acústica variável é possível obter valores intermediários entre as curvas das salas 06PA e 06PF. Nota-se que com a abertura dos módulos, o tempo de reverberação aumenta para os terços de oitava entre 100 Hz e 200 Hz

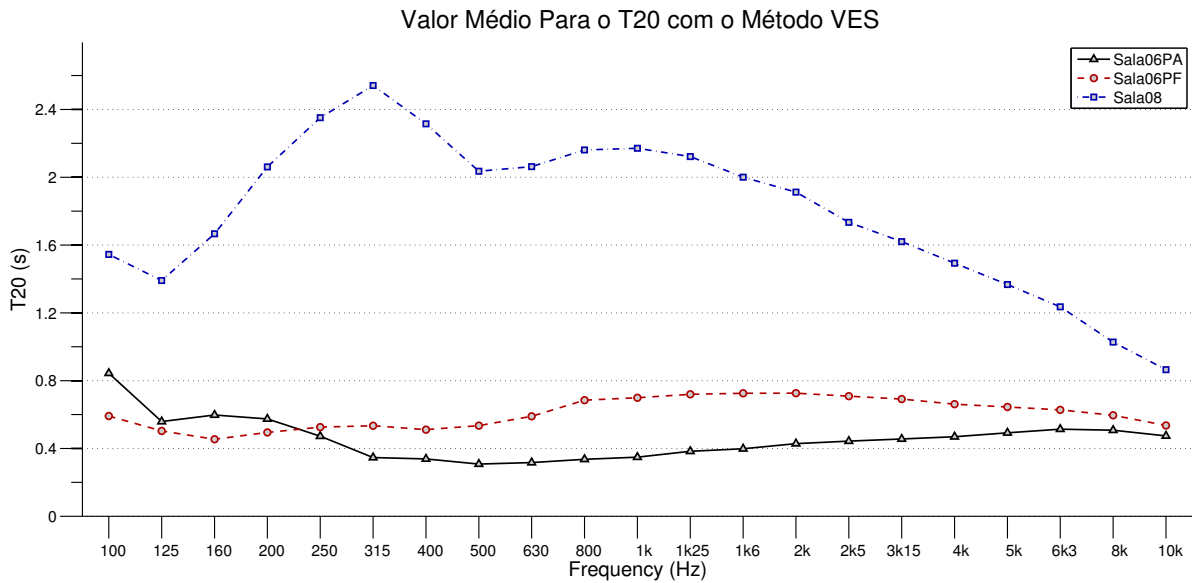


Figura 42 – Tempo de reverberação médio para os 3 tipos de sala calculado a partir do método VES (Sala 06 com Painéis Abertos (06PA), Sala 06 com Painéis Fechados (06PF) e Sala 08 (08)).

devido ao aumento do volume da sala. Outro impacto nesta região, é que os painéis fechados tendem a funcionar como armadilha de grave.

Para valores acima 250 Hz, esta alteração causa uma redução no tempo de reverberação, pois ao chegar nos módulos de acústica variável o som passa pela abertura das aletas, chegando diretamente no material fono absorvente.

Com a instalação dos módulos de acústica variável, esperava-se uma maior excursão para os valores do tempo de reverberação ao longo do espectro, porém mesmo com todos os painéis fechados a sala se mostrou com um baixo valor para T_{20} , o que pode ser explicado pelo fato dos módulos fixados no teto serem abertos em suas laterais, e mesmo estando fechados, boa parte do som penetra diretamente no material fono absorvente.

4.5.1 Tempo de Reverberação Médio por Região do Espectro

Outra forma de apresentar os resultados é a partir do cálculo do valor médio para as regiões de frequências grave ($T_{20,B}$), médias ($T_{20,M}$) e agudas ($T_{20,T}$), e também um valor médio global ($T_{20,A}$). Esses valores foram calculados para os dados obtidos com o método VES para os 3 tipos de salas e os resultados são apresentados na Tabela 4.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, observou-se que com a abertura dos painéis o tempo de reverberação aumenta de 0,52 s para 0,57 s na região grave do espectro, tendo um impacto pequeno nesta faixa de frequências. Já nas regiões de frequências médias e agudas ele cai de 0,62 s para 0,34 s e de 0,66 s para 0,46 s respectivamente, sendo que o maior impacto desta alteração ocorreu na região do $T_{20,M}$, o que vai ao

Tabela 4 – Valores médios para o tempo de reverberação (s) por região do espectro para os 3 tipos de sala (B - graves, M - médias, T - agudas e A - global).

| Sala | $T_{20,B}$ | $T_{20,M}$ | $T_{20,T}$ | $T_{20,A}$ |
|-------------|------------|------------|------------|------------|
| 06PA | 0,57 | 0,34 | 0,46 | 0,46 |
| 06PF | 0,52 | 0,62 | 0,66 | 0,61 |
| 08 | 1,93 | 2,14 | 1,47 | 1,79 |

encontro do que foi observado na Figura 42.

Para a Sala 08 foi constatado que o maior tempo de reverberação aparece para as frequências médias (2,14 s), um valor muito alto para sua utilização como sala de aula, e também para o ensino e prática de instrumentos musicais.

A Sala 06PF foi a que obteve os valores mais próximos para as diversas faixas de frequências, ao contrário do obtido para a Sala 06PA onde o $T_{20,M}$ foi significativamente menor que o $T_{20,B}$, e para a Sala 08 onde o $T_{20,M}$ foi maior que o $T_{20,T}$ em 0,67 s.

A partir da análise do tempo de reverberação global ($T_{20,A}$), verificou-se que a sala com menor reverberação é a Sala 06 com Painéis Abertos (06PA), como era de se esperar, e que o fechamento dos painéis altera o tempo de reverberação em apenas 0,1 s para a sala Sala 06 com Painéis Fechados (06PF). Já a sala 08 foi a que obteve o maior valor para $T_{20,A}$, indo ao encontro do que foi o vivenciado durante as medições e estudos realizados, onde percebeu-se uma alta reverberação neste ambiente.

4.5.2 Cálculo da Frequência de Schroeder

A Frequência de Schroeder é um dado importante na análise dos parâmetros medidos, pois nas frequências acima de seu valor, os modos acústicos se sobrepõem no espectro, desaparecendo nesta região a percepção de seus efeitos individuais.

Os valores para tal variável foram calculados de acordo com a Equação 28, considerando o volume da sala de acordo com o apresentado na Tabela 1 e os tempos de reverberação globais ($T_{20,A}$) para cada sala assim como apresentado na Tabela 4. Tais resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores para as frequências de Schroeder (Hz) de cada sala.

| Sala | F_s |
|-------------|-------|
| 06PA | 145,3 |
| 06PF | 167,4 |
| 08 | 287,7 |

4.5.3 Comparação Entre os Valores Médios de T_{20} Para os 3 Métodos de Medição

Na Seção 4.1 foram comparados os resultados para os tempos de reverberação para uma posição de medição calculados a partir dos 3 métodos utilizados: Varredura Exponencial dos Senos (VES), Fonte de Ruído Interrompida (FRI) e Estouro do Balão (EB). Porém, para uma análise mais geral das diferenças nos dados obtidos a partir de cada procedimento, calculou-se o tempo de reverberação a partir da média espacial das 45 posições fonte-receptor assim como descrito na seção 4.5. Para os métodos EB e FRI foram realizadas 3 medições para cada ponto, sendo que o valor de cada ponto foi dado pela média destas 3 medições. Os resultados desta análise para cada sala estão apresentados nas figuras 43, 44 e 45.

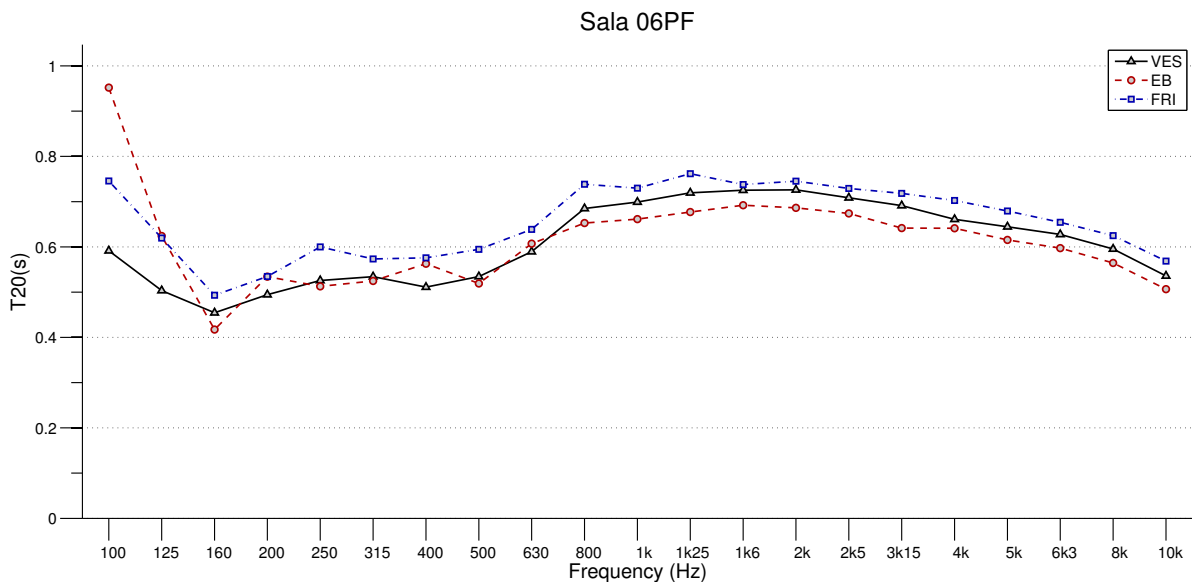


Figura 43 – Tempo de reverberação médio dos 3 métodos de medição para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF).

Para a Sala 06PF, o método FRI obteve valores maiores do que os do método VES em todos os terços de oitava, sendo de 0,15 s a maior diferença encontrada para a faixa com frequência central de 100 Hz. Nesta faixa também ocorreu a maior diferença entre os métodos EB e VES, que foi de 0,36 s. O método EB por sua vez calculou valores menores para o T_{20} em bandas com frequência central maiores ou iguais a 800 Hz, já para as faixas com frequências centrais de 160 Hz até 630 Hz os métodos EB e VES obtiveram valores próximos.

Assim como descrito na Subseção 4.5.1, os valores para o T_{20} por região do espectro e globais foram calculados, cujos resultados para cada sala estão apresentados nas tabelas 6, 7 e 8. Além destes valores, também são apresentados os valores para o Erro Relativo (E_r),

calculado de acordo com a Equação 32 e tomando como referência os valores obtidos com o método VES (Tabela 4).

Tabela 6 – Valores médios para o tempo de reverberação (s) por região do espectro para os métodos FRI e EB e seus respectivos erros relativos (Er) em comparação com os do VES para a Sala 06PF (B - graves, M - médias, T - agudas e A - global).

| Método | $T_{20,B}$ | Er_B | $T_{20,M}$ | Er_M | $T_{20,T}$ | Er_T | $T_{20,A}$ | Er_A |
|------------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|
| FRI | 0,59 | 14,9 % | 0,67 | 8,0 % | 0,68 | 4,1 % | 0,66 | 7,9 % |
| EB | 0,59 | 14,9 % | 0,61 | -1,6 % | 0,62 | -5,0 % | 0,61 | 0,8 % |

Para a Sala 06PF podemos ver que o método que apresentou maior semelhança para os valores globais ($T_{20,A}$) e por região do espectro ($T_{20,B}$, $T_{20,M}$ e $T_{20,T}$) foi o EB, apresentando erros de apenas $-1,6\%$, $-5,0\%$ e $0,8\%$ para as faixas de frequências médias, agudas e a faixa global respectivamente. A única faixa que apresentou um valor de erro significativo foi a de graves, com $Er_B = 14,9\%$, mesmo valor de erro encontrado para o método FRI. Neste método, o maior erro também apareceu para a região de graves, e os erros para as faixas de frequências médias e agudas foram de respectivamente $8,0\%$ e $4,1\%$, e por último obteve-se um erro de $7,9\%$ para o valor de $T_{20,A}$.

Os resultados para a média espacial dos tempos de reverberação para a Sala 06 com Painéis Abertos (06PA) estão apresentados na Figura 44 e, novamente, os valores encontrados para o método FRI foram maiores do que os do VES para toda a faixa do espectro analisada, porém neste caso não ocorreram grandes diferenças como na banda de 100 Hz para a sala 06PF (Figura 43), sendo a maior diferença igual a 0,14 s para a banda de 125 Hz. Para esta sala, a qual possui a menor reverberação, a maior diferença (0,16 s) apareceu entre os métodos VES e EB na faixa de 100 Hz, porém para as outras regiões do espectro, tais métodos calcularam valores bem próximos para o T_{20} , e em muitos casos praticamente iguais, como o ocorrido para 12 das 21 faixas de frequência.

A semelhança entre os dados dos métodos VES e EB reflete-se também nos baixos valores de erro por região do espectro para a sala 06PA, assim como apresentado na Tabela 7, com erros de apenas $5,4\%$, $1,4\%$ e $-1,7\%$ para as regiões de graves, médios e agudos respectivamente, e um erro para a média global de $1,5\%$.

Tabela 7 – Valores médios para o tempo de reverberação (s) por região do espectro para os métodos FRI e EB e seus respectivos erros relativos (Er) em comparação com os do VES para a Sala 06PA (B - graves, M - médias, T - agudas e A - global).

| Método | $T_{20,B}$ | Er_B | $T_{20,M}$ | Er_M | $T_{20,T}$ | Er_T | $T_{20,A}$ | Er_A |
|------------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|
| FRI | 0,64 | 12,9 % | 0,38 | 12,3 % | 0,50 | 6,7 % | 0,50 | 10,1 % |
| EB | 0,60 | 5,4 % | 0,34 | 1,4 % | 0,46 | -1,7 % | 0,46 | 1,5 % |

As diferenças calculadas a partir dos métodos VES e FRI também podem ser observadas na Tabela 7, onde a região com menor erro foi a de frequências agudas, com

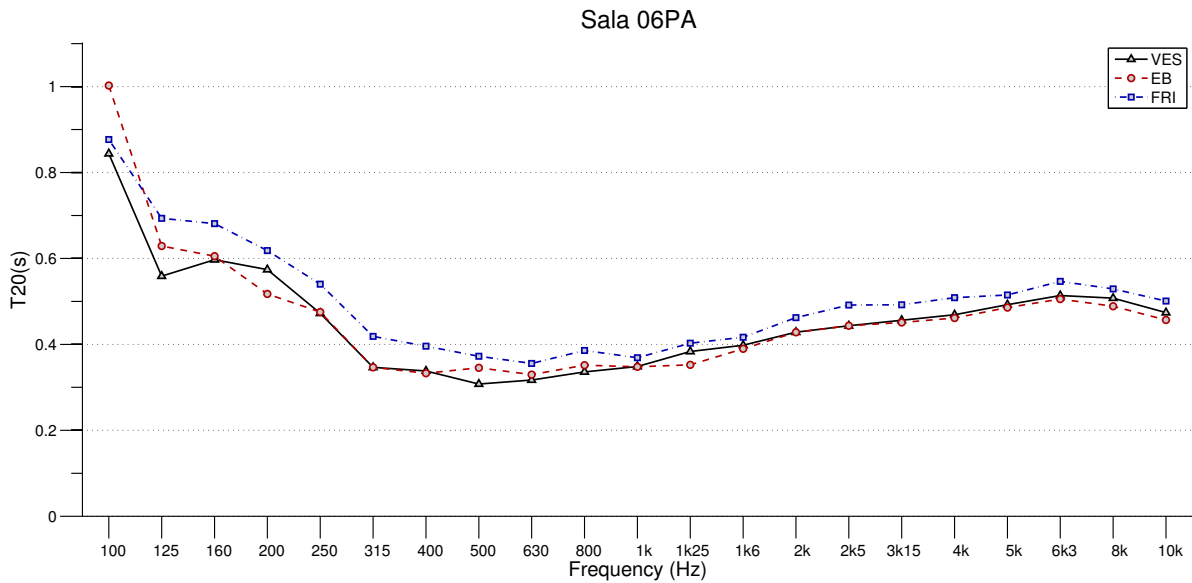


Figura 44 – Tempo de reverberação médio dos 3 métodos de medição para a Sala 06 com Painéis Abertos (06PA).

$Er_{,T} = 6,7\%$. Para as outras regiões, encontrou-se valores de erros relativos maiores que 10% , sendo que para a região de médios foi encontrado um valor de $12,3\%$, e o maior deles para a de graves, igual a $12,9\%$. E por último, para o valor global de T_{20} foi calculado um Er de $10,1\%$.

Os resultados para a média espacial dos valores de T_{20} para a Sala 08 estão apresentados na Figura 45 e, diferentemente dos resultados para as outras salas, o método FRI apresentou valores significativamente maiores do que os do VES apenas para para as faixas com frequências centrais entre 125 Hz e 500 Hz . Para valores de 630 Hz para cima, as diferenças foram insignificantes. Já nesta última faixa, o método EB obteve valores menores em comparação com método VES, cuja semelhança apareceu para as faixas com frequências centrais de até 500 Hz .

Os valores para o tempo de reverberação por região do espectro para a Sala 08 são apresentados na Tabela 8, onde pode-se observar que em comparação com o método VES, desta vez o método FRI apresentou menores erros para as faixas de médios, agudos e global com valores de $2,8\%$, $2,4\%$ e $3,4\%$ respectivamente. O maior erro apresentado para o método EB foi de $10,1\%$ na faixa de agudos. Porém na faixa de graves, foi calculado um erro de apenas $1,3\%$ contra $5,4\%$ do método FRI.

4.5.4 Comparação Entre os Valores Médios de T_{20} Para os Tipos de Equipamentos de Reprodução Sonora

A Seção 4.2 apresenta uma comparação entre os equipamentos de reprodução sonora, os quais se diferenciam principalmente no tipo de caixa acústica, uma sendo omnidire-

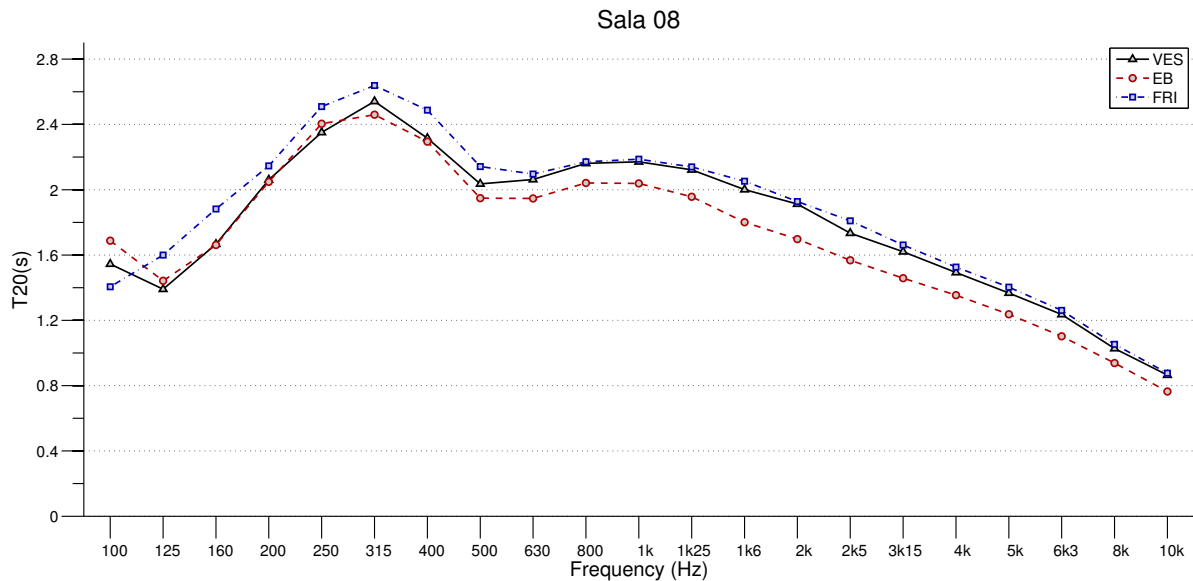


Figura 45 – Tempo de reverberação médio dos 3 métodos de medição para a Sala 08.

Tabela 8 – Valores médios para o tempo de reverberação (s) por região do espectro para os métodos FRI e EB e seus respectivos erros relativos (Er) em comparação com os do VES para a Sala 08 (B - graves, M - médias, T - agudas e A - global).

| Método | $T_{20,B}$ | Er_B | $T_{20,M}$ | Er_M | $T_{20,T}$ | Er_T | $T_{20,A}$ | Er_A |
|------------|------------|--------|------------|--------|------------|---------|------------|--------|
| FRI | 2,03 | 5,4 % | 2,20 | 2,8 % | 1,51 | 2,4 % | 1,86 | 3,4 % |
| EB | 1,95 | 1,3 % | 2,04 | -5,0 % | 1,32 | -10,1 % | 1,71 | -4,9 % |

cional e em conformidade com a norma ISO3382-2:2008 (Dodecaedro), e a outra não (Monitor de Áudio). Tal estudo foi realizado considerando apenas o ponto de fonte $F1$ e o de receptor $M1$, e nesta subseção são apresentadas as análises considerando a média espacial dos valores calculados com o método Varredura Exponencial dos Senos (VES) para todos os pontos de fonte ($F1$ até $F3$) e de receptor ($M1$ até $M5$) para as 3 salas medidas: Sala 06 com Painéis Fechados (06PF), Sala 06 com Painéis Abertos (06PA) e Sala 08.

A Figura 46 apresenta os resultados da comparação entre as medições utilizando o Monitor e o Dodecaedro para a sala 06PF, onde é possível observar que a direcionalidade da fonte não teve influência significativa em nenhuma região do espectro. As exceções são as faixas de 8 kHz e de 10 kHz, cujo erro de medição foi ocasionado pelo defeito no *tweeter*, assim como demonstrado na Seção 6.2.

Os resultados entre as medições utilizando o Dodecaedro e o Monitor para as salas 06PA e 08 também foram praticamente idênticos entre si, sendo apresentados respectivamente nas figuras 47 e 48. Novamente, o mal funcionamento do *tweeter* ocasionou um grande erro para as medições com o Monitor de Áudio para as faixas de frequências de 8 kHz e de 10 kHz em ambos os casos.

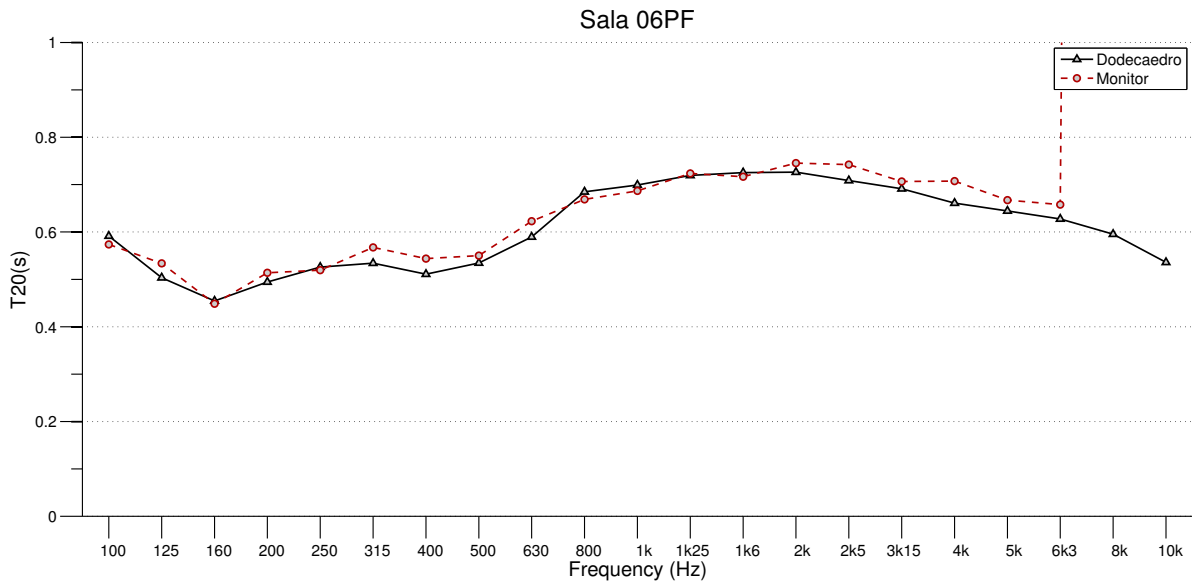


Figura 46 – Tempo de reverberação médio para o Monitor de Áudio e o Dodecaedro utilizando o método VES para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF).

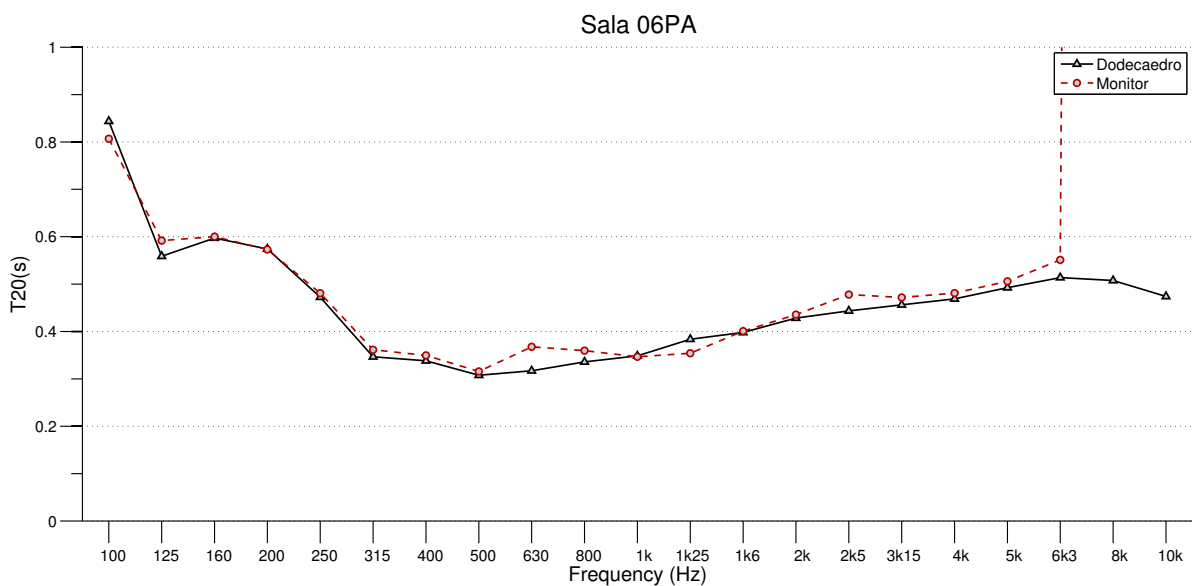


Figura 47 – Tempo de reverberação médio para o Monitor de Áudio e o Dodecaedro utilizando o método VES para a Sala 06 com Painéis Abertos (06PA).

Para auxiliar na análise da baixa interferência da direcionalidade da fonte, foram calculados os erros relativos de acordo com a Equação 32 tomando como valor de referência os tempos de reverberação calculados com o Dodecaedro (Tabela 4). Os resultados para cada faixa do espectro e para o valor global de cada sala são apresentados na Tabela 9. A sala que apresentou os menores valores de erro foi a mais reverberante (08), com erro máximo de 1,1% para a faixa de frequências grave. Já a sala que apresentou os maiores

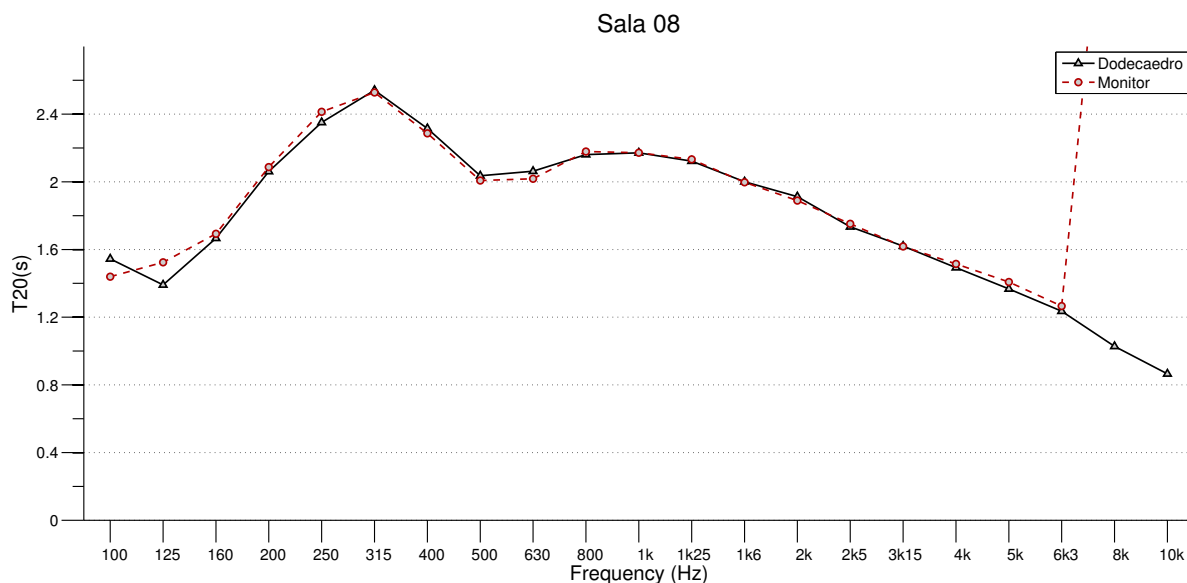


Figura 48 – Tempo de reverberação médio para o Monitor de Áudio e o Dodecaedro utilizando o método VES para a Sala 08

erros foi a menos reverberante (06PA), porém mesmo o maior erro encontrado, o qual foi de 3,8% para as frequências agudas, não apresenta diferenças significativas e, de forma geral, todos os resultados das medições para o Monitor de Áudio foram satisfatórias em comparação com as realizadas com o Dodecaedro.

Tabela 9 – Valores de Erro Relativo (Er) por região do espectro para as medições utilizando o método VES com o Monitor em comparação com o Dodecaedro para os 3 tipos de salas (B - graves, M - médias, T - agudas e A - global).

| Sala | $Er_{,B}$ | $Er_{,M}$ | $Er_{,T}$ | $Er_{,A}$ |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 06PA | 0,6 % | 3,1 % | 3,8 % | 2,4 % |
| 06PF | 1,7 % | 1,5 % | 3,3 % | 2,3 % |
| 08 | 1,1 % | -0,6 % | 0,7 % | 0,4 % |

4.6 Análise da Variabilidade do Cálculo do Tempo de Reverberação em Função da Posição da Fonte e do Receptor

A partir da análise dos gráficos representados nas figuras 36, 37 e 38 foi observada uma influência da reverberação na dispersão dos resultados apresentados quanto a variação da posição do microfone. Observando o gráfico para o tempo de reverberação da sala mais reverberante (Figura 38), notou-se um menor espalhamento relativo dos dados. Na tentativa de quantificar esta observação, foi calculado o desvio padrão da variação da

posição do microfone para os 3 tipos de sala, cujo resultado para as medições utilizando o dodecaedro posicionado em $F1$ estão apresentados na Figura 49. Porém, notou-se que tal variável não explicou de forma satisfatória o resultado observado anteriormente, pois, no geral, o desvio padrão calculado para a sala 08 foi maior do que para as salas 06PA e 06PF.

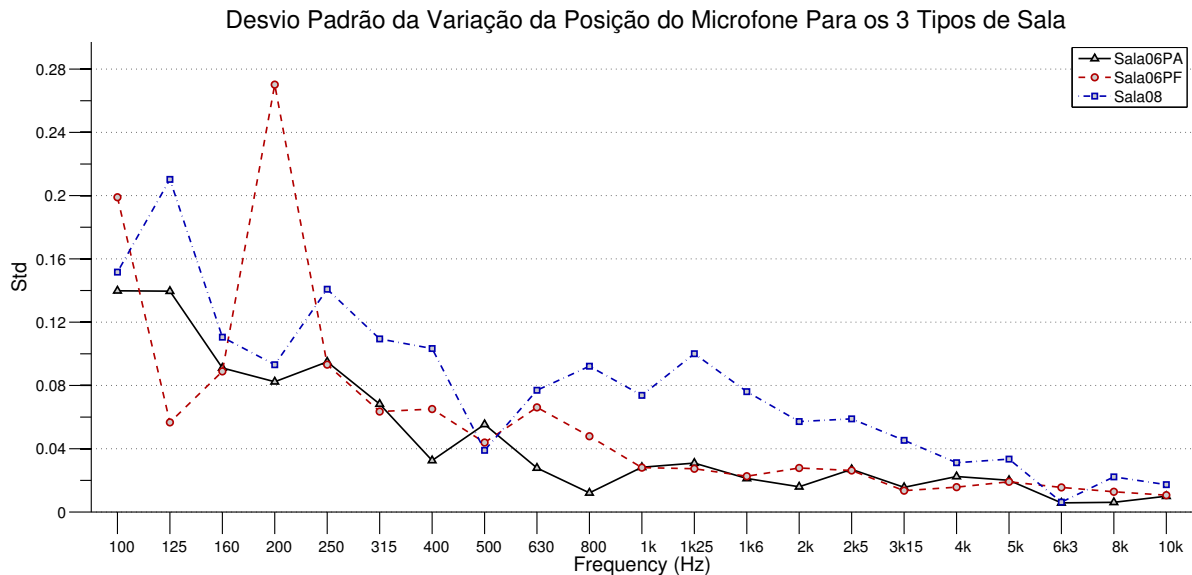


Figura 49 – Desvio padrão calculado a partir da variação da posição do microfone para os 3 tipos de sala utilizando o dodecaedro posicionado em $F1$ para o método VES.

Outra variável utilizada foi Desvio Padrão Relativo (RSD), a qual foi calculada de acordo com a Equação 31, cujo resultado é apresentado na Figura 50. Desta vez observou-se que de forma geral a sala que apresentava os menores valores para o RSD foi a sala 08, o que foi coerente com os resultados observados nas figuras 36, 37 e 38. Então, optou-se pela utilização do cálculo do desvio padrão relativo para analisar a variação dos parâmetros de acordo com a variação da posição de medição. Isto é útil para ajudar a quantificar a intensidade da difusão sonora no interior da sala, um parâmetro importante na análise e projeto acústico de salas.

Os resultados apresentados para a Figura 50 são referentes apenas à posição de fonte $F1$ e, com o objetivo de compreender de forma geral a difusão em cada sala, foi calculado o desvio padrão relativo considerando todas as posições de medição, ou seja, variando a localização da fonte ($F1$ até $F3$) e do receptor ($M1$ até $M5$). O resultado para esta análise global é apresentado na Figura 51.

Foi observado que, para as faixas de frequências acima de 250 Hz, o desvio padrão relativo para a análise da variação da posição do microfone é inversamente proporcional ao tempo de reverberação da sala. Ou seja, para a sala mais seca (06PA), o campo sonoro é menos difuso, o que resulta em uma grande alteração dos valores para o tempo

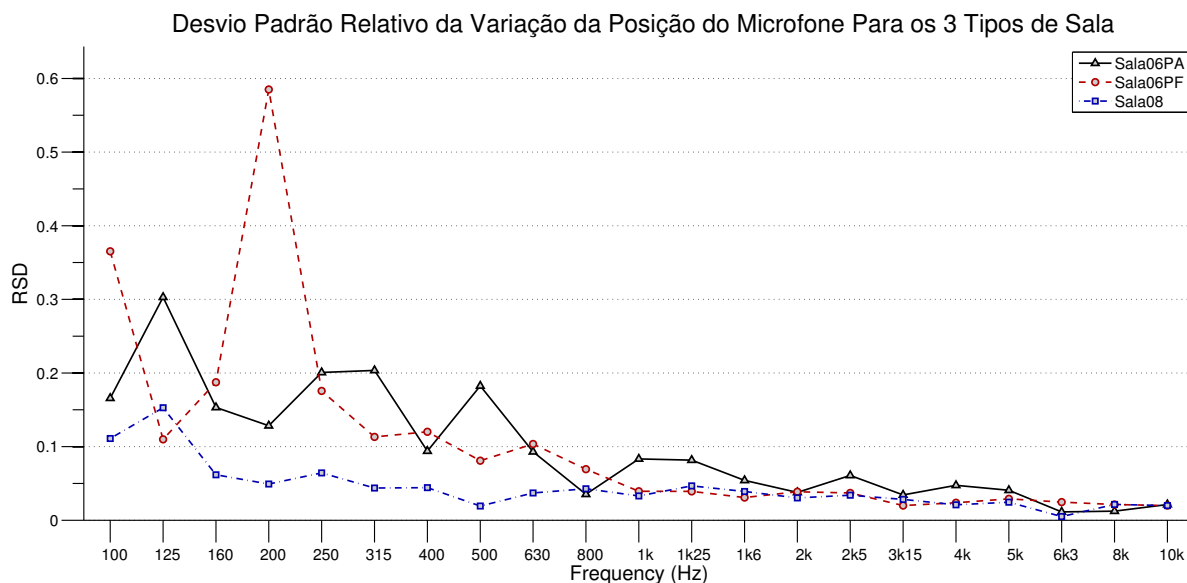


Figura 50 – Desvio padrão relativo calculado a partir da variação da posição do microfone para os 3 tipos de sala utilizando o dodecaedro posicionado em F1 para o método VES.

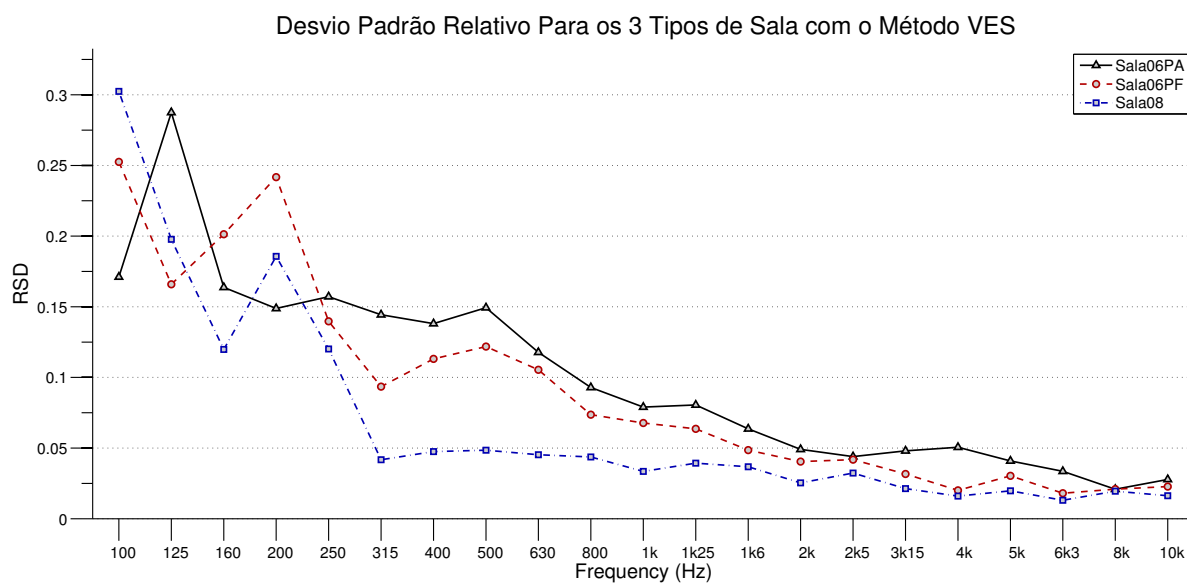


Figura 51 – Desvio padrão relativo do tempo de reverberação para os 3 tipos de sala.

de reverberação com relação a posição de emissão e recepção sonora, possuindo assim os maiores valores para o RSD. Já para uma sala com maior reverberação, o campo sonoro tende a ser mais difuso, criando assim uma menor dispersão relativa nos valores para o tempo de reverberação, assim como os resultados obtidos para a sala 08, onde foram calculados os menores valores para o RSD em quase todo o espectro, mais especificamente para todas as faixas de frequências acima de 250 Hz, sendo mais discrepante para o terço de oitava com frequência central igual a 315 Hz, justamente a mesma faixa de espectro

que apresentou a maior discrepância para o cálculo do T_{20} médio (Figura 42).

Ao incluir a análise das frequências de Schroeder para cada sala (Tabela 5), pode-se notar que, para a sala 08, o valor de RSD cai drasticamente para frequências acima de sua F_S (287,7 Hz) e não volta a apresentar grandes variações. Este mesmo fato ocorre também para a sala 06PA, onde o maior pico ocorreu na banda de 125 Hz, a qual também está abaixo do valor de $F_S = 145,3$ Hz para esta sala. Porém, tal observação não foi verificada para a Sala 06PF, provavelmente pela sua forma irregular devido à abertura laterais nos painéis do teto.

A média para as frequências de Schroeder das 3 salas foi de 200,1 Hz. Acima deste valor foi possível observar que o RSD calculado foi inversamente proporcional a reverberação da sala, ou seja, para o terço de oitava de 250 Hz e seus superiores, a sala menos reverberante (06PA) apresentou os maiores valores para o RSD, e a sala com maior reverberação (08) apresentou os menores índices.

Considerações

Neste capítulo foram apresentadas as análises da variação do Tempo de Reverberação (RT) para um ponto e para o valor da média espacial de todos os pontos de medição em função da comparação de diferentes métodos de cálculo, tipos de equipamentos de reprodução sonora, posições de receptor, posições de fonte e por último a avaliação da variabilidade em relação a posição da fonte e do receptor. Tais análises também podem ser estendidas para diversos parâmetros acústicos, como a Clareza (C_{80}) e o Tempo de Decaimento Inicial (EDT). A fim de avaliar o impacto de tais análises no cálculo destes outros parâmetros acústicos, são apresentados no Capítulo 5 os resultados desta investigação inicial.

Resultados: Outros Parâmetros Acústicos

Uma análise extensa da influência no cálculo do Tempo de Reverberação (RT) em função da variação de 3 métodos de medição (Varredura Exponencial dos Senos (VES), Fonte de Ruído Interrompida (FRI) e Estouro do Balão (EB)), de 2 tipos de equipamentos de reprodução sonora (Dodecaedro e Monitor de Áudio como fonte sonora), 5 posições de receptor ($M1$ até $M5$) e 3 posições de fonte ($F1$ até $F3$) foi apresentada no Capítulo 4, o que levou à necessidade da investigação dos impactos de tais alterações no cálculo de outros parâmetros acústicos.

Foi realizada uma análise inicial, porém não tão aprofundada quanta a apresentada para o T_{20} , a fim de verificar as oscilações nos valores de outros parâmetros acústicos que seriam causadas pela utilização de uma fonte em conformidade com a norma ISO3382-2:2008 e outra fora dos padrões apresentados pela norma.

Uma comparação entre a utilização do Dodecaedro e do Monitor de Áudio no cálculo dos valores para os parâmetros de Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Clareza (C_{80}), Definição (D_{50}) e Tempo Central (T_S) é apresentada nas seções 5.1 a 5.4 respectivamente.

5.1 Tempo de Decaimento Inicial - EDT

O Tempo de Decaimento Inicial possui uma fórmula de cálculo (Equação 20) muito parecida com a do Tempo de Reverberação, tendo como diferença a queda na intensidade utilizada para o cálculo do tempo necessário para que o som decaia em 60 dB. No EDT este valor é calculado considerando apenas o decaimento dos primeiros 10 dB, e já no RT usualmente podem ser considerados os primeiros 20 dB (T_{20}) ou 30 dB (T_{30}). Devido a tal semelhança, os resultados obtidos do EDT para a análise da variação entre Dodecaedro e Monitor de Áudio para a medição na Sala 06 com Painéis Fechados (06PF) foram semelhantes aos do RT referente ao mesmo ponto de medição (Figura 33).

Os valores calculados para o EDT para o o microfone no ponto $M1$ e as fontes em $F1$ são apresentados na Figura 52, onde pode-se observar que não houve grande discrepância nos valores medidos com o Monitor de Áudio e com o Dodecaedro. Tais diferenças estão dentro da mesma faixa de variação do T_{20} , como pode ser observado na Figura 33.



Figura 52 – Comparação entre o Tempo de Decaimento Inicial (EDT) medido com o Dodecaedro e o Monitor posicionados em $F1$ e o microfone em $M1$ para a Sala 06PF utilizando o VES.

Diferentemente do valor calculado para o T_{20} na frequência de 10 kHz (Figura 33), o valor para o EDT não apresentou um valor tão discrepante. Isto se deve ao fato deste último considerar apenas o decaimento dos primeiros 10 dB, e ao *tweeter* do Monitor de Áudio queimado, que não conseguia emitir um som nesta faixa de frequências com energia de 25 dB acima do ruído ambiente, necessário para a medição do T_{20} .

5.2 Clareza - C_{80}

A Clareza (C_{80}) é uma razão logarítmica entre a energia inicial presente nos primeiros 80 ms e a energia final que chega após este tempo, sendo calculada a partir da Resposta ao Impulso da Sala (RIS) de acordo com a Equação 21. O resultado da medição de tal parâmetro para o dodecaedro posicionado no ponto $F1$ e o microfone no ponto $M1$ na Sala 06 com Painéis Fechados (06PF) através do método Varredura Exponencial dos Senos (VES) está apresentado na Figura 53, onde se percebe claramente que a direcionalidade da fonte teve uma alta influência na medição do C_{80} na região de frequências médias e principalmente na região de agudos.

Fontes como o Monitor de Áudio tendem a ser mais unidirecionais com o aumento da frequência e, como o ponto de receptor ($M1$) estava posicionado logo à frente do ponto

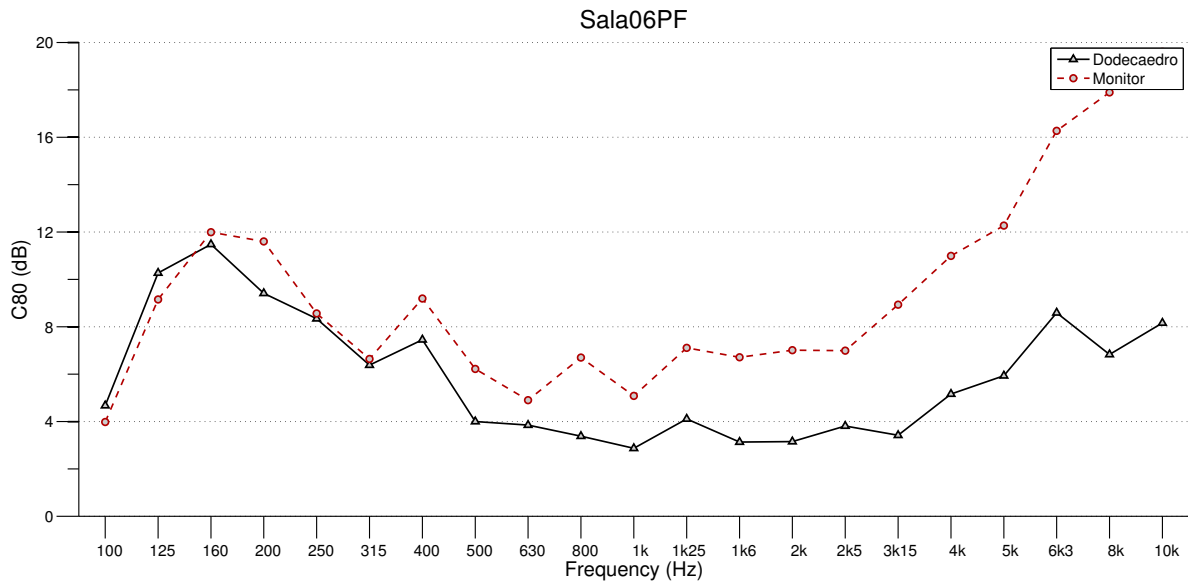


Figura 53 – Comparação entre a Clareza (C_{80}) medida com o Dodecaedro e o Monitor posicionados em $F1$ e o microfone em $M1$ para a Sala 06PF utilizando o VES.

de fonte sonora ($F1$), a razão da energia emitida para frente em relação a emitida para as outras direções tende a aumentar com a frequência, pois para frequências mais agudas, menos energia é emitida para as laterais e para trás, por exemplo. Como estes ajudam a compor a parte reverberante do sinal, com a queda em sua intensidade, a razão entre a energia inicial e a energia final é aumentada, incrementando o valor calculado para a Clareza em tal faixa de frequência.

5.3 Definição - D_{50}

A Definição (D_{50}) é a razão entre a energia sonora contida nos primeiros 50 ms da Resposta ao Impulso (RI) pela sua energia total, sendo calculada de acordo com a Equação 23. Assim como a Clareza (C_{80}), este descritor também representa um balanço entre a energia inicial e a final, e com o cálculo de um destes parâmetros, o outro pode ser calculado de acordo com a Equação 25, ou seja, podemos calcular o C_{50} a partir do D_{50} e vice-versa.

Sendo assim, espera-se que o impacto da diretividade da fonte no cálculo do D_{50} seja semelhante ao do C_{80} , o que pode ser verificado nos resultados apresentados na Figura 54 para a análise realizada com o método VES para sala 06PF com o Monitor de Áudio e o Dodecaedro posicionados em $F1$ e o microfone posicionado em $M1$.

Os valores calculados para a Definição apresentaram diferenças significativas para os terços de oitava com frequências centrais iguais ou maiores que 800 Hz. Já o C_{80} apresentou tais discrepâncias para valores iguais ou maiores que 400 Hz (Figura 53). Tal diferença é

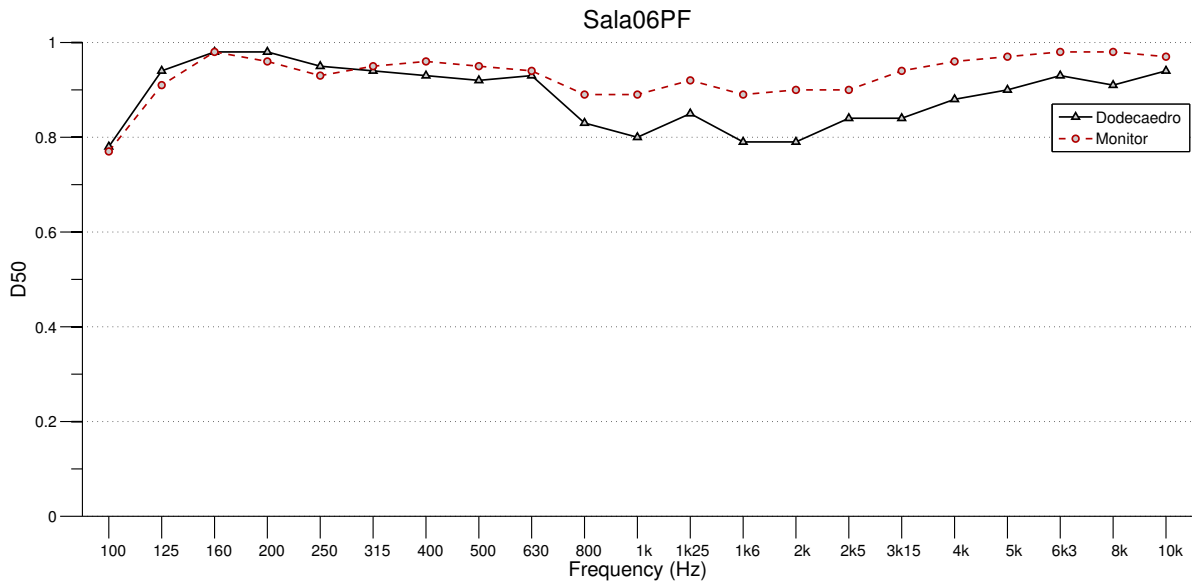


Figura 54 – Comparação entre a Definição (D_{50}) medida com o Dodecaedro e o Monitor posicionados em $F1$ e o microfone em $M1$ para a Sala 06PF utilizando o VES.

ocasionada pelo tempo de análise de cada parâmetro, pois o C_{80} considera que a energia inicial é aquela contida nos primeiros 80 ms, enquanto o D_{50} considera os primeiros 50 ms. Assim, com a diminuição deste tempo considerado como inicial, a faixa de frequências em que a diretividade da fonte começou a interferir nos resultados aumentou.

5.4 Tempo Central - T_S

O Tempo Central (T_S), calculado de acordo com a Equação 27, pode ser entendido como o centro gravitacional da Resposta ao Impulso (RI) e forma, juntamente com a Clareza (C_{80}) e a Definição (D_{50}), uma classe de parâmetros que são obtidos a partir do balanço entre as energias inicial e final contidas na RI.

A Figura 55 apresenta os resultados calculados para o T_S com o método Varredura Exponencial dos Senos (VES) para a sala 06PF com o Dodecaedro e o Monitor de Áudio posicionados em $F1$ e o receptor em $M1$. Assim como para o C_{80} (Figura 53), as diferenças começaram a aparecer na região de médios e principalmente na de agudos, mais especificamente a partir do terço de frequência central igual a 400 Hz. Porém, para este parâmetro, os resultados calculados com o monitor foram menores que os obtidos com o dodecaedro, ou seja, o fato de o Monitor de Áudio não possuir uma resposta omnidirecional, principalmente para frequências médias e agudas, ocasionou o cálculo do Tempo Central com valores menores que a fonte em conformidade com a norma ISO3382-2:2008. Tal fato pode ser explicado pela queda na energia dos sons emitidos para as outras direções com exceção da frontal, diminuindo a energia da cauda reverberante, e consequentemente

fazendo que o centro gravitacional se aproxime mais do tempo 0s, o que acarreta em valores menores para o Tempo Central.

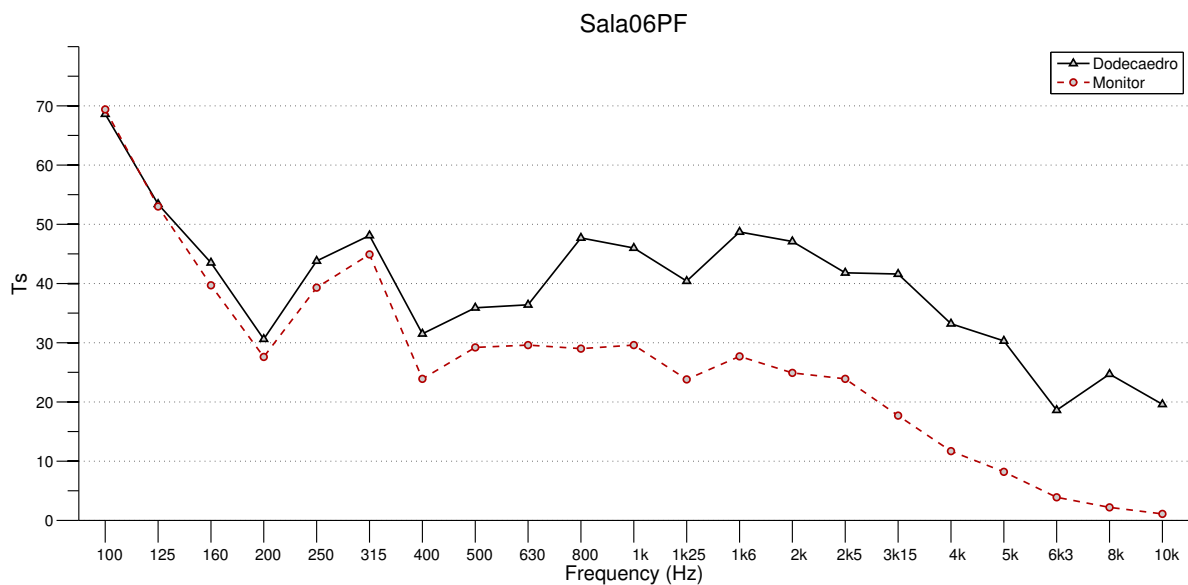


Figura 55 – Comparação entre o Tempo Central (T_S) medido com o Dodecaedro e o Monitor posicionados em $F1$ e o microfone em $M1$ para a Sala 06PF utilizando o VES.

Considerações

Neste capítulo foram apresentadas as análises iniciais do impacto da alteração do tipo de equipamento de reprodução sonora, tendo como objetos de estudo o Monitor de Áudio e o Dodecaedro. Verificou-se que a utilização ou não de uma fonte omnidirecional causa alterações nos dados de medições para a Clareza (C_{80}), a Definição (D_{50}) e o Tempo Central (T_S), porém para o Tempo de Decaimento Inicial (EDT), a utilização do Dodecaedro não trouxe ganhos significativos, assim como para os resultados apresentados no Capítulo 4 para o Tempo de Reverberação (RT).

No capítulo a seguir é realizada uma análise da variação entre os mesmos pontos de medição para os métodos utilizados, dos principais problemas durante as medições e dos valores para o T_{20} para a região subgrave do espectro.

Discussão dos Resultados

No Capítulo 4, foram apresentados os principais resultados obtidos na medição do Tempo de Reverberação (RT) obtidos a partir do T_{20} e o impacto de seus valores nas análises da comparações entre os métodos de medição (Seção 4.1), entre os equipamentos de reprodução sonora (Seção 4.2) e entre a alteração das posições de fonte e receptor (seções 4.3 e 4.4). No Capítulo 5 realizou-se uma análise inicial do impacto da direcionalidade da fonte em um ponto de medição da Sala 06 com Painéis Fechados (06PF) no cálculo dos parâmetros de Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Clareza (C_{80}), Definição (D_{50}) e Tempo Central (T_S).

Neste capítulo são apresentados as análises para a variabilidade entre medições no mesmo ponto para cada um dos 3 métodos utilizados (Varredura Exponencial dos Senos (VES), Estouro do Balão (EB) e Fonte de Ruído Interrompida (FRI)), os principais problemas ocorridos durante os testes acústicos que ocasionaram dados não medidos ou incorretos e os valores calculados para o RT na região de frequências subgraves.

6.1 Variação em um Ponto de Medição Para os Métodos VES, FRI e EB

A análise da variabilidade na medição do T_{20} para um ponto fonte-receptor faz-se importante para determinar a quantidade de medições necessárias de cada método. A seguir são apresentadas o resultado da repetição de medições para os 3 métodos estudados para a análise realizada em um ponto de medição para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF).

O método de Varredura Exponencial dos Senos (VES) possui uma variabilidade insignificante, como pode ser observado na Figura 56, pois os valores calculados para todos os terços de oitava são praticamente iguais. Isto se deve ao fato de o sinal utilizado na medição possuir característica determinística, garantindo a repetibilidade do sinal sonoro aplicado, acrescido ao fato de o método VES eliminar as distorções não lineares causadas

pelo alto-falante. As mínimas alterações nos valores podem ser ocasionadas pelo ruído ambiente.

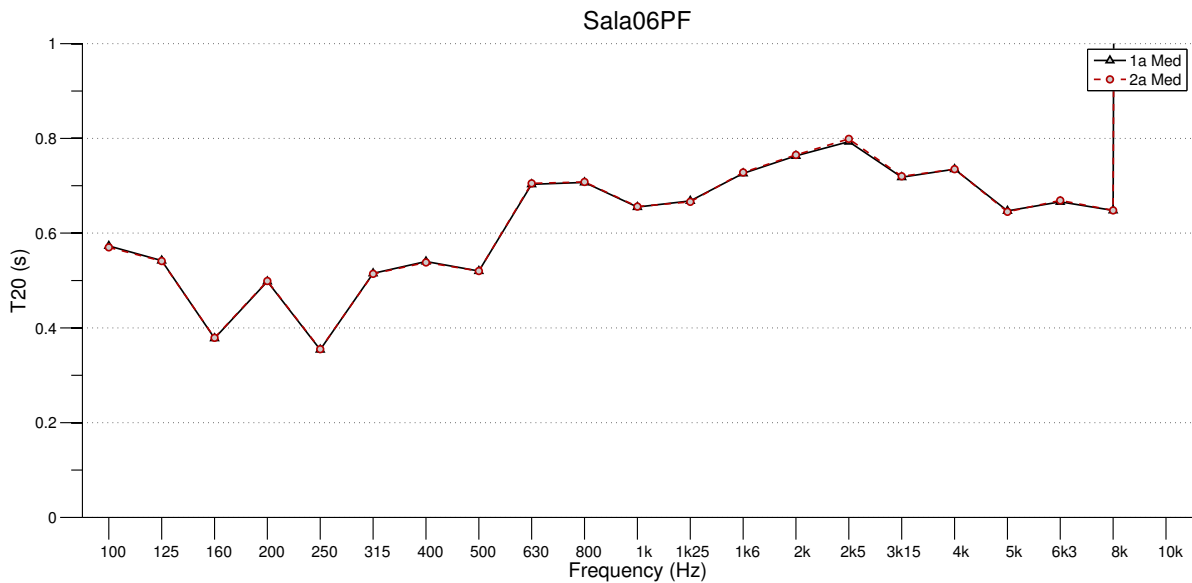


Figura 56 – Resultado da variação no cálculo de T_{20} para 2 medições realizadas no ponto $F1$ e $M1$ com o método Varredura Exponencial dos Senos (VES) na Sala 06PF utilizando o Monitor de Áudio.

Em cada ponto de medição, foram realizadas 3 gravações para o método VES, porém como os resultados são praticamente iguais, apenas uma das respostas ao impulso foi analisada.

O método EB assume que o estouro do balão é um sinal sonoro impulsivo. Além disto ser uma aproximação, cada estouro possui um sinal ligeiramente diferente do outro, tanto na característica do sinal sonoro, a qual pode ser alterada pela pressão do balão, como por pequenas diferenças no ponto de posicionamento da fonte. Tais imprecisões deste método ocasionam variações nos resultados das medições, como podem ser observadas na Figura 57, que apresenta os resultados para 10 medições no mesmo ponto.

Para a faixa de frequências em análise, que possui valores centrais entre 100 Hz e 10 kHz, apenas a mais grave obteve uma alta variabilidade entre medições. Para as outras faixas, foram medidos valores próximos para o T_{20} , o que dispensa a repetição de um número tão elevado de medições para cada ponto.

O método de Fonte de Ruído Interrompida (FRI) é o que necessita de mais medições para o cálculo de um valor mais apurado, devido ao fato de seu sinal sonoro possuir característica aleatória. Isto foi comprovado na análise de 10 medições para o mesmo ponto, cujo resultado está representado na Figura 58.

Ao analisar a Figura 58, notou-se que o método FRI possui uma variabilidade inversamente proporcional a frequência, o que implica uma necessidade de mais medições para a obtenção de valores mais corretos para frequências graves. Porém para a região de

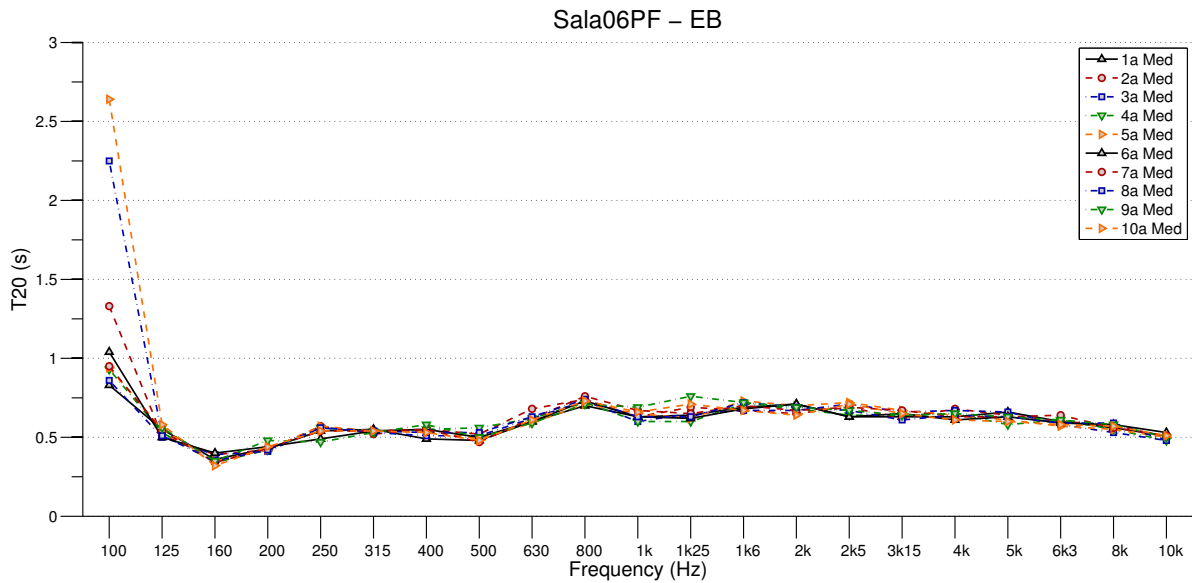


Figura 57 – Resultado da variação no cálculo de T_{20} para 10 medições realizadas no ponto $F1$ e $M1$ com o método Estouro do Balão (EB) na Sala 06PF.

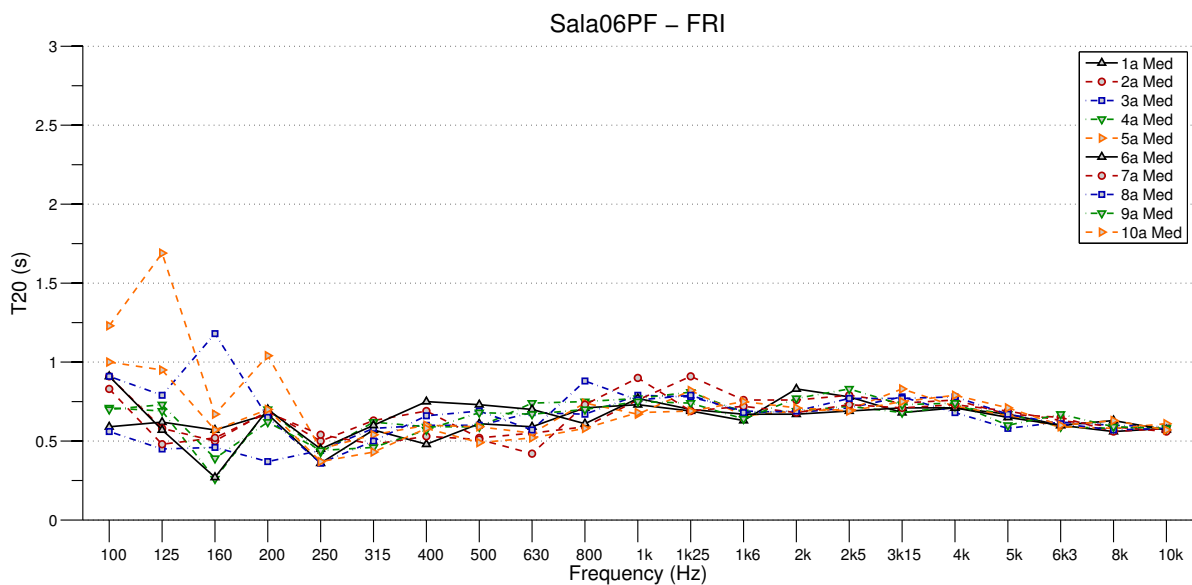


Figura 58 – Resultado da variação no cálculo de T_{20} para 10 medições realizadas no ponto $F1$ e $M1$ com o método Fonte de Ruído Interrompida (FRI) na Sala 06PF utilizando o Dodecaedro.

agudos, poucas ou apenas uma medição se faz necessária, devido à baixa variância nesta região do espectro.

Como a comparação da alteração de diversos parâmetros nos procedimentos de medição resultou em um número muito alto de gravações, foi determinado que o número de medições em cada ponto fonte-receptor estivesse de acordo com o mínimo da classe de medição mais precisa (*Precision*) especificada na norma ISO3382-2:2008, a qual determina

um mínimo de 3 decaimentos.

A fim de comparar a variabilidade dos métodos EB e FRI, foram calculados os índices de Desvio Padrão Relativo (RSD) para cada um, como está apresentado na Figura 59.

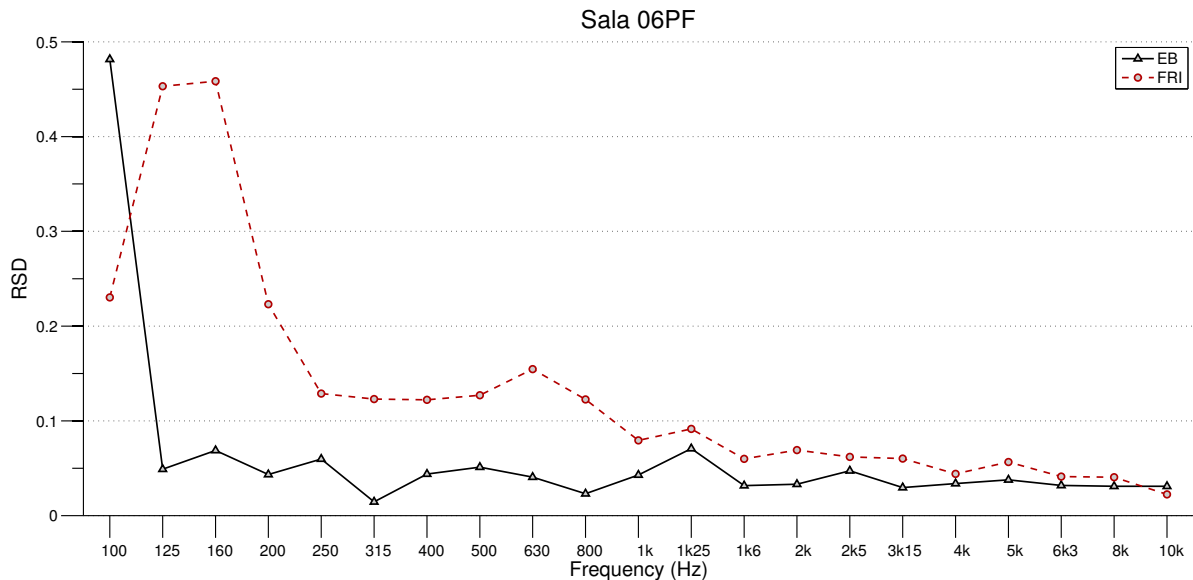


Figura 59 – Comparação entre o Desvio Padrão Relativo (RSD) de 10 medições realizadas no ponto $F1$ e $M1$ para os métodos Estouro do Balão (EB) e Fonte de Ruído Interrompida (FRI).

Através da análise da Figura 59, foi possível concluir que o método EB possui um menor RSD para todo o espectro, com exceção da faixa de frequências de 100 Hz. Para as demais regiões, o Estouro do Balão (EB) obteve um índice para o RSD em torno de 5%. Já o método Fonte de Ruído Interrompida (FRI) possui grandes valores para o RSD principalmente na região de graves, chegando a cerca de 45% nas faixas de frequências de 125 Hz e 160 Hz, o que diminui com o aumento da frequência, indo ao encontro do observado na Figura 58.

6.2 Problemas Durante as Medições ou Valores Não Medidos

Os resultados das medições apresentaram alguns erros, dentre eles o principal foi o valor não medido para alguns terços de oitava. Isto ocorreu em alguns casos para todos os métodos, inclusive o de Varredura Exponencial dos Senos (VES), considerado o mais robusto. Um exemplo de tal problema está apresentado na Figura 60, onde são mostradas duas medições realizadas com o Dodecaedro posicionado em $F1$ e o microfone em $M1$ para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF).

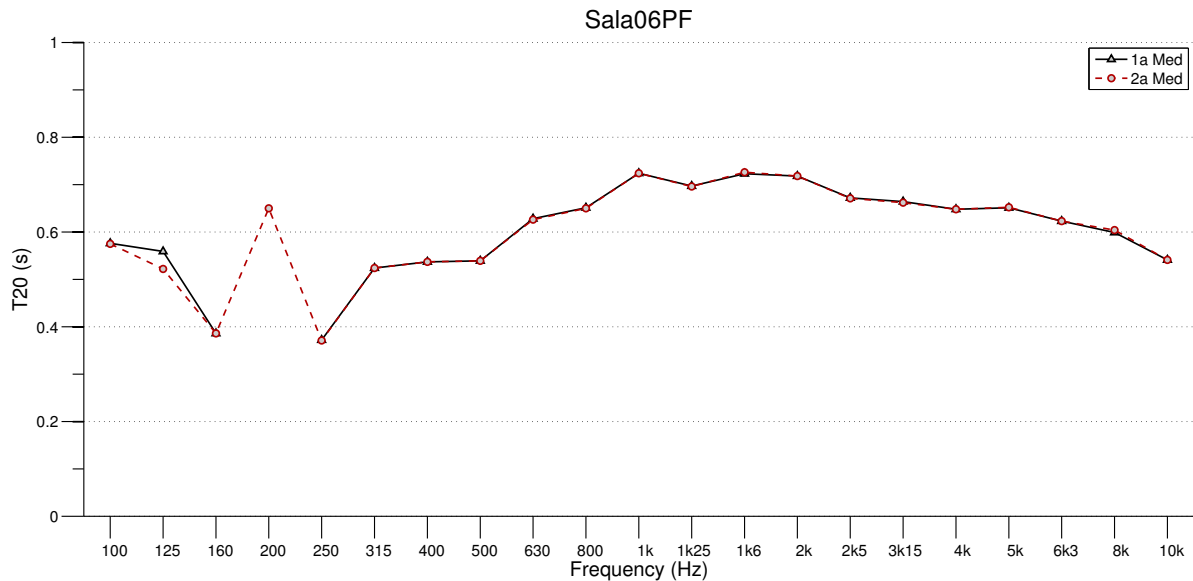


Figura 60 – Exemplo de valor não medido para o terço de oitava de 200 Hz do método VES com o Dodecaedro para o ponto $M1-F1$ na Sala 06PF.

É possível observar que para o terço de oitava de 200 Hz nenhum valor foi medido para o Tempo de Reverberação (RT) calculado a partir do T_{20} na 1ª medição realizada. Outra inconsistência foi a variação apresentada entre as medições para o terço de oitava de 125 Hz, a qual foi pequena, porém maior do que as apresentadas para as outras faixas de frequências apresentadas na Figura 60, e também para as duas medições realizadas com o Monitor de Áudio, assim como apresentada na Figura 56.

As medições utilizando o monitor de áudio como fonte sonora trouxeram valores irreais para o T_{20} nos terços de oitava com frequências centrais iguais a 8 kHz e 10 kHz devido ao *tweeter* estar queimado, o que pode ser constatado nas análises apresentadas na Seção 4.2, na Subseção 4.5.4 e na Figura 56.

Para a medição do Tempo de Reverberação (RT) a partir do T_{20} é necessário um nível de sinal com intensidade de 35 dB acima do ruído ambiente, condição não estabelecida assim como mostrado na Figura 61, onde são mostrados o Densidade Espectral de Potência (*Power Spectral Density*) (PSD) para o sinal VES do Monitor de Áudio, do Dodecaedro e do ruído ambiente.

Ao analisar a Figura 61, constatou-se que a condição para o cálculo do T_{20} deixou de ser satisfeita aproximadamente na frequência de 7 kHz, o que para este caso ocasionou o erro no cálculo para a faixa de frequência central de 10 kHz, assim como apresentado na Figura 33.

As figuras da Subseção 4.5.4 apresentam os cálculos dos valores médios para cada faixa de frequência obtidos a partir do Dodecaedro e do Monitor de Áudio, as quais demonstram problemas também para a faixa de frequência central de 8 kHz, fato ocorrido porque para pontos de medição mais distantes da fonte, a energia do ruído ambiente é praticamente o

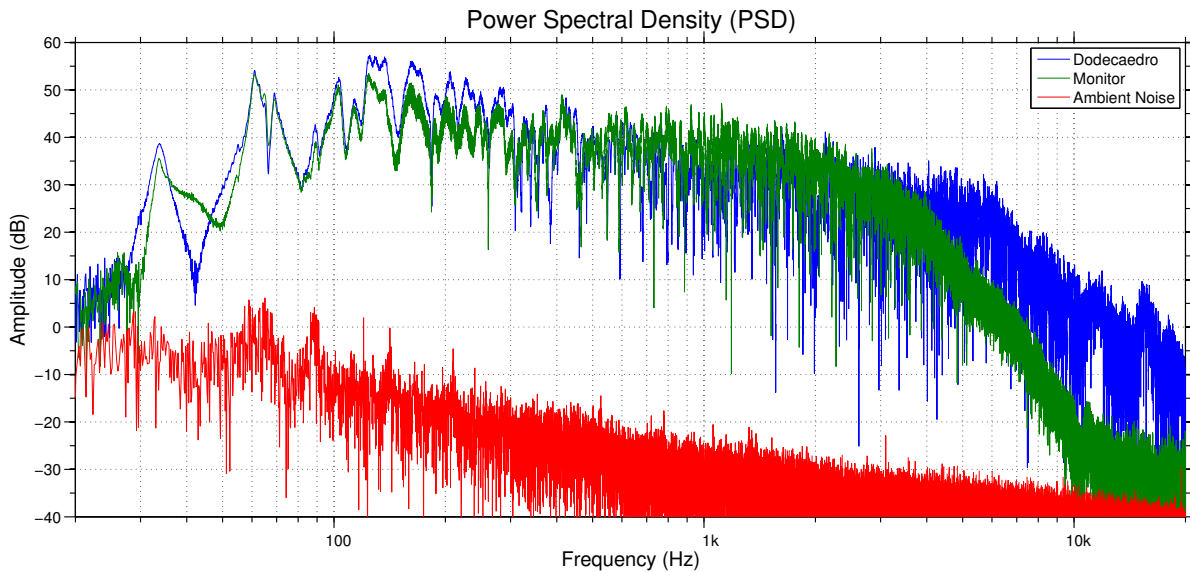


Figura 61 – Comparação entre os espectros do sinal VES do Dodecaedro, do Monitor e do ruído ambiente para as medições do ponto $M1-F1$ na Sala 06PF.

mesmo, porém a energia do sinal cai, infringindo a condição de 35 dB a mais que o ruído para a medição do T_{20} .

6.3 Região Subgrave do Espectro

Os procedimentos utilizados para as medições do Tempo de Reverberação (RT) com os 3 métodos estudados também apresentaram resultados para a região subgrave do espectro. Os métodos Estouro do Balão (EB) e Fonte de Ruído Interrompida (FRI) indicaram dados para os terços de oitava de 50, 63 e 80 Hz, e o método Varredura Exponencial dos Senos (VES) além destas faixas, também exibiu os valores para os terços de 25, 31 e 40 Hz.

As figuras 62, 63 e 64 apresentam os resultados para a região subgrave das salas Sala 06 com Painéis Fechados (06PF), Sala 06 com Painéis Abertos (06PA) e Sala 08 (08) respectivamente, onde o T_{20} foi medido considerando o ponto de medição com o microfone posicionado em $M1$ e a fonte em $F1$ para os 3 métodos utilizados.

Nos resultados apresentados para a Sala 06PF (Figura 62), observou-se que o método VES obteve valores para o T_{20} em todos os terços de oitava, o que também ocorreu para o FRI. Já o EB não apresentou valor para o T_{20} no terço de 63 Hz, o que aconteceu novamente para os resultados da Sala 06PA (Figura 63). Porém, para as outras faixas de frequência do método EB e do FRI foram mais próximos aos resultados do VES. Uma outra diferença foi que este último método apresentou um valor muito maior se comparado para o obtido na sala 06PF para a frequência central de 25 Hz.

As medições para o T_{20} pioraram significativamente para o método VES na Sala 08

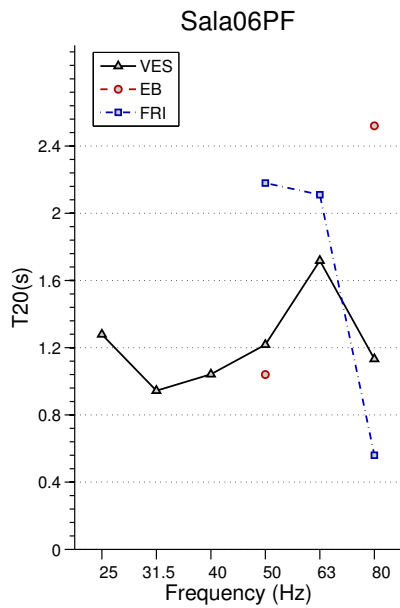


Figura 62 – Região subgrave para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF).

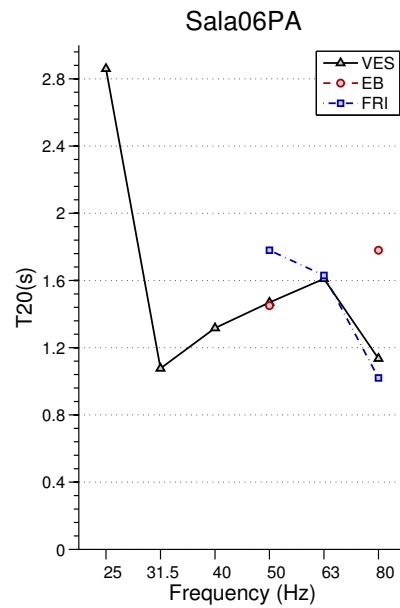


Figura 63 – Região subgrave para a Sala 06 com Painéis Abertos (06PA).

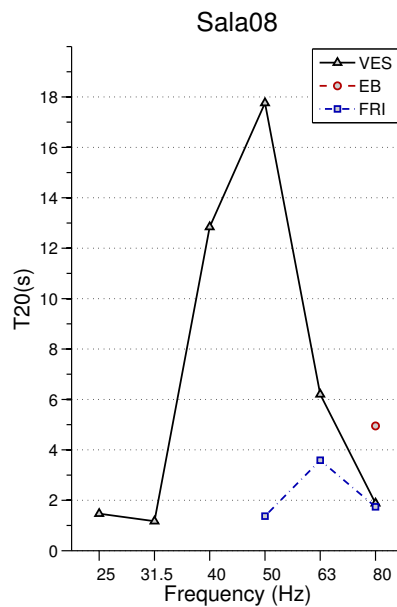


Figura 64 – Região subgrave para a Sala 08.

(Figura 63), o qual apresentou valores muito altos para faixas de frequências iguais a 40, 50 e 63 Hz, chegando a quase 18s. Para o método EB, o valor da faixa de 50 Hz também não foi calculado, assim como o de 63 Hz para as salas 06PF e 06PA. Já o método FRI apresentou valores dentro do esperado para todas as faixas de frequência para esta que é a sala com maior reverberação.

As figuras 65 e 66 apresentam a análise espectral dos métodos Estouro do Balão (EB) e

Fonte de Ruído Interrompida (FRI) para uma medição no ponto $M1-F1$ respectivamente, ambos para a Sala 06 com Painéis Fechados (06PF), e juntamente com a Figura 61 permitiram entender os resultados apresentados para o T_{20} na região subgrave do espectro assim como ilustrado nas figuras 62, 63 e 64.

Observou-se que o método EB (Figura 65) possui uma Relação Sinal Ruído (*Signal to Noise Ratio*) (SNR) inferior a 35 dB, valor necessário para uma medição confiável de T_{20} nesta região. Tal fato, explica os valores não medidos para os terços de 63 Hz, assim como valores discrepantes como o valor de 2,52s medido para o terço de 80 Hz na sala 06PF (Figura 62).

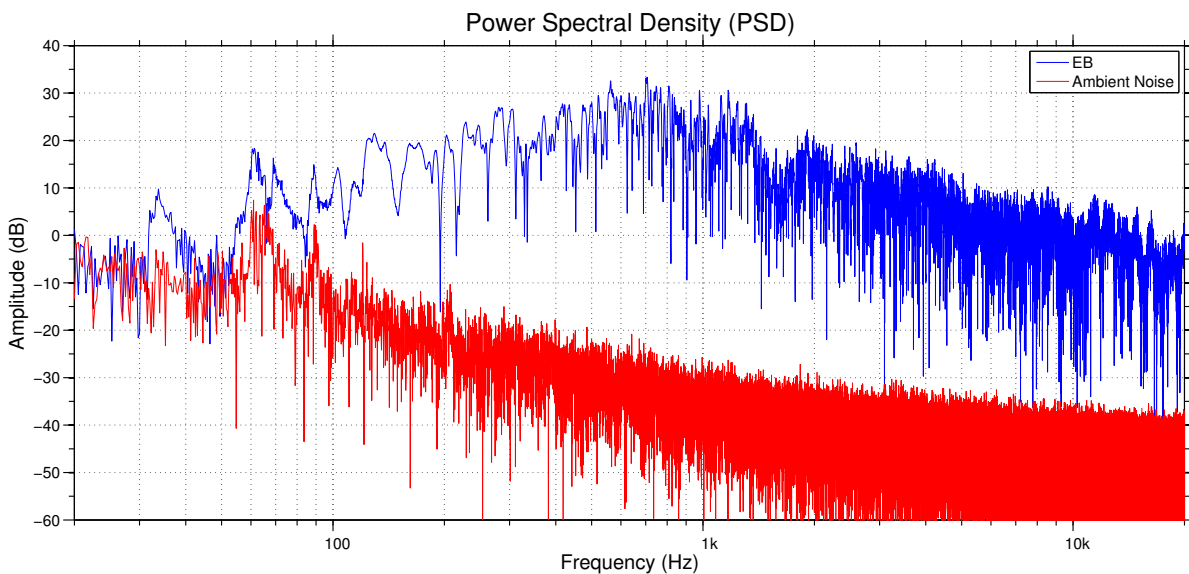


Figura 65 – Comparação entre os espectros do sinal do EB e do ruído ambiente para as medições do ponto $M1-F1$ na Sala 06PF.

Outro ponto que prejudicou as medições foi a presença de equipamentos com motores próximos às salas, como refrigeradores e compressores, os quais causaram picos próximos à frequência de 60 Hz no espectro do ruído ambiente, prejudicando assim as medições para o terço de 63 Hz. Estes picos são facilmente observados nas análises da PSD apresentada para os 3 métodos nas figuras 61, 65 e 66.

O método FRI (Figura 66) possui a melhor SNR dentre os 3 métodos, o que explica o êxito para todos os terços de oitava medidos para as 3 salas. Para a Sala 06PF (Figura 62), os valores foram fora do esperado, sendo de 2,18 e 2,11s para os terços de 50 e 63 Hz respectivamente, porém estão dentro da faixa de variância inerente ao método, assim como analisado na seção 6.1.

A fim de investigar a causa da inconsistência nos resultados apresentados para o Tempo de Reverberação (RT) na Sala 08 (Figura 64), foi analisado o perfil espectral do sinal VES e do ruído ambiente para esta sala em comparação com os da sala 06PF, cujo resultado é apresentado na Figura 67. Foi constatado que os sinais de VES possuem um perfil de

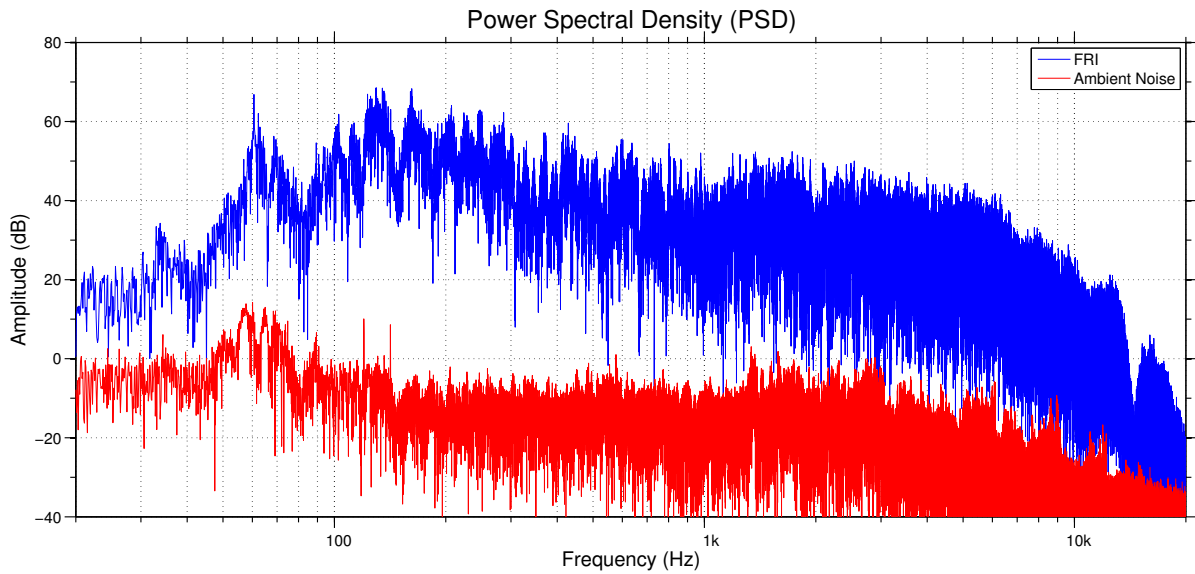


Figura 66 – Comparação entre os espectros do sinal do FRI e do ruído ambiente para as medições do ponto $M1-F1$ na Sala 06PF.

energia praticamente igual na região subgrave, sendo que o da Sala 08 é um pouco maior. Porém os ruídos ambiente não, sendo que o desta sala possui picos mais acentuados em torno das frequências de 65 e 90 Hz, sendo esta uma das possíveis causas para os erros para o T_{20} na Sala 08.

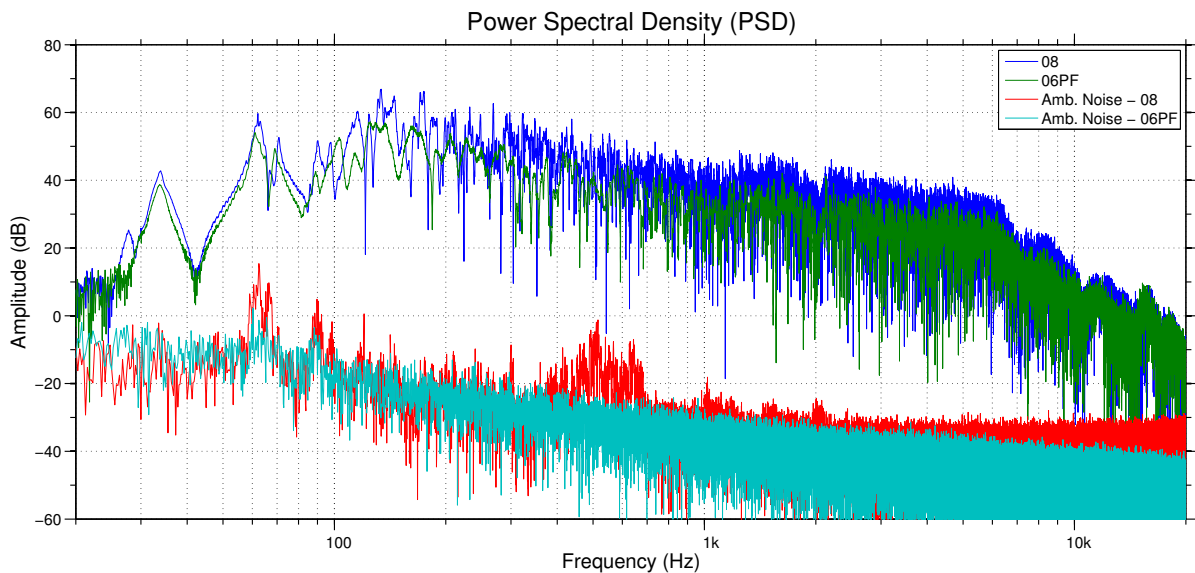


Figura 67 – Comparação entre os espectros do sinal VES e dos ruídos ambiente para as medições do ponto $M1-F1$ nas salas 06PF e 08.

A Figura 64 também deixa claro uma vantagem obtida com a instalação do tratamento acústico na Sala 06, o que gerou uma redução de ruído ambiente, principalmente na região

de médios e agudos.

Considerações

Através das análises apresentadas neste capítulo, foi possível concluir que o método Varredura Exponencial dos Senos (VES) tem como vantagem a repetibilidade no cálculo de RT, dispensando assim múltiplas medições em um mesmo ponto (Figura 56). Dentre os métodos Fonte de Ruído Interrompida (FRI) e Estouro do Balão (EB), este último se mostrou mais vantajoso neste quesito, pois o Desvio Padrão Relativo (RSD) foi menor para quase toda a faixa de frequências analisada (Figura 59).

Foi constatado, através da Figura 61, que o Monitor de Áudio não possui resposta em frequência satisfatória para realizar medições acima de 7 kHz, o que explicou os valores errôneos para os terços com frequências centrais de 8 e 10 kHz para este equipamento de reprodução sonora.

Para a região de frequências subgraves, o método EB se mostrou insuficiente em todas as salas analisadas devido ao fato de sua fonte sonora não possuir energia sonora nesta região. O método VES apresentou medições dentro do esperado para as salas com pouca reverberação (06PF e 06PA), porém resultados irreais foram obtidos para a sala mais reverberante (08). O método Fonte de Ruído Interrompida (FRI) apresentou medições satisfatórias para todas as salas, possuindo a maior SNR dentre os 3 métodos para a faixa de frequências subgraves.

No capítulo a seguir são apresentadas as principais conclusões observadas nas análises realizadas para este trabalho e também na fase de realização dos experimentos.

Conclusão

A seguir são apresentadas as principais conclusões obtidas durante a preparação e realização dos testes acústicos, e nas etapas de cálculo e análise dos resultados.

Para a faixa de frequências entre 100 Hz e 10 kHz, os 3 métodos não apresentaram discrepâncias significativas no cálculo do Tempo de Reverberação (RT), permitindo concluir que todos podem ser utilizados de forma confiável desde que a fonte sonora emita um som com uma faixa de energia acima do ruído ambiente de acordo com o parâmetro a ser medido para determinada faixa de frequências, que para o T_{20} é de 35 dB. Com relação a variabilidade do campo acústico em relação à posição fonte-receptor para o T_{20} , verificou-se seu caráter inversamente proporcional à reverberação da sala na região de frequências médias e agudas, a qual foi mensurada através do Desvio Padrão Relativo (RSD).

A variação entre as medições para o método Varredura Exponencial dos Senos (VES) são praticamente insignificantes, pois o sinal utilizado na medição possui característica determinística, garantindo a repetibilidade do sinal sonoro aplicado, acrescido do fato de que este procedimento elimina as distorções não lineares causadas pelo alto-falante. Ao analisar a Figura 58, notou-se que o método FRI possui uma variabilidade inversamente proporcional à frequência, o que implica uma necessidade de mais medições para a obtenção de valores mais corretos para frequências graves. Porém, para a região de agudos, poucas ou apenas uma medição se faz necessária, devido à baixa variância nesta região do espectro. Já através da análise da Figura 59, foi possível concluir que o método EB possui um menor RSD em relação ao FRI para todo o espectro, com exceção da faixa de frequências de 100 Hz.

Para a região subgrave, o método VES gerou resultados insatisfatórios para a sala mais reverberante (08), o que foi ocasionado pela diminuição na relação sinal-ruído. O método EB não se mostrou satisfatório para esta região de frequências e o FRI foi o único que apresentou valores dentro do esperado para todas as salas.

Na análise inicial realizada no Capítulo 5, constatou-se que a diretividade da fonte não influencia no cálculo do EDT . Também foi constatado que a faixa de frequências que é influenciada pela diretividade da fonte no cálculo de parâmetros como a Clareza e a

Definição é inversamente proporcional ao tempo considerado como o inicial assim como discutido na Seção 5.3. Outra conclusão obtida a partir das análises deste capítulo é que quanto menos a fonte é omnidirecional em determinadas regiões de frequência maior é o valor calculado para a Clareza e a Definição, e menor é o do Tempo Central.

Trabalhos Futuros

O presente trabalho propiciou a análise de uma extensa gama de propriedades que podem influenciar no cálculo de parâmetros acústicos, porém apenas o RT foi investigado de forma aprofundada. Assim, futuramente, o mesmo estudo será estendido para os parâmetros EDT, C_{80} , D_{50} e T_S .

O estudo foi realizado em uma situação acústica variável de uma pequena sala, e pretende se realizar tal trabalho também em uma sala de grande porte com acústica variável.

Referências

ADELMAN-LARSEN, N. W.; THOMPSON, E. R.; GADE, A. C. Suitable reverberation times for halls for rock and pop music. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 127, n. 1, p. 247–255, 2010.

AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não Lineares Aplicadas a Sistemas Reais**. 3a. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

AJA. *Workshop on Room Acoustics Measurements - Analysis of Comparative Measurements*. United Kingdom, 2004. Report 9506/2. Disponível em: <<http://www.adrianjamesacoustics.co.uk/papers/nplreport.pdf>>. Acesso em: 6/6/2017.

BEHRINGER. *Measurement Condenser Microphone: ECM8000 Technical Specifications*. [S.l.]. Disponível em: <https://media.music-group.com/media/PLM/data/docs/P0118/ECM8000_P0118_S_EN.pdf>. Acesso em: 2/6/2017.

BERANEK, L. **Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture**. 2a. ed. New York: Springer-Verlag, 2004.

BERANEK, L. L. Subjective rank-orderings and acoustical measurements for fifty-eight concert halls. **Acta Acustica United with Acustica**, S. Hirzel Verlag, v. 89, n. 3, p. 494–508, 2003.

B&K. *Instruction Manual: Hand-held Analyzer Typer 2250, 2250-L and 2270*. [S.l.].

_____. *Product Data: Sound Sources and Impact Sound Source for Building Acoustics*. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1689.ashx>>.

BRADLEY, J.; REICH, R.; NORCROSS, S. A just noticeable difference in c50 for speech. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 58, n. 2, p. 99–108, 1999.

BRANDAO, E. **Acústica de Salas: Projeto e Modelagem**. São Paulo: Blucher, 2016.

CAMPANINI, S.; FARINA, A. A new audacity feature: Room objective acoustical parameters calculation module. **Linux Audio Conference, paper B**, v. 2, 2009.

CHU, W. T. Comparison of reverberation measurements using schroeder's impulse method and decay-curve averaging method. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 63, n. 5, p. 1444–1450, 1978.

FARINA, A. **Aurora for Audacity**. [S.l.]. Disponível em: <<http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Aurora-for-Audacity/>>. Acesso em: 4/6/2017.

_____. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. In: **Audio Engineering Society Convention 108**. [s.n.], 2000. Disponível em: <<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10211>>.

_____. Advancements in impulse response measurements by sine sweeps. In: **Audio Engineering Society Convention 122**. [s.n.], 2007. Disponível em: <<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14106>>.

_____. Impulse response measurements. In: **23rd Nordic Sound Symposium**. [S.l.: s.n.], 2007.

GUY-BART, S.; JEAN-JACQUES, E.; DOMINIQUE, A. Comparison of different impulse response measurement techniques. Dezembro 2002.

HIDAKA, T.; BERANEK, L. L. Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in europe, japan, and the americas. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 107, n. 1, p. 368–383, 2000.

HIRATA, Y. A method of eliminating noise in power responses. **Journal of Sound and Vibration**, Academic Press, v. 82, n. 4, p. 593–595, 1982.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61260:1995 - Eletroacoustics - Octave-band and Fractional-octave Band Filters**. [S.l.], 1995.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 18233:2006 - Acoustics - Application of New Measurement Methods in Building and Room Acoustics**. [S.l.], 2006.

_____. **ISO 3382 - Acoustics - Measurement of Room Acoustic Parameters: Part 2: Reverberation time in ordinary rooms**. [S.l.], 2008.

_____. **ISO 3382 - Acoustics - Measurement of Room Acoustic Parameters: Part 1: Performance spaces**. [S.l.], 2009.

KUTTRUFF, H. **Room Acoustics**. 4a. ed. London: Spon Press, 2000.

LARA, L. T.; PASQUAL, A. M.; VECCI, M. A. de M. The effects of the excitation source directivity on some room acoustic descriptors obtained from impulse response measurements. In: **Proceedings of the 22nd International Congress on Acoustics**. [S.l.: s.n.], 2016.

LUNDEBY, A. et al. Uncertainties of measurements in room acoustics. **Acta Acustica United with Acustica**, S. Hirzel Verlag, v. 81, n. 4, p. 344–355, 1995.

M-AUDIO. **Studiophile BX5: Users Manual**. [S.l.]. Disponível em: <<http://www.analfatecnicos.net/archivos/44.Manual-M-AudioBX5.pdf>>. Acesso em: 4/6/2017.

MÜLLER, S.; MASSARANI, P. Transfer-function measurement with sweeps. **Journal of the Audio Engineering Society**, v. 49, n. 6, p. 443–471, 2001. Disponível em: <<http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10189>>.

NOCETI FILHO, S. **Fundamentos Sobre Ruídos: Parte I – Densidade Espectral De Potência**. [S.l.]. Disponível em: <<http://www.etelj.com.br/etelj/artigos/151280402b0bc1accfaea913d6301caf.pdf>>. Acesso em: 8/6/2017.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. **Sinais e Sistemas**. 2a. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. Tradução Daniel Vieira.

SABINE, W. C. **Collected Papers on Acoustics, by Wallace Clement Sabine**. [S.l.]: Harvard up, 1922.

SCHROEDER, M. R. New method of measuring reverberation time. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 37, n. 3, p. 409–412, 1965.

_____. The “schroeder frequency” revisited. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 99, n. 5, p. 3240–3241, 1996.

SCHROEDER, M. R.; GOTTLOB, D.; SIEBRASSE, K. Comparative study of european concert halls: Correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 56, n. 4, p. 1195–1201, 1974.

SKÅLEVIK, M. Reverberation time – the mother of all room acoustic parameters. In: **CD Proceedings of 20th International Congress on Acoustic, ICA**. [S.l.: s.n.], 2010. v. 10.

VORLÄNDER, M. What do we know in room acoustics? 2011. Disponível em: <https://www2.ak.tu-berlin.de/~akgroup/ak_pub/seacen/2011/Vorlaender_2011_P2_What_do_we_know_in_room_acoustics.pdf>. Acesso em: 1/6/2017.

VORLÄNDER, M.; BIETZ, H. Comparison of methods for measuring reverberation time. **Acta Acustica united with Acustica**, S. Hirzel Verlag, v. 80, n. 3, p. 205–215, 1994.