UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA

AVALIAÇÃO E ADEQUAÇÃO ACÚSTICA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL – TEATRO ARMANDO GONZAGA

GUILHERME COUTINHO FAGERLANDE

ORIENTADORA:
MARIA LYGIA ALVES DE NIEMEYER

COORIENTADOR:
JULIO CESAR BOSCHER TORRES

(BANCA FINAL DE MESTRADO)

RIO DE JANEIRO
JUNHO | 2020

AVALIAÇÃO E ADEQUAÇÃO ACÚSTICA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL - TEATRO ARMANDO GONZAGA

GUILHERME COUTINHO FAGERLANDE

ORIENTADORA:

MARIA LYGIA ALVES DE NIEMEYER

COORIENTADOR:

JULIO CESAR BOSCHER TORRES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA, FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ARQUITETURA, NA LINHA DE PESQUISA PROJETO, ARQUITETURA E SUSTENTABILIDADE

APROVADA POR:

PROF.ª DR.ª M. LYGIA ALVES DE NIEMEYER | PROARQ (ORIENTADORA)

PROF. DR. JÚLIO CESAR BOSCHER TORRES | POLI-UFRJ (COORIENTADOR)

PROF.ª DR.ª MONICA SANTOS SALGADO | PROARQ -UFRJ

PROF. DR. LEOPOLDO EURICO GONÇALVES BASTOS | PROARQ - UFRJ

PROF. DR. JOÃO GUILHERME RIPPER | ESCOLA DE MÚSICA – EM - UFRJ

PROFA. DRA. MARINA MEDEIROS CORTÊS | DAU – IT - UFRRJ

(BANCA FINAL DE MESTRADO)
RIO DE JANEIRO
JUNHO | 2020

CIP - Catalogação na Publicação

Fagerlande, Guilherme
FF153a Avaliação e adequação acústica através de simulação computacional - Teatro Armando Gonzaga / Guilherme Fagerlande. -- Rio de Janeiro, 2020.
119 f.

Orientadora: Maria Lygia Niemeyer.
Coorientador: Julio Cesar Torres.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, 2020.

1. Acústica de salas. 2. Affonso Eduardo Reidy. 3. Simulação acústica. 4. Teatro Armando Gonzaga. 5. Parâmetros acústicos. I. Niemeyer, Maria Lygia , orient. II. Torres, Julio Cesar, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

RESUMO

AVALIAÇÃO E ADEQUAÇÃO ACÚSTICA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL – TEATRO ARMANDO GONZAGA

GUILHERME COUTINHO FAGERLANDE

ORIENTADORA:

MARIA LYGIA ALVES DE NIEMEYER

COORIENTADOR:

JULIO CESAR BOSCHER TORRES

RESUMO DA DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA, FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ARQUITETURA.

Em geral, as salas de espetáculo de uso público são projetadas para diversos usos visando economia e praticidade. Porém para cada uso existem características acústicas ideais diferentes. Essas salas acabam tendo uma configuração fixa, que atende a somente um tipo de uso, ou uma configuração que não atende perfeitamente a nenhum tipo de uso. O Teatro Armando Gonzaga, projetado pelo arquiteto Affonso Eduardo Reidy, é o único equipamento cultural no bairro de Marechal Hermes. Tombado pelo INEPAC (Instituto Estadual de Patrimônio Cultural), hoje se encontra com muitos problemas de manutenção. Utilizado para diferentes finalidades, como peças de teatro, música acústica e música amplificada, o teatro, quando foi inaugurado em 1954, não dispôs da tecnologia da acústica que hoje se apresenta com avanços notáveis. Medições sonoras no teatro apontam características que não atendem totalmente o tempo de reverberação requisitado para as apresentações exibidas nesse equipamento cultural. O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar e propor adequações acústicas no Teatro Armando Gonzaga através de simulação computacional. Os métodos utilizados são as simulações da situação atual comparada às medições no local, e de situações propostas com intervenções arquitetônicas, em duas situações: para os usos da música acústica e da palavra. Os parâmetros acústicos requisitados para as duas finalidades não são os mesmos, por isso a proposta de elementos arquitetônicos ajustáveis para a sala. Os resultados mostram que essas adequações são possíveis e podem melhorar o condicionamento acústico da edificação, tanto para palavra quanto para música, atendendo aos parâmetros acústicos requeridos, mas respeitando as suas características originais.

PALAVRAS-CHAVES: Simulação Acústica; Teatro Armando Gonzaga; Parâmetros Acústicos.

(BANCA FINAL DE MESTRADO)

RIO DE JANEIRO

Junho | 2020

ABSTRACT

EVALUATION AND ACOUSTIC SUITABILITY THROUGH COMPUTATIONAL SIMULATION - ARMANDO GONZAGA THEATER

GUILHERME COUTINHO FAGERLANDE

ORIENTADORA:

MARIA LYGIA ALVES DE NIEMEYER

COORIENTADOR:

JULIO CESAR BOSCHER TORRES

ABSTRACT OF THE DISSERTATION SUBMITTED TO THE ARCHITECTURE POST-GRADUATION PROGRAM OF THE FACULTY OF ARCHITECTURE AND URBANISM OF THE FEDERAL UNIVERSITY OF RIO DE JANEIRO – UFRJ - AS PART OF THE NECESSARY REQUIREMENTS TO OBTAINING THE MASTER'S DEGREE IN ARCHITECTURAL SCIENCES.

In general, public use theaters are designed for various uses aiming at economy and practicality. However for each use there are different ideal acoustic characteristics. These rooms end up having a fixed configuration, which serves only one type of use, or a configuration that does not perfectly fit any type of use. The Armando Gonzaga Theater, designed by architect Affonso Eduardo Reidy, is the only cultural facility in the neighborhood of Marechal Hermes. Listed by INEPAC (State Institute of Cultural Heritage), today it faces many maintenance problems. Used for different purposes, such as theater plays, acoustic music and amplified music, the theater when it opened in 1954 did not have the technology of acoustics that today presents itself with remarkable advances. Sound measurements in the theater point out characteristics that do not fully meet the reverberation time required for the presentations shown in this cultural equipment. The general objective of this work is to evaluate and propose acoustic adjustments in Teatro Armando Gonzaga through computer simulation. The methods used are simulations of the current situation compared to measurements on the spot, and of situations proposed with architectural interventions, in two situations: for the uses of acoustic music and words. The acoustic parameters required for both purposes are not the same, which is why the proposal for adjustable architectural elements for the room. The results show that these adjustments are possible and can improve the building's acoustic conditioning, both for words and music, meeting the required acoustic parameters, but respecting their original characteristics.

KEYWORDS: Acoustic Simulation; Armando Gonzaga Theater; Acoustic Parameters.

(BANCA FINAL DE MESTRADO)

RIO DE JANEIRO

JUNHO | 2020

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 – FREQUÊNCIAS DAS NOTAS DA ESCALA TEMPERADA EM DIFERENTES INSTRUMENTOS 9

FIGURA 2.2 – ONDAS SONORAS 10

FIGURA 2.3 – VARIAÇÃO DA ENERGIA SONORA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA D, DE UMA FONTE PONTUAL 13

FIGURA 2.4 – O OUVIDO HUMANO E AS FREQUÊNCIAS 15

FIGURA 2.5 – AUDIOGRAMA NORMAL MÉDIO 16

FIGURA 2.6 – CURVAS ISOFÔNICAS DE FLETCHER E MUNSON 16

FIGURA 2.7 – CURVA DE PONDERAÇÃO "A" 17

FIGURA 2.8 – TRANSMISSÃO, ABSORÇÃO E REFLEXÃO DO SOM 19

FIGURA 2.9 – DIFRAÇÃO EM ARESTA E EM ORIFÍCIO 20

FIGURA 2.10 – INTERFERÊNCIA ENTRE DOIS SINAIS IGUAIS 21

FIGURA 2.11 – INTERFERÊNCIA ENTRE DOIS SINAIS OPOSTOS 21

FIGURA 2.12 – ABSORÇÃO DO AR NA FREQUÊNCIA DE 500HZ, DE ACORDO COM A UMIDADE RELATIVA (%) E A TEMPERATURA (°C) 25

FIGURA 2.13 – ABSORÇÃO DO AR NA FREQUÊNCIA DE 1000HZ, DE ACORDO COM A UMIDADE RELATIVA (%) E A TEMPERATURA (°C) 25

FIGURA 2.14 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO IDEAL DE ACORDO COM VOLUME DA SALA E USO (NBR 12179, 1992) 26

FIGURA 2.15 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO ÓTIMO DE ACORDO COM VOLUME DA SALA E USO (TISSEYRE,2009) 26

FIGURA 2.16 – DECAIMENTO DO NPS EM FUNÇÃO DO TEMPO E DO RUÍDO DE FUNDO 28

FIGURA 2.17 – DETALHE DA CURVA DE MEDIÇÃO DE DECAIMENTO DA PRESSÃO SONORA 29

FIGURA 2.18 – EXEMPLO DE RESPOSTA IMPULSIVA 30

FIGURA 2.19 – INTIMISMO E ITDG 34

FIGURA 2.20 – SOFTWARE SKETCH UP COM O PLUG-IN RAVEN 39

FIGURA 2.21 – PROCESSO DE AUDIBILIZAÇÃO 40

FIGURA 3.1 – DIAGRAMA DA METODOLOGIA 42

FIGURA 3.2 – VISTA EXTERNA DO TEATRO ARMANDO GONZAGA 43

FIGURA 3.3 – PLANTAS E CORTE DO TEATRO 44

FIGURA 3.4 – PROJETO DE REFORMA – PLANTA PAV. TÉRREO 45

FIGURA 3.5 – PROJETO DE REFORMA – PLANTA PAV. SUPERIOR 45

FIGURA 3.6 – PROJETO DE REFORMA – CORTES 46

FIGURA 3.7 – ANEXOS DO TEATRO CONSTRUÍDOS POSTERIORMENTE 47

FIGURA 3.8 – NOTÍCIA DE JORNAL 48

FIGURA 3.9 – FACHADAS DO TEATRO 48

FIGURA 3.10 – INTERIOR DO TEATRO 49

FIGURA 3.11 – MEDIÇÕES DE SOM RESIDUAL DO AUDITÓRIO 51

FIGURA 3.12 – MEDIÇÕES ACÚSTICAS DE TEMPO DE REVERBERAÇÃO DO AUDITÓRIO 52

FIGURA 3.13 – PARÂMETRO T_{20} MEDIDO NOS 6 RECEPTORES, SALA NO ESTADO ATUAL 53

FIGURA 3.14 – PARÂMETRO T_{30} MEDIDO NOS 6 RECEPTORES, SALA NO ESTADO ATUAL 53

FIGURA 3.15 – PARÂMETRO EDT MEDIDO NOS 6 RECEPTORES, SALA NO ESTADO ATUAL 54

FIGURA 3.16 – PARÂMETRO TC MEDIDO NOS 6 RECEPTORES, SALA NO ESTADO ATUAL 54

FIGURA 3.17 – PARÂMETRO C_{80} MEDIDO NOS 6 RECEPTORES, SALA NO ESTADO ATUAL 55

FIGURA 3.18 – PARÂMETRO D_{50} MEDIDO NOS 6 RECEPTORES, SALA NO ESTADO ATUAL 55

FIGURA 3.19 – MODELO TRIDIMENSIONAL DA SITUAÇÃO ATUAL NO SOFTWARE AUTOCAD 57

FIGURA 3.20 – TEMPERATURA MÉDIA POR MÊS (°C), CIDADE DO RIO DE JANEIRO 58

FIGURA 3.21 – UMIDADE RELATIVA MÉDIA POR MÊS (°C), CIDADE DO RIO DE JANEIRO 59

FIGURA 3.22 – MODELO TRIDIMENSIONAL DA SALA EXISTENTE NO SOFTWARE BRASS 59

FIGURA 3.23 – RAIOS PERDIDOS NA SIMULAÇÃO 60

FIGURA 3.24 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO T_{30} – MEDIDO X SIMULADO 61

FIGURA 3.25 – RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 1 62

FIGURA 3.26 – RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 2 62

FIGURA 3.27 – RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 3 63

FIGURA 3.28 – RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 4 63

FIGURA 3.29 – RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 5 64

FIGURA 3.30 – RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 6 64

FIGURA 3.31 – MÓDULO DA RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 1 65

FIGURA 3.32 – MÓDULO DA RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 2 65

FIGURA 3.33 – MÓDULO DA RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 3 66

FIGURA 3.34 – MÓDULO DA RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 4 66

FIGURA 3.35 – MÓDULO DA RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 5 67

FIGURA 3.36 – MÓDULO DA RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 6 67

FIGURA 3.37 – EDT MEDIDO X SIMULADO 68

FIGURA 3.38 – TC MEDIDO X SIMULADO 69

FIGURA 3.39 – C_{80} MEDIDO X SIMULADO 70

FIGURA 3.40 – D_{50} MEDIDO X SIMULADO 71

FIGURA 3.41 – GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DA MÉDIA DAS MEDIÇÕES, MÉDIA DAS SIMULAÇÕES, TR DE SABINE E TR DE EYRING 72

FIGURA 3.42 – SIMULAÇÃO TR NOS 6 RECEPTORES (SALA EXISTENTE COM 2/3 DE OCUPAÇÃO) 74

FIGURA 3.43 – MÉDIA DAS SIMULAÇÕES, TR DE SABINE E TR DE EYRING PARA A SALA OCUPADA 75

FIGURA 3.44 – T_{30} MÉDIO OBTIDO PARA UMA OCUPAÇÃO DE 2/3 DA PLATEIA, E TR IDEAIS PARA MÚSICA 76

FIGURA 3.45 – T_{30} MÉDIO OBTIDO PARA UMA OCUPAÇÃO DE 2/3 DA PLATEIA, E TR IDEAIS PARA PALAVRA 77

FIGURA 3.46 – GEOMETRIA DA SALA EXISTENTE – CORTE 78

FIGURA 3.47 – PLANTA BAIXA DA SALA EXISTENTE 78

FIGURA 3.48 – MÓDULO DE PAINÉIS DESLIZANTES DE PAREDE LATERAL 79

FIGURA 3.49 – MATERIAIS UTILIZADOS NA INTERVENÇÃO 80

FIGURA 3.50 – AUDITÓRIO CONFIGURADO PARA MÚSICA NO AUTOCAD 81

FIGURA 3.51 – AUDITÓRIO CONFIGURADO PARA MÚSICA NO BRASS 81

FIGURA 3.52 – AUDITÓRIO CONFIGURADO PARA PALAVRA NO AUTOCAD 82

FIGURA 3.53 – AUDITÓRIO CONFIGURADO PARA PALAVRA NO BRASS 83

FIGURA 4.1 – MÉDIA DAS SIMULAÇÕES TR INTERVENÇÃO SALA OCUPADA X TR IDEAL (MÚSICA) 84

FIGURA 4.2 – MÉDIA DAS SIMULAÇÕES TR INTERVENÇÃO SALA OCUPADA X TR IDEAL (PALAVRA) 85

FIGURA 4.3 – TR DA SALA EXISTENTE X MÉDIA DO TR DAS SIMULAÇÕES PARA MÚSICA X MÉDIA DO TR DAS SIMULAÇÕES PARA PALAVRA X TR IDEAIS PARA MÚSICA E PALAVRA (CARVALHO, 2010) 86

FIGURA 4.4 – MÉDIAS DAS SIMULAÇÕES DA INTERVENÇÃO 87

FIGURA 4.5 – T_{30} SIMULADO DA SALA EXISTENTE OCUPADA, T_{30} DA SALA COM INTERVENÇÃO PARA MÚSICA, E TR RECOMENDADO PARA MÚSICA (CARVALHO, 2010), NOS 6 RECEPTORES 89

FIGURA 4.6 – T_{30} SIMULADO DA SALA EXISTENTE OCUPADA, T_{30} DA SALA COM INTERVENÇÃO PARA PALAVRA, E TR RECOMENDADO PARA PALAVRA (CARVALHO, 2010), NOS 6 RECEPTORES 90

FIGURA 4.7 – C_{80} SIMULADO DA SALA EXISTENTE OCUPADA, C_{80} DA SALA COM INTERVENÇÃO PARA MÚSICA, E C_{80} COM INTERVENÇÃO PARA PALAVRA, NOS 6 RECEPTORES 92

FIGURA 4.8 – D_{50} SIMULADO DA SALA EXISTENTE OCUPADA, D_{50} DA SALA COM INTERVENÇÃO PARA MÚSICA, E D_{50} COM INTERVENÇÃO PARA PALAVRA, NOS 6 RECEPTORES 93

FIGURA 4.9 – TC SIMULADO DA SALA EXISTENTE OCUPADA, TC DA SALA COM INTERVENÇÃO PARA MÚSICA, E TC COM INTERVENÇÃO PARA PALAVRA, NOS 6 RECEPTORES 94

FIGURA 4.10 – EDT SIMULADO DA SALA EXISTENTE OCUPADA, EDT DA SALA COM INTERVENÇÃO PARA MÚSICA, E EDT COM INTERVENÇÃO PARA PALAVRA, NOS 6 RECEPTORES 96

FIGURA 4.11 – GRÁFICO CALOR NA INTERVENÇÃO PARA MÚSICA 97

FIGURA 4.12 – GRÁFICO CALOR NA INTERVENÇÃO PARA PALAVRA 99

FIGURA 4.13 – GRÁFICO BRILHO NA INTERVENÇÃO PARA MÚSICA 100

FIGURA 4.14 – GRÁFICO BRILHO NA INTERVENÇÃO PARA PALAVRA 101

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1 – VELOCIDADE DO SOM EM DIFERENTES MEIOS 8

TABELA 2.2 – RELAÇÃO ENTRE FREQUÊNCIAS DAS NOTAS MUSICAIS NA ESCALA NATURAL EM DÓ MAIOR 8

TABELA 2.3 – RUÍDO, PRESSÃO, NPS E IMPRESSÃO SUBJETIVA 14

TABELA 2.4 – CÁLCULO DE DB PARA DB(A) POR FREQUÊNCIA 17

TABELA 2.5 – VALORES DE REFERÊNCIA DE SOM RESIDUAL 19

TABELA 2.6 – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DO AR 25

TABELA 2.7 – FATOR DE CORREÇÃO DO TR ÓTIMO PARA DIFERENTES FREQUÊNCIAS (COSTA, 2003) 27

TABELA 2.8 – FATOR DE CORREÇÃO DO TR ÓTIMO PARA DIFERENTES FREQUÊNCIAS (CARVALHO, 2010) 27

TABELA 2.9 – FATOR DE CORREÇÃO DO TR ÓTIMO PARA DIFERENTES FREQUÊNCIAS (BRANDÃO, 2016) 27

TABELA 2.10 – CLAREZA C_{80} E TIPO DE MÚSICA 31

TABELA 2.11 – CRITÉRIO DE MÉRITO PARA CALOR NA MÚSICA 33

TABELA 2.12 – MATERIAIS RÍGIDOS DE BAIXA ABSORÇÃO SONORA 36

TABELA 2.13 – MATERIAIS COM MAIOR ABSORÇÃO SONORA EM ALTAS FREQUÊNCIAS 36

TABELA 2.14 – MATERIAIS COM MAIOR ABSORÇÃO SONORA EM BAIXAS FREQUÊNCIAS 37

TABELA 2.15 – PROGRAMAS PARA SIMULAÇÕES ACÚSTICAS COMPUTACIONAIS DE SALAS 39

TABELA 3.1 – MEDIÇÕES ACÚSTICAS DE SOM RESIDUAL NO INTERIOR DO AUDITÓRIO 51

TABELA 3.2 – MATERIAIS EXISTENTES, REFERÊNCIA, LOCAL DE APLICAÇÃO E COEFICIENTES DE ABSORÇÃO NAS DIFERENTES FAIXAS DE FREQUÊNCIA 58

TABELA 3.3 – COMPARAÇÃO DA MÉDIA DAS MEDIÇÕES, MÉDIA DAS SIMULAÇÕES, TR DE SABINE E TR DE EYRING 72

TABELA 3.4 – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO PARA AS POLTRONAS NO AUDITÓRIO OCUPADO 73

TABELA 3.5 – VALORES SIMULADOS DE TR (SALA COM 2/3 DE OCUPAÇÃO) 73

TABELA 3.6 – TRS IDEAIS POR DIFERENTES AUTORES (SALA EXISTENTE COM 2/3 DE OCUPAÇÃO) 75

TABELA 3.7 – MATERIAIS EMPREGADOS NAS INTERVENÇÕES, LOCAL DE APLICAÇÃO E SUAS CURVAS DE ABSORÇÃO 80

TABELA 4.1 – MÉDIA SIMULAÇÕES TR INTERVENÇÃO SALA OCUPADA X TR IDEAL (MÚSICA) 84

TABELA 4.2 – MÉDIA SIMULAÇÕES TR INTERVENÇÃO SALA OCUPADA X TR IDEAL (PALAVRA) 85

TABELA 4.3 – CALOR NA INTERVENÇÃO PARA MÚSICA 97

TABELA 4.4 – CALOR NA INTERVENÇÃO PARA PALAVRA 98

TABELA 4.5 – BRILHO NA INTERVENÇÃO PARA MÚSICA 99

TABELA 4.6 – BRILHO NA INTERVENÇÃO PARA PALAVRA 100

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SOM NO AR 7

EQUAÇÃO 2 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SOM NO AR A 21°C 7

EQUAÇÃO 3 – PRESSÃO SONORA 8

EQUAÇÃO 4 – FREQUÊNCIA E PERÍODO 8

EQUAÇÃO 5 – COMPRIMENTO DE ONDA 10

EQUAÇÃO 6 – INTENSIDADE SONORA (I) 11

EQUAÇÃO 7 – INTENSIDADE SONORA (II) 11

EQUAÇÃO 8 – PRESSÃO ACÚSTICA EFICAZ 11

EQUAÇÃO 9 – NÍVEL DE INTENSIDADE SONORA (I) 12

EQUAÇÃO 10 – NÍVEL DE INTENSIDADE SONORA (II) 12

EQUAÇÃO 11 – NÍVEL DE PRESSÃO SONORA 12

EQUAÇÃO 12 – VARIAÇÃO DO NÍVEL DE PRESSÃO SONORA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA 12

EQUAÇÃO 13 – NÍVEL DE PRESSÃO SONORA EQUIVALENTE 18

EQUAÇÃO 14 – NÍVEL DE PRESSÃO SONORA EQUIVALENTE PONDERADO EM "A" 18

EQUAÇÃO 15 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO – FÓRMULA DE SABINE 23

EQUAÇÃO 16 – ABSORÇÃO SONORA TOTAL DA FÓRMULA DE SABINE 23

EQUAÇÃO 17 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO – FÓRMULA DE EYRING 23

EQUAÇÃO 18 – FÓRMULA DE SABINE COM ABSORÇÃO DO AR 24

EQUAÇÃO 19 – FÓRMULA DE EYRING COM ABSORÇÃO DO AR 24

EQUAÇÃO 20 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO T_{20} 28

EQUAÇÃO 21 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO T_{30} 29

EQUAÇÃO 22 – FATOR DE CLAREZA (C_{80}) 32

EQUAÇÃO 23 – DEFINIÇÃO (D_{50}) 32

EQUAÇÃO 24 – TEMPO CENTRAL 32

EQUAÇÃO 25 – CALOR OU RAZÃO DE GRAVES (*BASS RATIO*) 33

EQUAÇÃO 26 – BRILHO OU RAZÃO DE AGUDOS (*TREBLE RATIO*) 33

EQUAÇÃO 27 – ITDG 34

EQUAÇÃO 28 – FATOR DE FORÇA G 35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 7

2.1 CONCEITOS BÁSICOS: A ONDA SONORA 7

- Som 7
- Onda Sonora 7
- Pressão Sonora 8
- Período e Frequência 8
- Comprimento de Onda 10
- Timbre 11
- Fonte Sonora 11
- Potência Sonora 11
- Intensidade Sonora 11
- Pressão Acústica Eficaz 11
- Bel e Decibel 12
- Nível de Intensidade Sonora 12
- Nível de Pressão Sonora (NPS) 12

2.2 A PERCEPÇÃO DO SOM PELO HOMEM 15

- Curvas Isofônicas 15
- Nível de Pressão Sonora ponderado em “A” 17
- Nível de Pressão Sonora Equivalente 17
- Nível de Pressão Sonora Equivalente ponderado em A 18
- Som Residual em Auditórios 18

2.3 ACÚSTICA RELACIONADA A SALAS DE ESPETÁCULO 19

2.3.1 PROPAGAÇÃO SONORA 19

- Reflexão e Absorção 20
- Difração 20
- Difusão 20

- Interferência 20
- Modos Acústicos e Ondas Estacionárias 21
- Ressonância 22
- Eco 22
- *Flutter Echo* 22

2.3.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO 22

- Fórmula de Sabine 22
- Fórmula de Eyring 23
- Fórmulas de Sabine e Eyring considerando a absorção do ar 24
- Tempo de Reverberação Ótimo 25
- Medição do Tempo de Reverberação 28

2.3.3 RESPOSTA IMPULSIVA 29

2.3.4 OUTROS PARÂMETROS ACÚSTICOS ALÉM DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO 30

- Fator de Clareza e Definição 30
- Tempo Central (TC) 32
- Tempo de Decaimento Inicial (EDT – *Early Decay Time*) 32
- Calor ou Razão de Graves 33
- Brilho ou Razão de Agudos 33
- Vivacidade 33
- Intimismo 34
- Fator de Força 34
- Nível de Som Direto 35
- Coloração 35
- Inteligibilidade 35

2.4 MATERIAIS E SUAS APLICAÇÕES PARA SALAS 36

2.5 SIMULAÇÕES ACÚSTICAS EM SALAS DE ESPETÁCULO 37

2.5.1 MÉTODOS DE SIMULAÇÃO 37

2.5.2 AUDIBILIZAÇÃO 39

2.5.3 BRAZILIAN ROOM ACOUSTIC SIMULATOR 40
3 METODOLOGIA 42
3.1 O TEATRO ARMANDO GONZAGA 43
3.1.1 BREVE HISTÓRICO 43
3.1.2 CONDIÇÕES ATUAIS DO TEATRO 47
3.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA 50
• Etapa A: Levantamento Geométrico 50
• Etapa B: Medições Acústicas 50
• Etapa 1: Modelo Geométrico 56
• Etapa 2: Exportação para o Simulador Acústico 57
• Etapa 3: Associação de Dados Geométricos e Acústicos 57
• Etapa 4: Simulação Acústica 60
• Etapa 5: Resultados da Simulação 60
• Etapa C: Validação do Modelo 60
• Comparação das Medições e Simulações Acústicas aos Métodos de Sabine e Eyring 71
• Etapa 6: Verificação de Atendimento às Metas Estabelecidas 73
• Etapa 7: Alteração do Modelo Geométrico Acústico 77
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 84
4.1 MÉDIAS DOS RESULTADOS 84
4.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30}) 88
• Intervenção para Música 88
• Intervenção para Palavra 89
4.3 CLAREZA (C_{80}) 90
4.4 DEFINIÇÃO (D_{50}) 92
4.5 TEMPO CENTRAL (TC) 94
4.6 TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT) 95
4.7 CALOR OU RAZÃO DE GRAVES (BR – *BASS RATIO*) 97
4.8 BRILHO OU RAZÃO DE AGUDOS (TR – *TREBLE RATIO*) 99
5 CONCLUSÕES 102

- Propostas de Trabalhos Futuros 103

BIBLIOGRAFIA 104

ANEXO I – MATÉRIA DO JORNAL “O GLOBO”, 25/05/2018 107

ANEXO II – MAPEAMENTO DE PATOLOGIAS CONSTRUTIVAS 109

ANEXO III – MEDIÇÕES DE TEMPO DE REVERBERAÇÃO NA SALA 112

ANEXO IV – GRÁFICOS DE DECAIMENTO DE ENERGIA DAS MEDIÇÕES 114

1 INTRODUÇÃO

O Rio de Janeiro é uma capital brasileira com importante concentração de atividades artísticas. Em função disso, possui diversos equipamentos culturais destinados a música, teatro, cinema etc. Muitos desses equipamentos, além da relevância cultural, possuem reconhecimento histórico. A cidade, fundada em 1565 e que foi capital do país de 1763 a 1960, passou por diversos momentos prestigiados da arquitetura nacional e internacional, abrangendo obras que se tornaram consagradas.

Um dos arquitetos expoentes da arquitetura carioca e brasileira, Affonso Eduardo Reidy, participou do projeto do primeiro arranha-céu modernista do mundo: o edifício do Ministério da Educação no Rio de Janeiro. Junto a Lucio Costa, Oscar Niemeyer entre outros arquitetos, consolidou uma identidade para a arquitetura moderna carioca e brasileira. Fez projetos de destaque como o Museu de Arte Moderna do Rio, o Parque do Flamengo, o Conjunto Habitacional do Pedregulho, o Conjunto Habitacional Marquês de São Vicente, dentre as obras mais famosas. Foi um arquiteto preocupado com a sociedade, o bem-estar para todas as classes sociais, como podemos ver nos projetos do Pedregulho e Marquês de São Vicente (este, ainda não terminado e atravessado por uma via expressa num túnel posteriormente construído através do edifício).

Cabe aqui destacar um pequeno teatro, inaugurado em 1954, no bairro de Marechal Hermes, zona norte do Rio de Janeiro, desenhado por Reidy. Quando todos os equipamentos culturais se encontravam no centro e na zona sul da cidade, este arquiteto, funcionário da prefeitura, realizou um projeto de teatro para uma população com menor oferta de lazer e cultura, que poderia ofertar peças e shows dos mais variados: o Teatro Armando Gonzaga. Pela sua importância histórica, o teatro foi tombado em 1989 pelo INEPAC (Instituto Estadual de Patrimônio Cultural) e hoje em dia está em uso e se encontra com problemas de manutenção.

Utilizado para diversas finalidades, como peças de teatro, música acústica e música amplificada, o teatro quando foi inaugurado não dispôs da tecnologia da acústica que hoje se apresenta com avanços notáveis. Hoje existem diversas opções de programas de simulações acústicas que representam o ambiente acústico muito próximo da realidade, e os materiais acústicos evoluíram muito, apresentando inúmeras soluções que podem se adequar a diferentes necessidades em projeto. Medições sonoras no teatro apontam características que não atendem ao desempenho acústico requisitado para as apresentações exibidas nesse equipamento cultural.

As salas de espetáculo de uso público geralmente são utilizadas para diversas finalidades, com o objetivo de obter economia e praticidade, e acabam sendo projetadas com uma configuração fixa. Contudo, para cada uso são necessárias características acústicas ideais diferentes. A configuração fixa dificilmente consegue atender acusticamente a dois tipos de uso, satisfazendo as necessidades de apenas uma finalidade, ou atendendo parcialmente aos dois ideais.

Sendo o Teatro Armando Gonzaga uma obra arquitetônica de importância histórica, e ao mesmo tempo utilizada para diversas finalidades, neste trabalho é questionada a possibilidade de se fazer intervenções arquitetônicas que, da mesma maneira em que adequassem o espaço de acordo com a apresentação, respeitassem as exigências do tombamento do edifício. Sendo essas intervenções de investimento público, são estudados meios

de fazê-las a baixo custo, de forma que possam ser reproduzidas em outros teatros populares, através de um método para avaliar a qualidade acústica de salas de espetáculo para duas ou mais funções.

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar e propor adequações acústicas no Teatro Armando Gonzaga através de simulação computacional. Os objetivos específicos são: 1) diagnosticar os principais fatores que influenciam na qualidade acústica do espaço interno do Teatro; 2) utilizar um método de análise de parâmetros acústicos do Teatro com o uso do simulador acústico BRASS (programa que está em desenvolvimento pelo Professor Julio Cesar Boscher Torres, coorientador deste trabalho, na Escola Politécnica da UFRJ); 3) apresentar soluções ajustáveis para a correção dos parâmetros acústicos do Teatro, utilizando o BRASS.

As novas tecnologias na acústica arquitetônica possibilitam simular o espaço existente, assim como simular uma proposta de intervenção para ele, apresentando as características acústicas da situação existente e da proposta simulada, de forma a garantir um melhor resultado. Alguns aspectos são imprescindíveis para a qualidade acústica de salas de espetáculo, como a forma do espaço interno, os materiais que compõem suas superfícies internas e o isolamento sonoro (sendo este terceiro não aprofundado neste trabalho). Na história entrelaçada da arquitetura e da música, os espaços para música foram se transformando, atendendo às necessidades da música de cada período, e de acordo com as descobertas nas pesquisas no campo da acústica. Essas necessidades, na maioria das vezes, estão associadas ao tempo de reverberação e aos materiais que compõem as superfícies internas dos recintos.

- **Música e Arquitetura**

No período medieval, a música era dividida em dois gêneros: a música sacra e a música secular. A música sacra medieval, vinculada ao canto gregoriano (referência ao papa Gregório I, que criou regras para esse tipo de música), é considerada a forma mais antiga de música ainda em uso, e relacionada às catedrais românicas. Nesse gênero, a música é cantada em solo ou em coro uníssono de forma lenta para a devida compreensão. Os espaços ideais para esse tipo de música, como as igrejas feitas com pedra, possuem longos tempos de reverberação, algumas vezes chegando a até dez segundos ou mais em todas as frequências. Já a música secular tem seu principal movimento feito pelos trovadores (*troubadours*, em francês, significa inventores de texto e melodia), que faziam música ao ar livre com tambores (Schmidt, 2011).

No período da Renascença, a polifonia que havia sido criada na música secular, passou a ser utilizada nas igrejas. Giovanni Gabrielli (1555-1612) escreveu diversas *Canzoni* para a basílica de São Marcos, utilizando a polifonia para metais, e aproveitando a planta em cruz da basílica para organizar os músicos de acordo com os eixos ortogonais. Após a Igreja Católica proibir a polifonia, considerando-a uma má influência da música secular, Giovanni Pierluigi da Palestrina (1525-1594), conhecido hoje mais como um liturgista do que como um compositor, utilizou-a com equilíbrio, clareza, e atuou na capela de Santa Julia, na basílica de S. João Latrão e na igreja de Santa Maria Maior, em Roma. As músicas do período renascentista demandavam espaços enormes revestidos de pedra, como eram as igrejas e basílicas onde atuavam os compositores da época (Schmidt, 2011).

No período Barroco, a divisão entre solista e orquestra foi se tornando mais clara, e a polifonia foi dando lugar a melodias individuais. Em 1607, surgiu a ópera com a obra *Orfeo*, de Claudio Monteverdi, no palácio do duque

Vincenzo Gonzaga I, em Mantua, onde o público pôde experimentar personagens cantando melodias individuais, uma de cada vez. Por outro lado, Bach retomou a polifonia que estava em desuso desde a Renascença. Sua *Toccata e Fuga* em Ré menor para órgão composta em 1750, provavelmente escrita e tocada na catedral de Arnstadt, possui longas pausas nos primeiros compassos, sugerindo preenchimento por um longo tempo de reverberação. Bach foi compositor da corte em Kothen, onde utilizou a sala dos espelhos, depois mudou para Leipzig, onde foi *Kantor* (responsável pela música numa igreja) na igreja de São Tomás. Estima-se que o tempo de reverberação com as configurações da igreja na época era de 2,5 segundos. No período Barroco, a música também era apresentada nos salões dos palácios para a nobreza, onde os ouvintes podiam chegar bem próximos aos músicos (Schmidt, 2011).

Por volta do século XVII, a música ocidental já tinha se desenvolvido completamente de música de coral desacompanhada para um equilíbrio rítmico-harmônico-temático, em que as vozes eram acompanhadas de instrumentos. Nos cento e cinquenta anos seguintes, o contraponto musical surgiu consolidando o período Barroco, representado na Europa pelos compositores Bach, Haendel, Corelli e Vivaldi. Nesse período os concertos eram comumente apresentados em salas de música dos palácios, normalmente em formas retangulares, com superfícies rígidas e muito ornamentadas. Perto do final do período Barroco, os concertos começaram a ser feitos em pequenos teatros como o Alte Residenz, inaugurado em 1753, em Leipzig (Lípsia), Alemanha, cujo tempo de reverberação fica entre 1,6 e 2 segundos, dependendo da quantidade de espectadores (Beranek, 1994).

No período Clássico, final do século XVIII e durante o século XIX, Haydn (1732-1809), Mozart (1756-1791) e Beethoven (1770-1827) compuseram suas grandes sinfonias e sonatas, atuando principalmente em Viena. Na década de 1820, começaram a ser feitas as primeiras salas de concerto estritamente para essa finalidade, em formas retangulares como as salas de baile existentes, onde o tempo de reverberação nas frequências médias ficava entre 1,3 e 1,5 segundos. Alguns exemplos de salas do período Clássico são a Sala Holywell (1748, Oxford, Inglaterra, 300 lugares, tempo de reverberação de 1,5s nas médias frequências), Redoutensaal (Viena, Áustria, 400 lugares, tempo de reverberação de 1,4s nas médias frequências com a sala totalmente ocupada), Altes Gewandhaus (1780-1894, Leipzig, Alemanha, 400 lugares, tempo de reverberação de 1,3s nas médias frequências com a sala totalmente ocupada) (Beranek, 1994; 1996; Schmidt, 2011).

O período Clássico teve uma particularidade significativa, que foi o surgimento da música orquestral, com tamanhos de orquestras menores que as atuais. Neste período o piano passou a ser utilizado no lugar do cravo por Johann Christian Bach, filho de Johann Sebastian Bach, nos Hanover Square Rooms. O gênero da música de câmara foi desenvolvido em grande parte, preservando um caráter intimista. Ocorreu o surgimento do quarteto de cordas dentre outras formações (Schmidt, 2011).

Já o período Romântico, do final do século XIX ao início do século XX, quando a estrutura formal e elegante da música sinfônica abriu caminho para a expressão pessoal e emocional dos compositores, teve representantes como Schubert, Mendelssohn, Brahms, Wagner, Tchaikovski, Richard Strauss, Ravel, Debussy, Prokofiev e Vaughan Williams. Algumas composições desse período foram feitas para salas específicas, como *Parsifal*, de Wagner, para a sala Festspielhaus (Bayreuth, Alemanha) e *Réquiem*, de Berlioz, para o Palácio dos Inválidos (Paris, França). Entre 1870 e 1900, foram inauguradas salas com tempos de reverberação maiores que no período

Clássico, como a Grosser Musikvereinssaal, em Viena (1870, 1.680 lugares, tempo de reverberação de 2,0s nas médias frequências com a sala ocupada), o Concertgebouw, em Amsterdã (1887, 2.037 lugares, tempo de reverberação de 2,0s nas médias frequências com a sala ocupada), e o Boston Symphony Hall (1900, 2.400 lugares, tempo de reverberação de 1,9s nas médias frequências com a sala ocupada) (Beranek, 1994; 1996).

Os auditórios em forma de leque foram tomando lugar das salas em forma "caixas de sapato", com a intenção de aproximar os músicos da plateia. Mas, à medida que os leques foram alargando, maiores ficaram as lacunas temporais entre o som direto e o som refletido das paredes laterais, diminuindo a sensação de intimismo e proximidade procurada inicialmente (Schmidt, 2011).

Ainda no período Romântico, as óperas passaram a ser mais populares e seus textos mais compreendidos, assim requisitando lugares mais "secos" (menos reverberantes) para melhor clareza na compreensão da fala, como exemplo as óperas de Verdi (1813-1901). Richard Wagner (1813-1883) compôs diversas óperas, e sob o patrocínio do Rei Ludwig II da Baviera, criou sua própria casa de ópera, na qual utilizou novos recursos como o fosso de orquestra oculto e diversos nichos reverberantes ao longo das paredes laterais, pois a sala era retangular e os assentos dispostos em forma de leque (Schmidt, 2011).

No final do século XIX, as obras musicais se tornaram mais longas, as orquestras se tornaram gigantescas, e a música passou a ser composta para grandes palcos e para salas de concerto muito reverberantes. Gustav Mahler (1860-1911), Richard Strauss (1864-1949) e Nicolai Rimsky-Korsakov (1844-1908) foram importantes compositores da época (Schmidt, 2011).

No Impressionismo, os timbres (coloração dos instrumentos) passaram a ser muito valorizados. A *Sonata para violino e piano,* de Claude Debussy (1862-1918), estreou na Salle Gaveau em 1918, e a *Sonata para violino e piano*, de Maurice Ravel (1875-1937), estreou na Salle Erard. As duas salas estão situadas em Paris, de porte pequeno e médio, com um equilíbrio na absorção de altas frequências usando carpete, na absorção das médias frequências com uso de cortinas, e na absorção de baixas frequências, com uso de estuque, vidro e painéis de madeira soltos (Schmidt, 2011).

No meio do século XIX, começaram a surgir grandes salas de concerto como a Boston Music Hall, sala para 2.400 lugares, inaugurada em 1863, com o tempo de reverberação de 1,8 segundos, quando totalmente ocupada (Beranek, 1994).

Em 1932, Paul Sabine, após estudar muitas salas largas, incluindo Carnegie Hall, escreveu que o problema do designer acústico consiste mais em evitar elementos de dificuldade que produzir elementos de melhoria. Em 1941, F. R. Watson escreveu que numa sala de concerto seria necessário prover um palco com superfícies reflexivas de modo que os músicos possam se ouvir, e que o desenho do auditório para o público deveria se comparar ao ar livre, ou seja, com pouca reverberação. Em 1958, os ingleses P. H. Parkin e H. R. Humphreys concluíram que o estado da arte na acústica de salas para música encaminhava que grandes "erros" como ecos deveriam ser evitados, e que o tempo de reverberação poderia ser especificado e medido objetivamente (Beranek, 1994).

Entre 1900 e 1950, vários cientistas estudaram tempos de reverberação ótimos para tipos de música variados. Nesses estudos, foi constatado que nas frequências médias (entre 500Hz e 1000Hz) o valor ótimo de tempo de

reverberação para música barroca deveria ser em torno de 1,6 segundos; para música clássica, em torno de 1,8 segundos; e, para música romântica, em torno de 2 segundos (Beranek, 1994).

A partir de 1950, a grande contribuição na pesquisa da acústica foi de Beranek, que viajou por dezessete países visitando várias salas de concerto, ouvindo música em cada uma delas. Obteve desenhos, fotografias e os tempos de reverberação medidos de 54 delas, entrevistou maestros e críticos de música que conheciam as salas, fazendo um "ranking" das salas de acordo com a qualidade acústica encontrada. Os desenhos de todas essas salas na mesma escala foram comparados, chegando à conclusão de que a qualidade acústica de uma sala está estreitamente relacionada com a sua largura (Beranek, 1994).

Outra descoberta de Beranek foi que a absorção sonora pelo público era maior do que se acreditava antes, o que significava que a fórmula de Sabine para o tempo de reverberação utilizada naquelas salas superestimava seus tempos de reverberação à baixa absorção associada ao público. Isso se dá porque, em sua fórmula, Sabine considerou uma área menor ocupada pelo público sentado em bancos de madeira, e não em poltronas estofadas, além de considerar os valores de absorção de público por pessoa. Foi concluído que o público absorve como um carpete grosso, e que a absorção na fórmula de Sabine estava relacionada à área ocupada e não pelo número de pessoas. Beranek calculou o tempo de reverberação em frequências médias no Boston Symphony Hall com a fórmula de Sabine, e chegou a 2,3 segundos com a sala totalmente ocupada, quando na verdade foi encontrado o tempo de reverberação de 1,8 segundos, quando medido. Isso mostrou que todas as salas de concerto feitas entre 1900 e 1961 têm na verdade tempos de reverberação menores do que previsto (Beranek, 1994).

Um exemplo bem sucedido de uma sala de concerto com elementos móveis é a Sala São Paulo. Inaugurada em 1999, essa sala recebeu o prêmio de honra 2000 da USITT (*United States Institute for Theatre Technology*) pelo resultado de uma obra de excelência, onde transformaram uma estação ferroviária em operação em uma "fantástica sala de concertos, com os incríveis desafios de acústica que a obra apresentava". Seu famoso forro móvel pode variar o volume da sala e, consequentemente seu tempo de reverberação, ajustando-o de acordo com a obra musical executada. Logo, quanto mais baixo o forro, menor o tempo de reverberação (Nepomuceno, sem data).

A Sala São Paulo, projetada para 1509 assentos, tem uma geometria retangular, com 48,5m de comprimento, 21m de largura e 24,5m de altura máxima. O forro móvel tem inúmeras configurações possíveis, para posicionar de acordo com o estilo musical apresentado. O forro tem 45 placas retangulares dispostas em uma matriz de 5x9 com cada conjunto de três placas podendo ser movido independentemente (Tenenbaum & Vasconcellos, 2004).

Na Sala São Paulo, o tempo de reverberação na banda de frequência de 250Hz pode chegar a 3,26s, com todas as placas configuradas na altura máxima de 23,7m e o volume da sala com 25.000m³. Na configuração das placas a 8m de altura, o tempo de reverberação na banda de frequência de 250Hz fica com 1,85s. O tempo de decaimento inicial varia substancialmente com a altura do teto, sendo o parâmetro mais influenciado pelo teto móvel da sala (Tenenbaum & Vasconcellos, 2004).

Na Sala São Paulo os carpetes e cortinas foram banidos do projeto, pelo desejo da presença tonal, envolvimento e brilho. Os elementos ornamentados nos capiteis das colunas, figuras moldadas e recortes nas paredes, faziam

parte da arquitetura original e foram explorados no projeto acústico, com o objetivo de garantir a excelente difusão na sala. Além desses elementos, foram projetados elementos ornamentados nas frentes dos balcões e nas peças do forro móvel, também objetivando uma boa difusão. Como elemento de absorção sonora, foi utilizada a área da plateia, com a absorção das poltronas e pessoas (Nepomuceno, sem data).

Além do condicionamento acústico feito na sala, também foi feito o trabalho de isolamento, por se tratar de uma sala ao lado de uma estação ferroviária em funcionamento. Para isso, foram feitos isoladores e laje flutuante, de forma a evitar a transmissão de ruído através de vibrações (Nepomuceno, sem data).

O trabalho multidisciplinar entre arquitetos, engenheiros, consultores de acústica, músicos e maestros possibilitou atender ao objetivo principal de obter um desempenho acústico adequado para diferentes ocasiões, atendimento às exigências do patrimônio cultural e valor estético e formal.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCEITOS BÁSICOS: A ONDA SONORA

- **Som**

O fenômeno sonoro é definido como "uma onda mecânica e longitudinal que se propaga pelo ar ou qualquer outro fluido elástico". O som pode ser descrito como "fenômeno físico que envolve variações espaciais e temporais em uma dada quantidade física" (Brandão, 2016, p. 62).

O som pode ser classificado em dois tipos: o som vibração (perturbação física) e o som sensação sonora (captado pelo nosso ouvido). O som como perturbação física pode ser percebido pela visão (quando um despertador treme) ou pelo tato (como quando colocamos a mão sobre a caixa de um piano sendo tocado). Já o som sensação sonora ou psicofisiológica depende de um meio elástico de propagação e do ouvido (Silva, 2011).

O som é caracterizado por vibrações que se propagam no ar, sendo ondas de compressão (alta pressão) seguidas de dilatação ou rarefação (baixa pressão) produzidas num ritmo de oscilações (Carvalho, 1967; Niemeyer, 1998).

- **Onda sonora**

As ondas sonoras são definidas como fenômenos de repetição cíclica, variando desde um valor de repouso, chegando a um valor máximo positivo, depois passando pelo valor de repouso, descendo até um valor mínimo, retornando ao valor de repouso, e iniciando outra onda semelhante (do Valle, 2009).

A propagação do som é caracterizada como o movimento de oscilação das moléculas de ar que, por variação de pressão, transportam a energia sonora para as moléculas de ar adjacentes (Silva, 2011).

As ondas sonoras não se propagam no vácuo, como as ondas eletromagnéticas (luz), pois há necessidade de um meio elástico para sua propagação (Brandão, 2016).

A velocidade de propagação do som depende do meio. A velocidade aumenta conforme a densidade do meio aumenta, assim como aumenta também com maior umidade e maior temperatura. A velocidade do som no ar ao nível do mar é dada pela Equação (1) (do Valle, 2009):

$$V_{som} = 20{,}06 \cdot \sqrt{T + 273} \text{ em m/s,} \quad (1)$$

onde T é a temperatura em °C.

Logo, a propagação do som no ar a 21°C é expressa pela Equação (2):

$$V_{som} = 20{,}06 \cdot \sqrt{21 + 273} \text{ m/s} = 344 \text{ m/s} \quad (2)$$

Na Tabela 2.1, são apresentados exemplos de velocidade do som em diversos meios.

TABELA 2.1 – VELOCIDADE DO SOM EM DIFERENTES MEIOS

Material	Velocidade do som
Ar (20ºC)	340
Água	1460
Madeira	1000 a 2000
Concreto	3500
Tijolo	2500
Aço	5000 a 6000
Vidro	5000 a 6000
Chumbo	1320
Cortiça	450 a 500
Borracha	40 a 150

FONTE: NIEMEYER, 1998, P. 28

- **Pressão Sonora**

É a diferença entre a pressão absoluta ou total num determinado instante $p_T(t)$ e a pressão atmosférica normal, ou pressão estática (p_{atm}). A unidade de medida é o Newton por metro quadrado (N/m^2) ou o Pascal (Pa) (Niemeyer, 1998). A Pressão Sonora é dada pela Equação (3):

$$p(t) = p_T(t) - p_{atm} \qquad em\ N/m^2\ ou\ Pa \tag{3}$$

- **Período e frequência**

O período é definido como o tempo (em segundos) necessário para que uma oscilação completa se realize. A frequência é definida como "o número de oscilações completas por segundo" (Silva, 2011, p. 27), medida em ciclos por segundo (c.p.s.), ou em Hertz (Hz). Dessa forma, a frequência é o inverso do período, como mostra a Equação (4) (Silva, 2011):

$$f = 1 / T \qquad em\ Hertz \tag{4}$$

Sons que apresentam baixa frequência, entre 20Hz e 200Hz são classificados como "graves", sons médios são os que apresentam frequências entre 200Hz e 6kHz, enquanto são sons agudos os que apresentam frequências entre 6kHz e 20kHz (do Valle, 2009).

A Tabela 2.2, mostra a relação entre as frequências das notas musicais da escala diatônica em Dó maior (Costa, 2009).

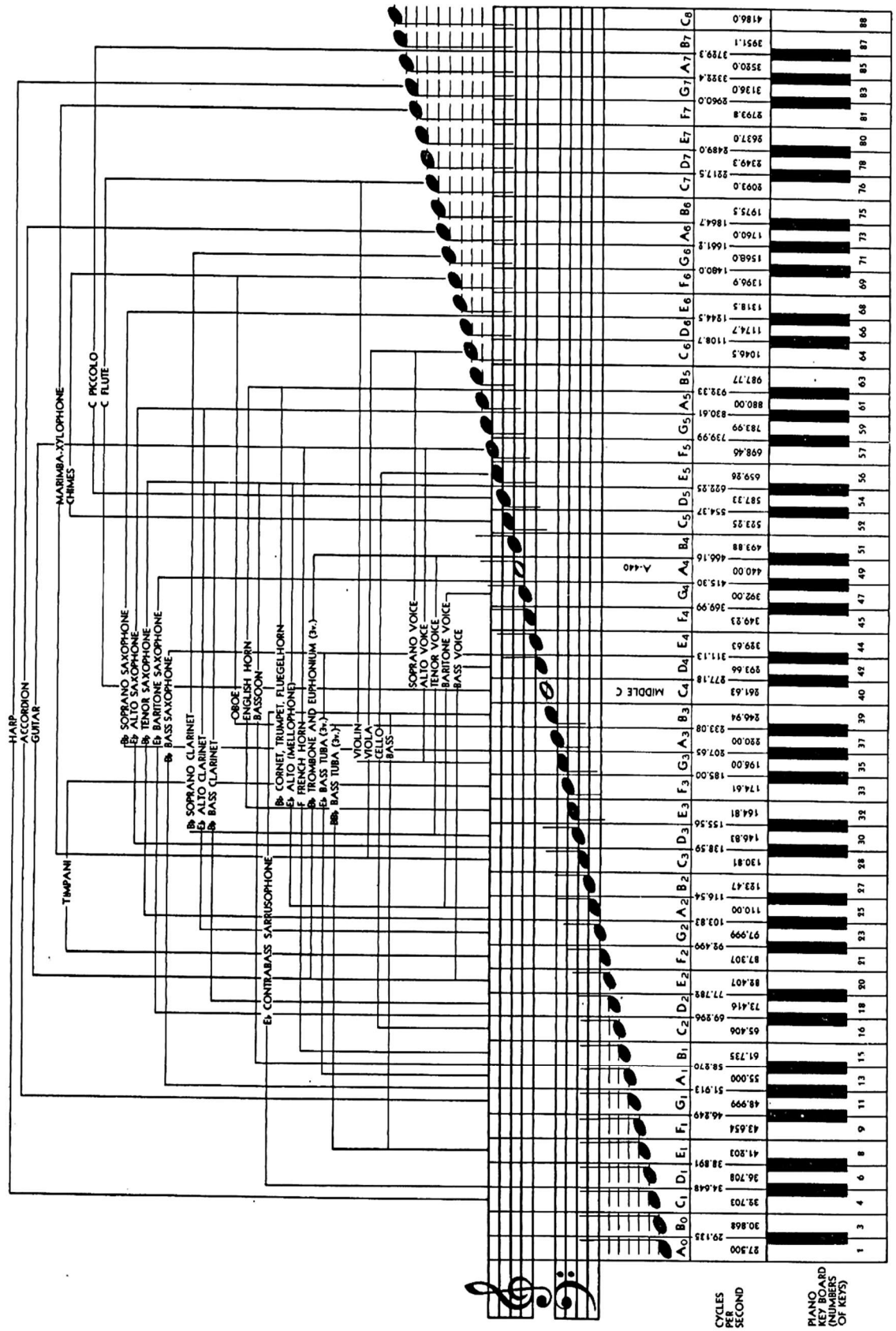
TABELA 2.2 – RELAÇÃO ENTRE FREQUÊNCIAS DAS NOTAS MUSICAIS NA ESCALA NATURAL EM DÓ MAIOR

Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
1	9 / 8	5 / 4	4 / 3	3 / 2	5 / 3	15 / 8	2

FONTE: COSTA, 2009, P. 4

Na Figura 2.1, são apresentadas as frequências das notas musicais na escala temperada em relação à abrangência de notas (frequências) de diversos instrumentos musicais.

FIGURA 2.1 – FREQUÊNCIAS DAS NOTAS DA ESCALA TEMPERADA EM DIFERENTES INSTRUMENTOS



FONTE: EVEREST, 1989, P. 152

- **Comprimento de onda**

É definido como “a distância λ que o som caminha durante o tempo correspondente a uma vibração completa”. Corresponde ao tempo dividido pela frequência e é obtido através da Equação (5) (Silva, 2011, p. 29).

$$\lambda = v / f \qquad ou \qquad \lambda = v \, . \, T \qquad em\ metros \tag{5}$$

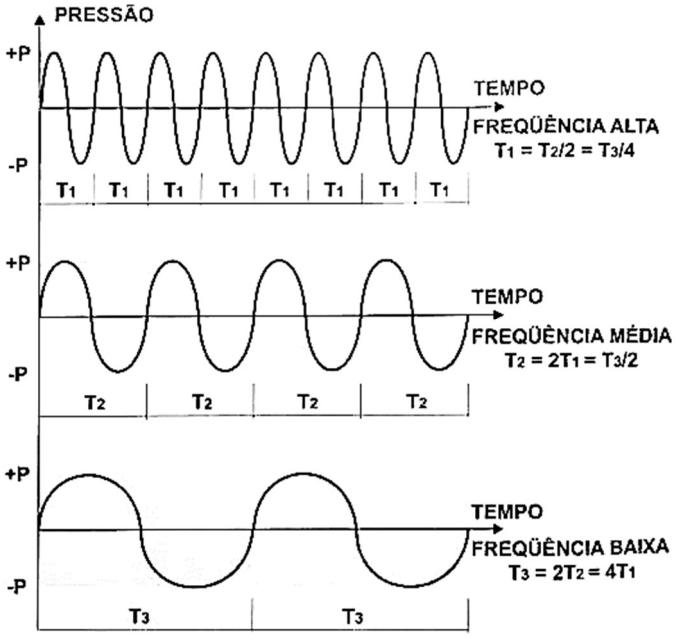
onde v é a velocidade de propagação no meio, f é a frequência em Hz e T o período em s.

- **Amplitude**

É a variação de pressão das partículas do meio, devido às compressões e dilatações (Costa, 2003).

A Figura 2.2 apresenta três ondas sonoras senoidais, de mesma amplitude e frequências distintas.

FIGURA 2.2 – ONDAS SONORAS



FONTE: CARVALHO, 2010, P. 26

- **Timbre**

O timbre é a relação entre as componentes de frequência de um som. Ele permite identificar, por exemplo, se o som foi emitido por um instrumento ou por uma pessoa. É relacionado com a composição harmônica da onda sonora (Costa, 2003).

- **Fonte sonora**

Elemento responsável pela emissão do som. Neste trabalho, serão consideradas as fontes sonoras pontuais fixas direcionais (quando o som emitido é mais intenso em determinada direção), e não serão utilizadas as fontes omnidirecionais (quando o som emitido é distribuído uniformemente em todas as direções) (Niemeyer, 1998).

- **Potência sonora**

É a energia liberada por uma fonte sonora por unidade de tempo, em Watts (W). Pode também ser chamada de potência acústica (Niemeyer, 1998).

- **Intensidade sonora**

Diz respeito à amplitude da onda sonora (Costa, 2003). É definida como a quantidade de energia por área, perpendicular à direção em que o som se propaga (Silva, 2011). A fórmula da Intensidade Sonora é dada pela Equação (6), supondo fonte pontual e propagação esférica.

$$I = W / S \qquad \text{em Watt/m}^2 \tag{6}$$

onde W é a potência sonora e S é a área da superfície pela qual a onda atravessa, em m².

Esta fórmula também pode ser aplicada através da Equação (7).

$$I = W / S = W / 4\,\pi\, r^2 \qquad \text{em Watt/m}^2 \tag{7}$$

Sendo r a distância da fonte pontual até o receptor, em metros.

O menor som audível no ar tem intensidade de aproximadamente 10^{-12} W/m², para sons puros de 1.000Hz (Costa, 2003).

- **Pressão acústica eficaz**

Equivale à média quadrática temporal das pressões acústicas instantâneas, em um determinado ponto de um meio elástico, calculada sobre um intervalo de tempo ($t_1 - t_2$). Está relacionada à "força" com que determinado som é percebido. Os medidores acústicos trabalham com esta grandeza, em decibels (Niemeyer, 1998).

A fórmula da pressão acústica eficaz de um som emitido por uma fonte pontual omnidirecional em campo livre é obtida através da Equação (8).

$$p_{ef} = \frac{W\ p\ v}{4\ \pi\ r^{\,2}} \quad \text{em N/m}^2 \text{ ou Pa} \tag{8}$$

Onde W é a potência da fonte, ρ é a densidade do meio (ar), v é a velocidade do som no meio (ar), r é a distância entre a fonte e o receptor.

- **Bel e decibel**

As sensações do ouvido humano são processadas pelo cérebro de forma logarítmica. Uma variação de 10 vezes na potência sonora é percebida pelo ouvido humano como o dobro, por isso foi conveniente utilizar a base 10 para medidas de nível sonoro. A primeira alternativa para expressar de maneira "humana" a grandeza da variação do som foi usar o logaritmo decimal da razão entre duas potências. A unidade de medida foi chamada de Bel em homenagem a Alexander Graham Bell, sendo abreviado como B (do Valle, 2009).

A faixa de sensibilidade do ouvido humano ao som é extensa, variando de $2x10^{-5}$ Pa a 20 Pa, portanto foi adotada a escala logarítmica como referência para os níveis de pressão sonora (p). Dentro dessa escala de sensibilidade do ouvido humano até o limite da dor, os valores vão de 0 a 120 dB (Niemeyer, 1998).

- **Nível de intensidade sonora**

O nível de intensidade sonora (NIS) é calculado pela Equação (9):

$$NIS = 10 \cdot \log (I / I_0) \quad \text{em decibels (dB)} \tag{9}$$

onde I é a intensidade física absoluta do som em W/m², I_0 é a intensidade do som correspondente ao limiar da audição (10^{-12} W/m² para 1000Hz) em W/m² (Silva, 2011).

Como I_0 corresponde a 10^{-12}W/m², a fórmula pode ser escrita em função da intensidade sonora, através da Equação (10):

$$NIS = 10 (12 + \log I) \quad \text{em decibels (dB)} \tag{10}$$

Logo,

Se I = 10^{-12}W/m², NIS = 0dB; Se I = 1W/m², NIS = 120dB; Se I = 10^{-3}W/m², NIS = 90dB.

- **Nível de pressão sonora (NPS)**

É calculado pela Equação (11):

$$NPS = 20 \cdot \log (p / p_0) \quad \text{em decibels (dB)} \tag{11}$$

sendo p_0 a pressão acústica mínima audível, igual a 20μPa (ou $2x10^{-5}$ N/m²), também chamada de pressão referencial mínima. (EVEREST, 1989).

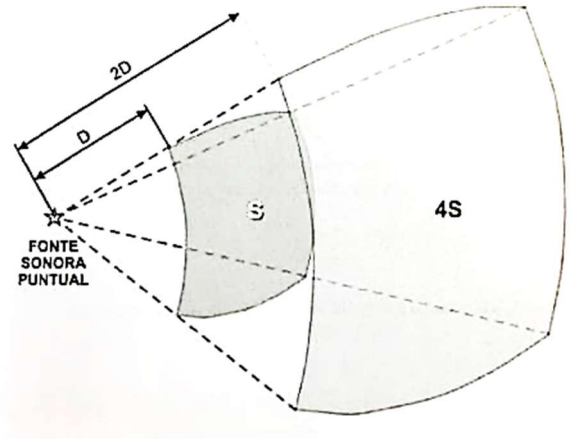
A variação do NPS em função da variação da distância entre dois pontos é obtida através da Equação (12):

$$\Delta NPS = 20 \cdot \log (1 / d) \quad \text{em decibels (dB)} \tag{12}$$

onde d é a distância entre os dois pontos.

A Figura 2.3 mostra a variação da energia sonora em função da distância D, de uma fonte pontual.

FIGURA 2.3 – VARIAÇÃO DA ENERGIA SONORA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA D, DE UMA FONTE PONTUAL



FONTE: DO VALLE, 2009, P. 63

A Tabela 2.3 apresenta a relação entre o ruído, a pressão em Pa, o NPS em dB e a impressão subjetiva do ser humano.

TABELA 2.3 – RUÍDO, PRESSÃO, NPS E IMPRESSÃO SUBJETIVA

IMPRESSÃO SUBJETIVA	DESCRIÇÃO	PRESSÃO (Pa)	NPS (dB)
ESTRONDOSO	**PERIGO DE RUPTURA DO TÍMPANO** Fogo de artilharia Avião a jato a 1 m	200	140
	LIMIAR DE DOR Avião a jato a 5 m Tambor de graves a 1 m	63	130
MUITO BARULHENTO	**LIMIAR DO DESCONFORTO AUDITIVO** Avião a pistão a 3 m Broca pneumática	20	120
	Metrô Próximo a rebitador	6,3	110
	Indústria barulhenta Dentro de um avião	2	100
BARULHENTO	Banda ou orquestra sinfônica Rua barulhenta INSALUBRIDADE	0,63	90
	Interior de veículo em alta velocidade Escritório barulhento Aspirador de pó	0,2	80
MODERADO	Rua de barulho médio Pessoa falando a 1 m	0,063	70
	Escritório de barulho médio Rádio com volume médio	0,02	60
TRANQÜILO	Restaurante tranqüilo Escritório paisagem com tratamento acústico	0,006	50
	Sala de aula (ideal) Escritório privado (ideal)	0,002	40
SILÊNCIO	Teatro vazio Quarto de dormir	0,0006	30
	Movimento de folhagem Estúdio de rádio e TV	0,0002	20
MUITO SILÊNCIO	Deserto ou região polar (sem vento) Respiração normal	0,00006	10
	LIMIAR DE AUDIBILIDADE Laboratório de acústica (câmara anecóica)	0,00002	0

FONTE: NIEMEYER, 2007, P. 89

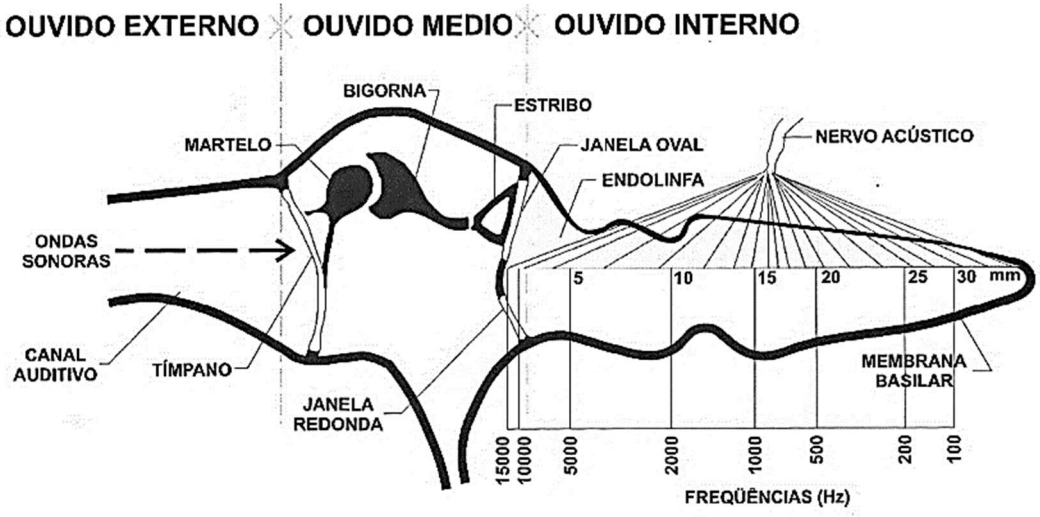
2.2 A PERCEPÇÃO DO SOM PELO HOMEM

O ser humano é capaz de escutar sons com frequências entre 20Hz e 20.000Hz, dependendo da intensidade sonora. As frequências altas são os sons agudos, como chimbal de bateria, violino, notas à direita de um piano, e as frequências baixas são os sons graves, como bumbo de bateria, contrabaixo, e notas à esquerda de um piano (Brandão, 2016).

Do Valle (2009) apresenta as frequências das notas dó, ressaltando que cada oitava possui o dobro da frequência da nota anterior: 32,70Hz; 65,41Hz; 130,81Hz; 261,63Hz; 523,25Hz; 1.046,5Hz; 2.093Hz; etc.

A Figura 2.4 apresenta as frequências percebidas pelo ouvido humano no nervo acústico, sendo as frequências graves percebidas no fundo da membrana basilar, e os agudos no seu início.

FIGURA 2.4 – O OUVIDO HUMANO E AS FREQUÊNCIAS



FONTE: CARVALHO, 2010, P. 36

- **Curvas isofônicas**

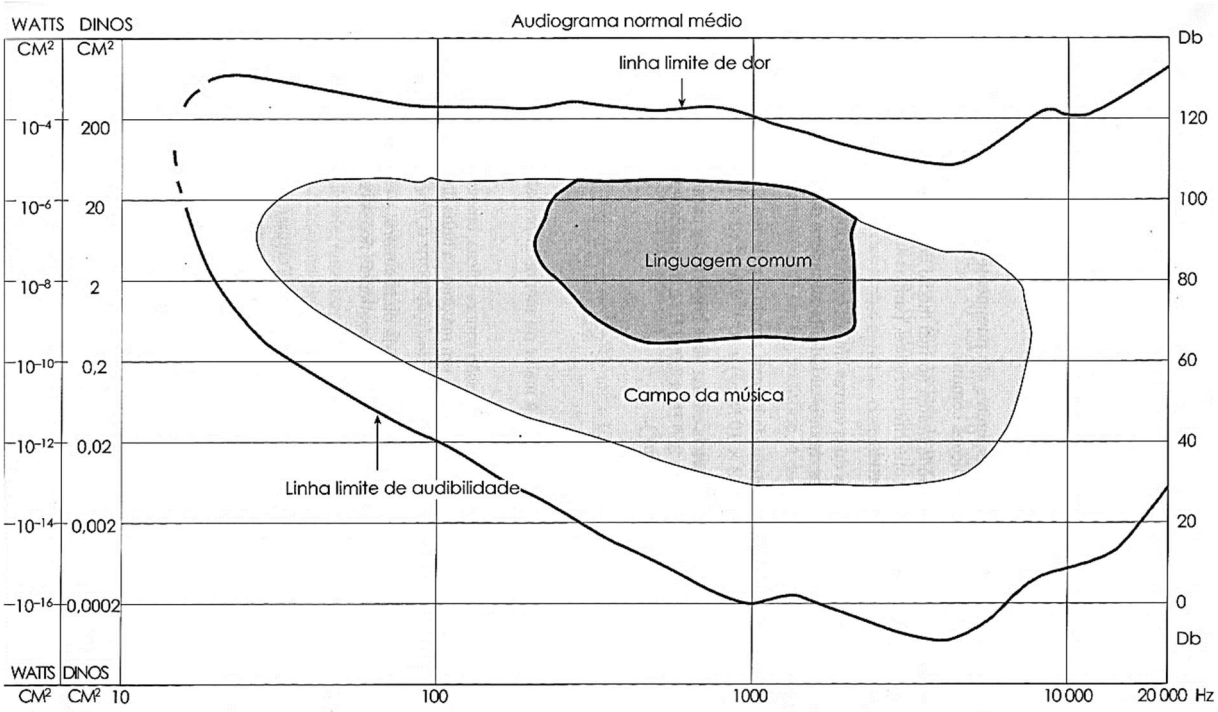
A percepção do ouvido humano não é igual para todas as frequências. A partir de experiências a respeito da sensibilidade do ouvido humano à pressão sonora, Fletcher e Mudson elaboraram curvas que representam a variação da sensibilidade humana em função das frequências sonoras, chamadas curvas isofônicas (Carvalho, 2010).

Tomou-se como referência a frequência de 1000Hz para avaliar a percepção do som em função da frequência e do nível. Para frequências mais graves, a sensação é de menor intensidade no ouvido humano. Para frequências entre 1kHz e aproximadamente 7kHz a sensação é de maior intensidade. A partir de aproximadamente 7kHz em diante a sensação é menor.

A Figura 2.5 mostra as curvas com os limites de audibilidade, o campo da linguagem comum, o campo da música, e os limites da dor, de acordo com a frequência e a intensidade sonora.

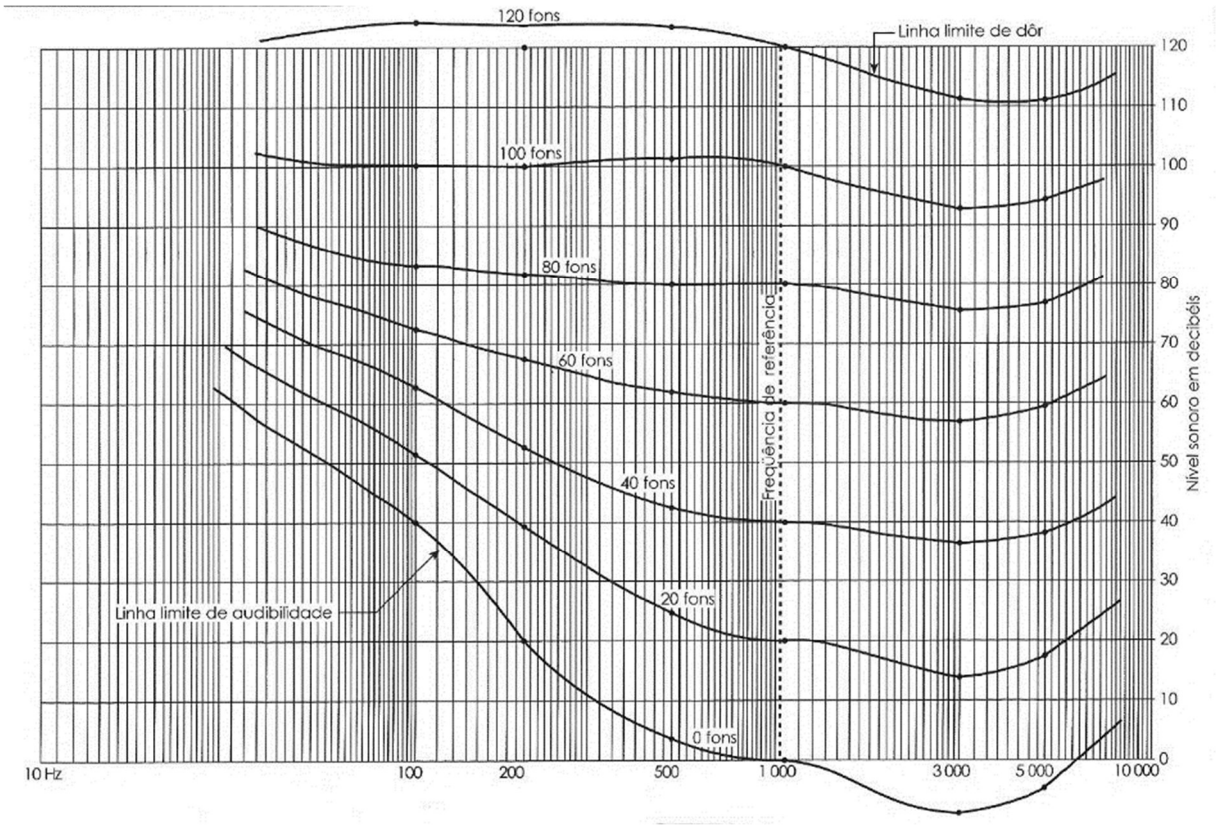
A Figura 2.6 apresenta as curvas isofônicas de Fletcher e Munson.

FIGURA 2.5 – AUDIOGRAMA NORMAL MÉDIO



FONTE: COSTA, 2003, P. 20

FIGURA 2.6 – CURVAS ISOFÔNICAS DE FLETCHER E MUNSON



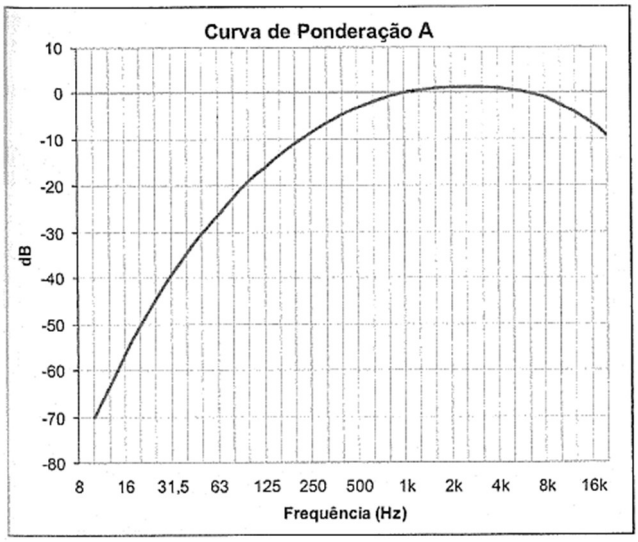
FONTE: COSTA, 2003, P. 26

- **Nível de pressão sonora ponderado em "A"**

Como existe uma dificuldade de se obter um valor de medida a um nível de pressão sonora em dB que aproxime ao máximo a percepção humana, que varia de pessoa para pessoa, foi empregado universalmente um sistema de ponderação "A" (Figura 2.7), baseado nas curvas isofônicas de Fletcher e Munson, para medir o nível de pressão acústica em dB(A), aproximando os valores em dB para a percepção humana (Carvalho, 2010).

A ponderação A é obtida através da média ponderada entre o espectro do ruído e a curva da Figura 2.7. Esta curva é utilizada para compensar as diferenças de sensibilidade que o ouvido humano tem para a diversidade de frequências no campo auditivo.

FIGURA 2.7 – CURVA DE PONDERAÇÃO "A"



FONTE: DO VALLE, 2009, P. 197

Para fazer a correção dos valores do NPS físico em dB para o NPS percebido pelo ouvido humano em dB(A), por faixa de frequência, deve-se seguir a Tabela 2.4. A segunda linha apresenta os valores que devem ser somados ao valor em dB, para chegar ao valor em dB(A), por faixa de frequência. Pode ser observado que a ponderação em A atenua fortemente as baixas frequências (pois o ser humano tem baixa sensibilidade aos graves), e que os valores são mantidos na frequência de 1kHz (do Valle, 2009).

TABELA 2.4 – CÁLCULO DE DB PARA DB(A) POR FREQUÊNCIA

Oitava (Hz)	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Curva A (Db)	-39,4	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1	-1,1

FONTE: DO VALLE, 2009, P. 198

- **Nível de pressão sonora equivalente**

O nível de pressão sonora (contínuo) equivalente ($L_{eq,T}$) corresponde a "dez vezes o logaritmo na base 10 do inverso do intervalo de tempo de integração multiplicado pela integral da razão entre o quadrado do valor instantâneo da pressão sonora e o quadrado da pressão sonora de referência" (NBR 16.313, 2014, P. 7), conforme a Equação (13).

$$L_{eq,T} = 10 \cdot log_{10}\left[\frac{1}{T}\cdot\int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2}\mathrm{d}t\right] \qquad \textit{em decibels (dB)} \qquad (13)$$

onde Leq,T é o nível de pressão sonora contínuo equivalente, expresso em decibel (dB); p (t) é a pressão sonora instantânea no instante t, expressa em pascal (Pa); p0 é a pressão sonora de referência (p0 = 20 μPa); é o tempo de integração.

- **Nível de pressão sonora equivalente ponderado em A**

O nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em A ($L_{Aeq,T}$) corresponde a "dez vezes o logaritmo na base 10 do inverso do intervalo de tempo de integração multiplicado pela integral da razão entre o quadrado do valor instantâneo da pressão sonora ponderada em A e o quadrado da pressão sonora de referência" (NBR16.313, 2014), conforme a Equação (14).

$$L_{\mathrm{Aeq,T}} = 10 \cdot \log_{10}\left[\frac{1}{T}\cdot\int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2}\mathrm{d}t\right] \qquad \textit{em decibels (dB)} \qquad (14)$$

onde LAeq,T é o nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderado em A, expresso em decibel (dB); p_A (t) é a pressão sonora instantânea ponderada em A no instante *t*, expressa em pascal (Pa); p_0 é a pressão sonora de referência (p_0 = 20μPa)(NBR16.313, 2014).

- **Som residual em auditórios**

Para avaliar o nível de som residual num auditório, devem-se fazer medições acústicas seguindo os métodos estabelecidos na NBR 10152 (ABNT, 2017).

A NBR 10.152 (ABNT, 2017) estabelece os valores de referência de nível sonoro para o adequado uso dos ambientes internos, compatíveis com o conforto acústico, de acordo com a ocupação. Para fazer a avaliação interna do ambiente, deve ser realizado o procedimento estabelecido nesta norma, através da comparação dos níveis de pressão sonora medidos com os respectivos valores de referência para os ambientes internos, de acordo com seu uso.

A avaliação pode ser feita por método simplificado, comparando os níveis de pressão sonora equivalente (L_{Aeq}) e máximo (L_{ASmax}), de acordo com o ambiente, respectivamente para RL_{Aeq} e RL_{ASmax}, conforme mostrado na Tabela 2.5. Para salas de concerto e teatros o valor de referência para som residual $RL_{Aeq,T}$ é 30 dB(A) e o valor máximo aceitável é de 35 dB(A).

TABELA 2.5 – VALORES DE REFERÊNCIA DE SOM RESIDUAL

Finalidade de uso	Valores de referência		
	RL_{Aeq} (dB)	RL_{ASmax} (dB)	RL_{NC}
Cinemas	35	40	30
Salas de concertos	30	35	25
Teatros	30	35	25
Auditórios grandes (> 600 m^3)	30	35	25
Auditórios pequenos (≤ 600 m^3)	35	40	30

FONTE: ABNT NBR 10.152, 2017, P. 13 E 14

2.3 ACÚSTICA RELACIONADA A SALAS DE ESPETÁCULO

De acordo com do Valle:

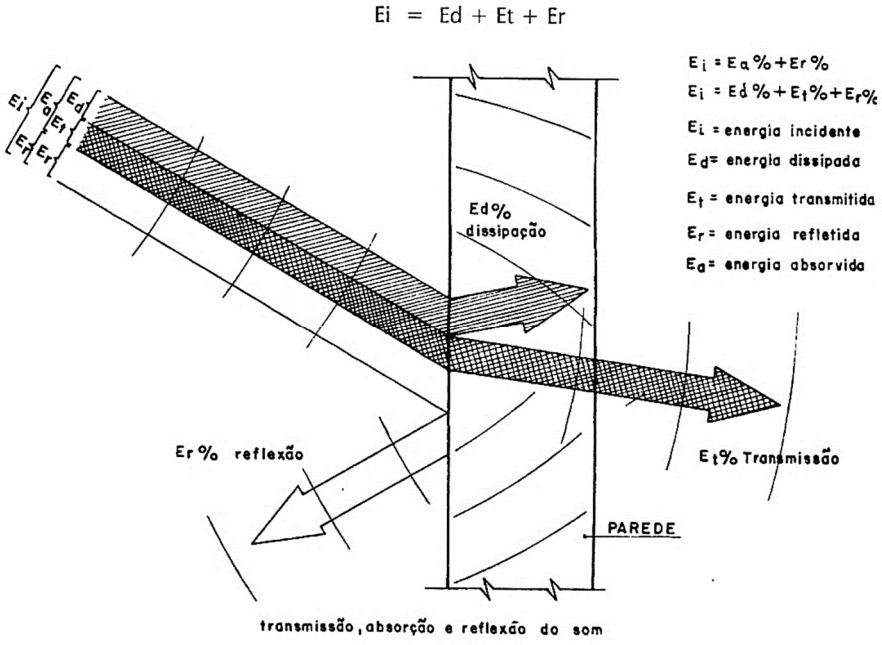
> O isolamento acústico consiste em não deixar passar som de dentro para fora, nem de fora para dentro de um ambiente. Já o condicionamento acústico consiste em criar uma sonoridade agradável dentro do ambiente, controlando a reverberação e os ecos, consertando problemas modais e promovendo uma resposta de frequências adequada ao tipo de utilização. (2009, p. 163)

Neste trabalho, foi analisado o condicionamento acústico no interior de salas de espetáculo, considerando-as perfeitamente isoladas acusticamente.

2.3.1 PROPAGAÇÃO SONORA

Quando uma onda sonora incide numa superfície, a energia incidente (E_i) é em parte refletida (E_r), em parte dissipada (E_d) e em parte transmitida (E_t), conforme a Figura 2.8 (Silva, 2011).

FIGURA 2.8 – TRANSMISSÃO, ABSORÇÃO E REFLEXÃO DO SOM



FONTE: SILVA, 2011, P. 73

- **Reflexão e absorção**

A reflexão especular do som ocorre da mesma maneira como na luz, ou seja, seu ângulo de reflexão é o mesmo que o ângulo de incidência. A absorção acontece quando a energia sonora é absorvida e não retorna para o ambiente (do Valle, 2009).

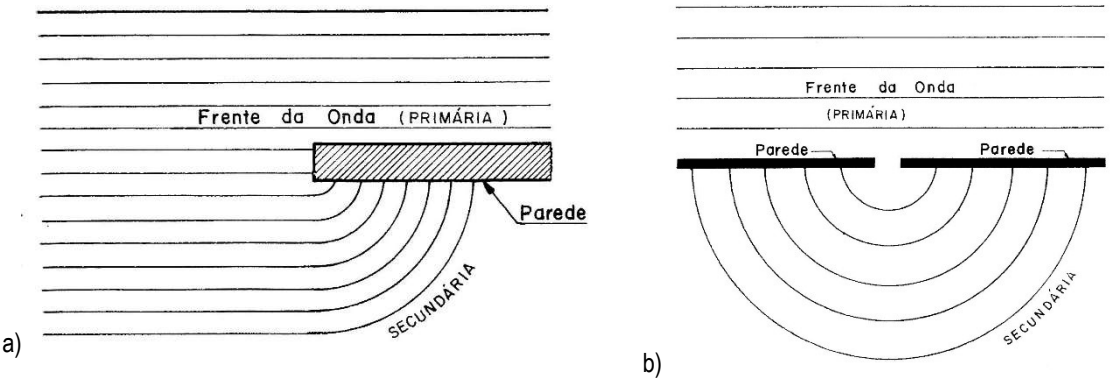
Em geral para salas de espetáculo é recomendada a utilização de materiais reflexivos próximos ao palco para projetar o som em direção à plateia, e materiais absorventes no fundo do auditório, de modo a evitar o retorno do som atrasado (eco) para frente do auditório (Carvalho, 2010).

A seção 2.4 deste trabalho exemplifica alguns tipos de materiais e suas aplicações na acústica.

- **Difração**

É a mudança na direção de uma onda sonora quando esta encontra um obstáculo (Silva, 2011). A Figura 2.9 (a) e (b) mostra a difração em aresta e em orifício.

FIGURAS 2.9 (A) E (B) – DIFRAÇÃO EM ARESTA E EM ORIFÍCIO



FONTE: SILVA, 2011, P. 77

- **Difusão**

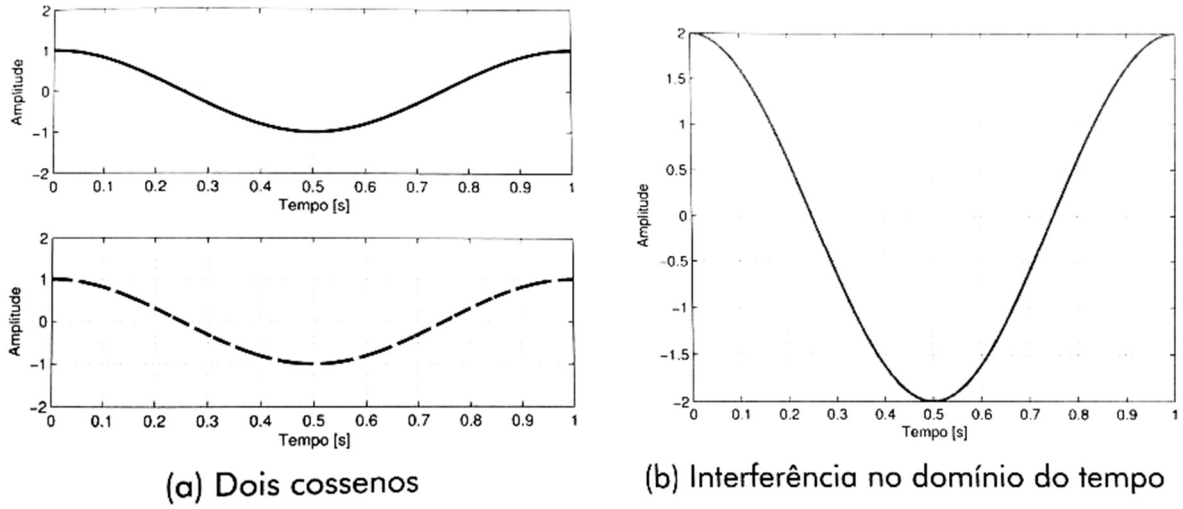
Fenômeno que ocorre quando as ondas sonoras são refletidas, mas espalhadas para diferentes direções, de forma não especular (do Valle, 2009).

- **Interferência**

A interferência entre duas ou mais frentes de onda pode ocorrer em três situações: 1) Soma de sinais dos canais de uma mesa de som enviados para uma saída (mixagem de áudio); 2) Soma das frentes de onda de dois alto-falantes em uma sala; 3) Soma das frentes de onda de uma fonte sonora e das suas reflexões em uma sala e o sinal percebido pelo receptor. As reflexões de menor amplitude tendem a originar um padrão de interferências menos acentuado (Brandão, 2016).

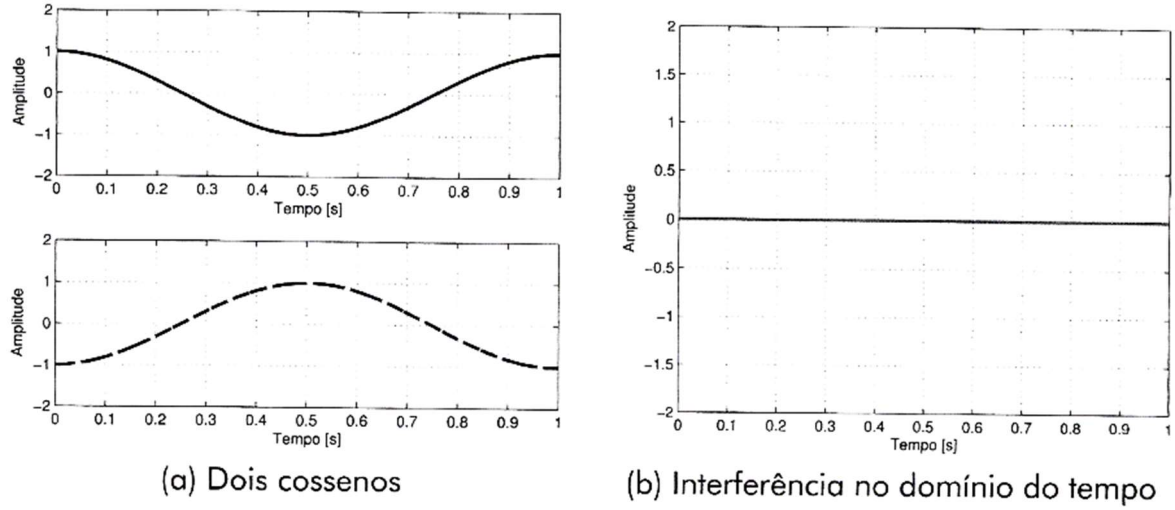
A interferência de dois sinais iguais é construtiva quando as amplitudes das ondas são somadas perfeitamente, conforme Figura 2.10 (a) e (b). Já a interferência de dois sinais opostos é totalmente destrutiva quando a amplitude da onda resultante é nula, conforme Figura 2.11 (a) e (b) (Brandão, 2016).

FIGURA 2.10 – INTERFERÊNCIA ENTRE DOIS SINAIS IGUAIS



FONTE: BRANDÃO, 2016, P. 97

FIGURA 2.11 – INTERFERÊNCIA ENTRE DOIS SINAIS OPOSTOS



FONTE: BRANDÃO, 2016, P. 98

- **Modos acústicos e ondas estacionárias**

Às vezes quando ouvimos música, algumas notas graves podem soar mais fortes que outras, devido aos modos de uma sala com deficiência nas respostas aos graves. Os modos são causados principalmente em salas pequenas, e se originam de acordo com as dimensões dessas em relação ao comprimento de onda de baixas frequências. Por exemplo, em uma sala retangular com 3,44m de comprimento, ao gerar uma frequência de 50Hz (cujo comprimento de onda é 6,88m) em uma extremidade, a onda se propagará em sua metade de seu ciclo, e retornará ao mesmo ponto terminando seu ciclo e reiniciando-o, permanecendo a onda parada, o que chamamos de onda estacionária. Os modos da sala são estas variações de pressão sonora dentro de um recinto, causadas pelas ondas estacionárias (do Valle, 2009).

- **Ressonância**

É o fenômeno que ocorre quando um corpo entra em uma vibração contínua através de vibrações iniciais. Este fenômeno ocorre em uma determinada frequência, que é a frequência própria de vibração do corpo. Os gregos e romanos usavam grandes vasos para reforçar o som em seus auditórios através da ressonância. Entretanto, o fenômeno da ressonância pode originar ondas estacionárias, que podem prejudicar a acústica dos ambientes (Costa, 2003).

- **Eco**

Fenômeno que ocorre quando um som direto e um som refletido atingem um receptor em um intervalo de tempo maior que 1/15 do segundo, o que corresponde a uma distância de 11m ou mais (um percurso de 22m ou mais) (Niemeyer, 1998).

- ***Flutter Echo***

Fenômeno que ocorre quando existem duas superfícies paralelas, reflexivas e próximas, causando diversos rebatimentos. Deve ser evitado por causar uma sensação desagradável. Por isso as superfícies de salas de concerto não devem ser paralelas, e caso isso ocorra, é necessário que uma das duas superfícies não seja reflexiva (do Valle, 2009).

2.3.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

A NBR 12179 define o tempo de reverberação como: "o tempo necessário para que um som deixe de ser ouvido, após a extinção da fonte sonora, e expresso em segundos. O tempo de reverberação é medido como o tempo necessário para que o som sofra um decréscimo de intensidade de 60 decibels" (ABNT, 1992, p. 2).

O Tempo de Reverberação (TR) é o principal parâmetro acústico para os teatros. Diversos outros parâmetros acústicos são obtidos em função do TR.

- **Fórmula de Sabine**

Wallace Clement Sabine (1868-1919), o pioneiro da acústica de Harvard, introduziu o conceito de tempo de reverberação (TR) nos estudos da acústica, usando um tubo de órgão acoplado a um soprador acionado por uma válvula como fonte sonora, um cronômetro e seus ouvidos "afiados" para medir o tempo desde a interrupção do som da fonte até a inaudibilidade (Everest, 1989; Figueiredo, 2005).

A equação de Sabine para o TR foi consolidada na consultoria para a sala Boston Symphony Hall, que veio a ser considerada uma das melhores salas de concerto do mundo (Figueiredo, 2005).

Sabine era professor assistente em Harvard que, após três anos de pesquisa em várias salas de concerto nessa cidade, em 1898, chegou à fórmula do Tempo de Reverberação para cada frequência no espaço arquitetônico. Quando o TR é calculado com base em um decaimento de 60dB de energia, tem-se o parâmetro de qualidade acústica T_{60} (Beranek, 1994). A Equação (15) apresenta a Fórmula de Sabine, e a Equação (16) apresenta a fórmula para a absorção sonora total da Equação (15).

$$T60, S = \frac{0{,}161 \,.V}{S \,.\, \alpha m} \qquad \textit{em segundos} \tag{15}$$

$$S \,.\, \alpha_m \;=\; \Sigma_i \; S_i \,.\, \alpha_i \qquad \textit{em Sabins (m²)} \tag{16}$$

onde V é o volume da sala em m^3, e (S. α) é absorção sonora total na frequência medida considerando as pessoas, as superfícies e objetos em Sabins (m^2).

O fator *(S . α_m)* corresponde à quantidade de absorção presente no ambiente, e como α é adimensional, *S.* α_m é dado em m² ou Sabins, em homenagem à Sabine. O coeficiente de absorção α_m corresponde à média ponderada dos coeficientes de absorção α_i e áreas S_i (em m²) de cada superfície do ambiente. *S* corresponde ao somatório das áreas das superfícies dentro do ambiente. Se os coeficientes de absorção de cada material variam com a frequência, o T_{60} também vai variar em diferentes frequências (Brandão, 2016).

Sendo assim, pode-se concluir que o T_{60} é proporcional ao volume da sala e inversamente proporcional à quantidade de absorção sonora na sala (Brandão, 2016).

- **Fórmula de Eyring**

Em 1930 o matemático Eyring propôs uma correção na fórmula de Sabine, pois no cálculo proposto por Sabine, se todos os coeficientes de absorção α fossem iguais a 1, toda a energia sonora seria absorvida na sala, e o T_{60} seria nulo. A equação de Sabine não considera a perda de energia sonora a cada reflexão (*1 – α_m*), o que foi relevado por Eyring em sua equação (Brandão, 2016).

Por isso, a Fórmula de Eyring é indicada para salas com superfícies altamente absorventes. Quando α_m for inferior a 0,5, é recomendado utilizar a fórmula de Sabine, e quando α_m for superior a 0,5 recomenda-se utilizar a fórmula de Eyring (Silva, 2011).

Já Brandão (2016) descreve que quando o α_m é maior que 0.2, os cálculos do TR de Sabine e Eyring tendem a divergir substancialmente, por isso Eyring considerou que a fórmula de Sabine deveria ser utilizada para salas com baixa absorção, ou seja, quando α_m for menor que 0.2.

Pode-se observar que a fórmula de Eyring (Equação 17) é igual à fórmula de Sabine substituindo o coeficiente de absorção de Sabine (α_m) pelo coeficiente de absorção de Eyring, *– ln (1 - α_m)*. Nota-se que os valores obtidos com a equação de Eyring são menores que os obtidos com a equação de Sabine, à medida que α_m aumenta. Além disso, para obter o T_{60} objetivo numa sala, estimando a área de absorção necessária, o projetista acústico encontrará um valor menor utilizando a fórmula de Eyring (Brandão, 2016).

$$T60, E = \frac{0{,}161 \,.V}{-\,S \,.ln\,(1 - \alpha m)} \qquad \textit{em segundos} \tag{17}$$

Além dos Tempos de Reverberação de Sabine e Eyring, existem outras equações para calcular o T_{60} que não serão aboradadas neste trabalho, como as de Millington-Sette, Kuttruff, Fitzroy, Arau-Puchades, Neubauer-Kostek, Ducorneau-Planeau e Lehmann-Johansson (Brandão, 2016).

- **Fórmulas de Sabine e Eyring considerando a absorção do ar**

Um fator que influencia o decaimento do NPS numa sala é a absorção do ar, que varia dependendo da temperatura e da umidade. Considerando a variável *m* como o coeficiente de absorção do ar num determinado ambiente, pode-se calcular as fórmulas de Sabine e Eyring conforme as Equações (18) e (19) (Brandão, 2016).

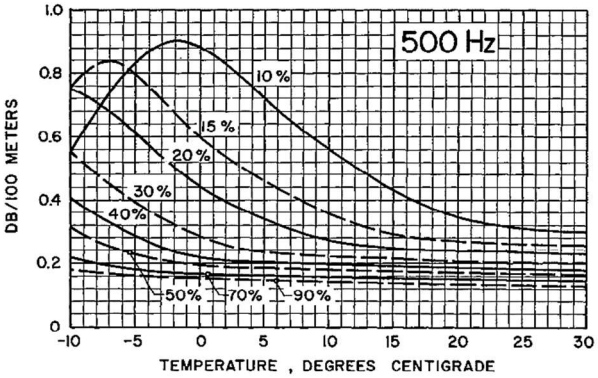
$$T60, S = \frac{0{,}161 \,.V}{S \,.\, \alpha m + 4 \,.m \,.V} \qquad \textit{em segundos} \tag{18}$$

$$T60, E = \frac{0{,}161 \,.V}{-\,S \,.ln\,(1 - \alpha m) + 4 \,.m \,.V} \qquad \textit{em segundos} \tag{19}$$

Alguns fatores, além do tempo, contribuem no decaimento da energia sonora, como a pressão, a temperatura e a umidade do meio (no caso da acústica de salas, o ar). Uma maior temperatura aumenta a absorção do som pelo ar, assim como uma menor umidade. Quanto maior a frequência, a absorção do som pelo ar também aumenta (Brandão, 2016).

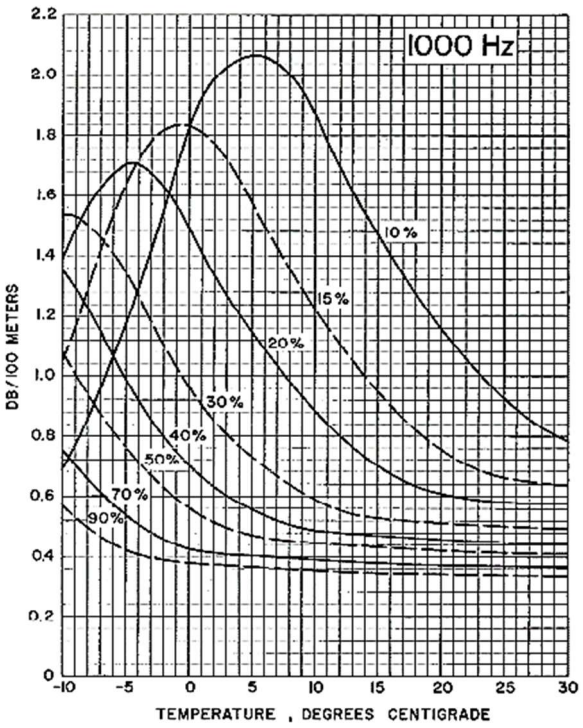
As Figuras 2.12 e 2.13 apresentam os gráficos de absorção pelo ar nas frequências, 500 e 1kHz em relação à umidade relativa (%) e temperatura (ºC). O comportamento para as demais frequências é similar, havendo menor absorção nas baixas frequências e maior absorção nas altas frequências (Harris, 1967).

FIGURA 2.12 – ABSORÇÃO DO SOM PELO AR NA FREQUÊNCIA DE 500 Hz, DE ACORDO COM A UMIDADE RELATIVA (%) E A TEMPERATURA (°C)



FONTE: HARRIS, 1967

FIGURA 2.13 – ABSORÇÃO DO SOM PELO AR NA FREQUÊNCIA DE 1000 Hz, DE ACORDO COM A UMIDADE RELATIVA (%) E A TEMPERATURA (°C)



FONTE: HARRIS, 1967

A Tabela 2.6 apresenta os coeficientes de absorção do ar em diferentes frequências e diferentes valores de umidade relativa, a uma temperatura de 20°C (Brandão, 2016).

TABELA 2.6 – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DO AR

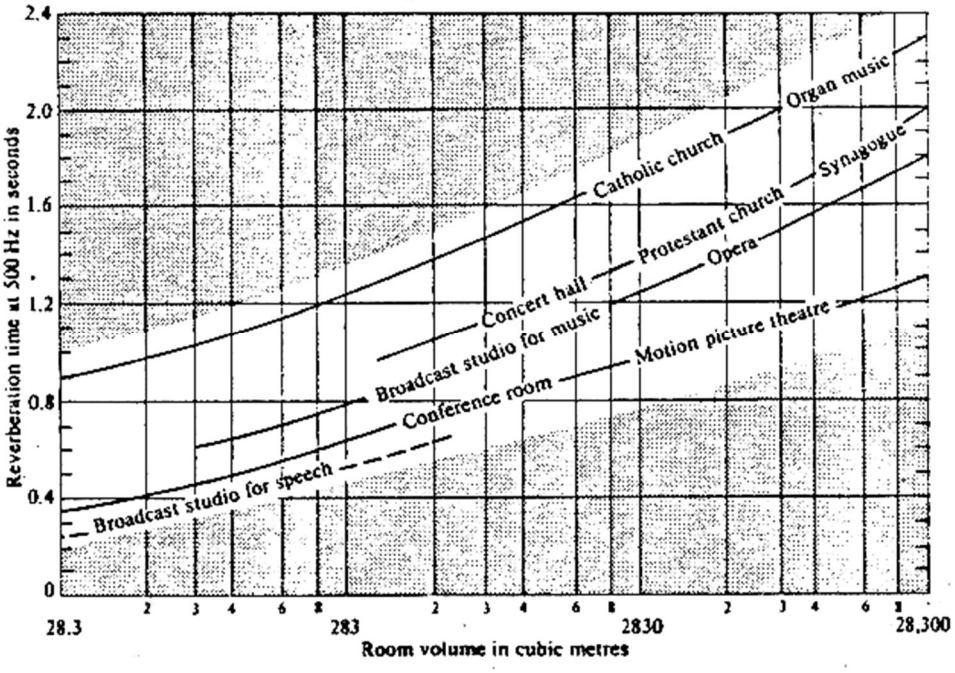
Umidade	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
40%	-	-	0,0004	0,0011	0,0026	0,0072
50%	-	-	0,0004	0,0010	0,0024	0,0061
60%	-	-	0,0004	0,0009	0,0023	0,0056
70%	-	-	0,0004	0,0009	0,0021	0,0053
80%	-	-	0,0003	0,0008	0,0020	0,0051

FONTE: BRANDÃO, 2016

- **Tempo de Reverberação ótimo**

A NBR 12.179 (ABNT, 1992) menciona que o tempo de reverberação adequado para uma sala de espetáculos pode ser determinado conforme proposto por Beranek e Newman. A Figura 2.14 mostra o tempo de reverberação ideal, para cada tipo de uso, em função do volume da sala, para a frequência de 500Hz.

FIGURA 2.14 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO IDEAL DE ACORDO COM VOLUME DA SALA E USO

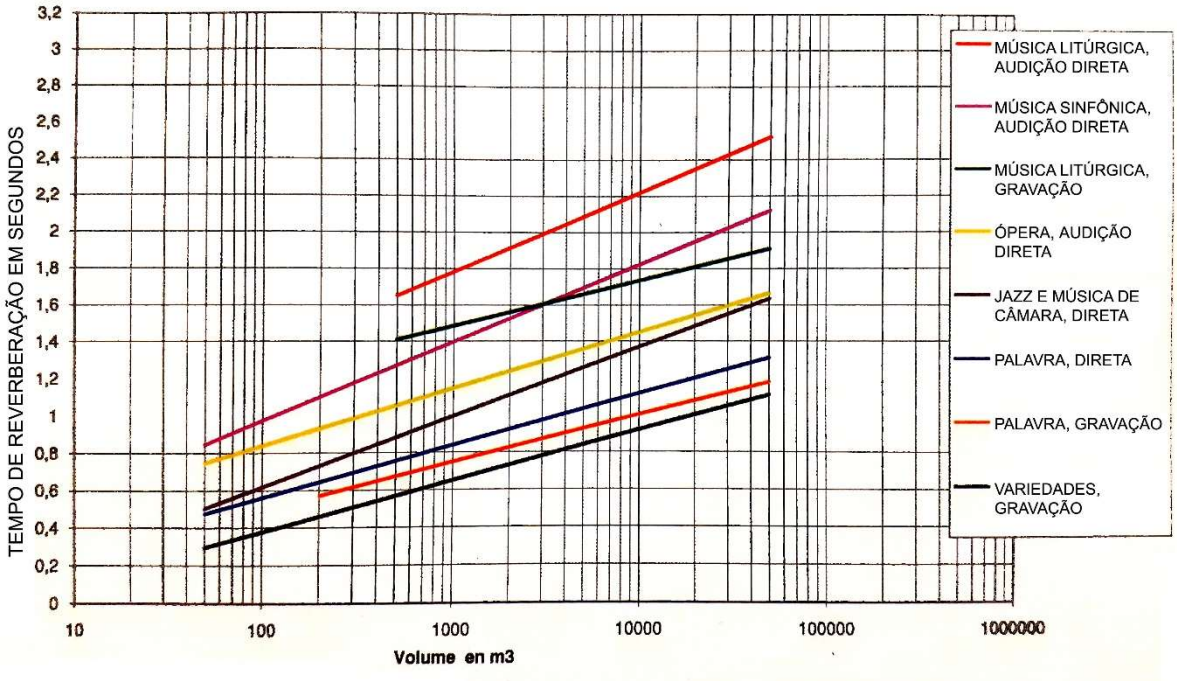


FONTE: NBR 12179, 1992

O tempo de reverberação ótimo (500 Hz) depende tanto do tamanho quanto da função da sala de concerto, abrangendo desde 0.5 segundos para pequenas salas de ensaio com área até 135m³, chegando a 2.2 segundos para grandes salas de 20.000m³ ou mais. Também tem relação com a cultura local: os europeus, por exemplo, preferem 10% a mais de reverberação do que os estadunidenses (Wegst, 2006).

A Figura 2.15 apresenta o TR ótimo para outras finalidades, como jazz e música de câmara ao vivo, que necessitam de menos reverberação do que, por exemplo, música sinfônica ou ópera.

FIGURA 2.15 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO IDEAL DE ACORDO COM VOLUME DA SALA E USO



FONTE: TISSEYRE, 2009, P. 39

Para obter o TR ótimo nas demais frequências além de 500 Hz, existem algumas soluções de correção propostas por diferentes autores. Costa (2003) apresenta os fatores de correção conforme a Tabela 2.7.

TABELA 2.7 – FATOR DE CORREÇÃO DO TR ÓTIMO PARA DIFERENTES FREQUÊNCIAS (COSTA, 2003)

Som	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2kHz	4 kHz	8 kHz
Linguagem	1,3	1,1	1,0	1,0	1,1	1,3	1,7
Música	2,0	1,4	1,0	1,0	1,1	1,2	1,5

FONTE: COSTA, 2003, P. 64

Já Carvalho (2010) apresenta o gráfico para o fator de correção do TR ótimo para diferentes frequências conforme Tabela 2.8. De acordo com Carvalho (2010), o desvio no TR com fator de correção pode ser de até 10%, para mais ou para menos.

TABELA 2.8 – FATOR DE CORREÇÃO DO TR ÓTIMO PARA DIFERENTES FREQUÊNCIAS (CARVALHO, 2010)

Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Fator	1,47	1,17	1,00	1,00	1,00	1,00

FONTE: CARVALHO, 2010, P. 96

Brandão (2016) apresenta o fator de correção do T_{60} ideal para auditórios destinados à música na Tabela 2.9.

TABELA 2.9 – VARIAÇÃO DESEJADA PARA O TEMPO DE REVERBERAÇÃO COM A FREQUÊNCIA, APLICADA A AUDITÓRIOS PARA MÚSICA (BRANDÃO, 2016)

Frequência	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Fator	1,36	1,30	1,16	1,07	1,00	1,00	1,00

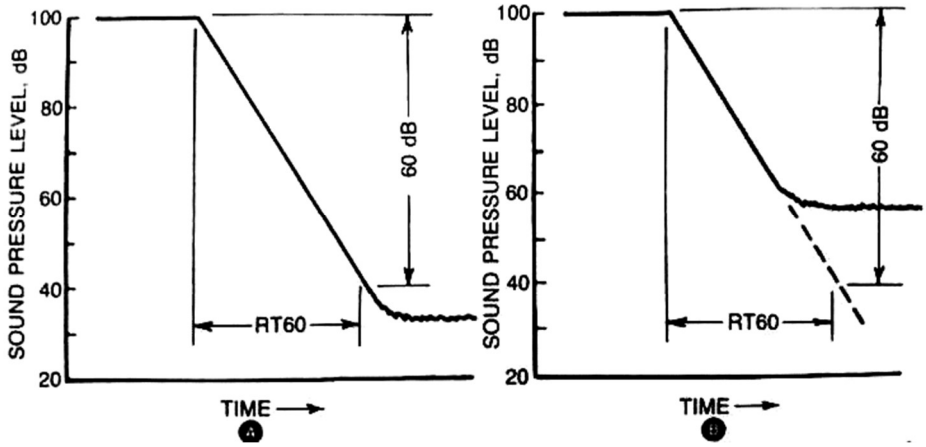
FONTE: BRANDÃO, 2016, P. 607

Dessa forma, pode-se verificar que o TR ótimo é um número subjetivo, pois seus fatores de multiplicação possuem algumas variações em publicações de diferentes autores. Todavia, existe uma grande proximidade na variação destes fatores, havendo um consenso de aumento do TR quando se diminui as frequências, devido à menor percepção do ouvido humano para tais frequências. Carvalho (2010) e Brandão (2016) sugerem manter o TR na frequência de 1 kHz e nas frequências superiores, enquanto Costa (2003) sugere aumentar o TR nas frequências de 2 kHz e nas superiores.

- **Medição do Tempo de Reverberação**

Na prática, são encontrados muitos problemas para conseguir medir o T_{60}. Para se obter esse decaimento de 60 dB numa sala, com o som residual de, por exemplo, 30 dB(A), limite estabelecido na NBR 10.152 (ABNT, 2017) para teatros, haveria a necessidade de uma fonte sonora com nível de pressão sonora de mais de 90 dB, o que até seria possível (Figura 2.16A). Mas se o som residual for, por exemplo, de 60 dB(A), essa fonte sonora deverá ter o NPS de 120 dB ou mais (Figura 2.16B). Se uma fonte sonora de 100 watts emite um NPS de 100 dB a uma determinada distância, dobrando a potência da fonte para 200 W resultará em 103 dB, 400 W resultarão em 106 dB, 800 W em 109 dB, e assim por diante (Everest, 1989).

FIGURA 2.16 – DECAIMENTO DO NPS EM FUNÇÃO DO TEMPO E DO RUÍDO DE FUNDO



FONTE: EVEREST, 1989, P. 116

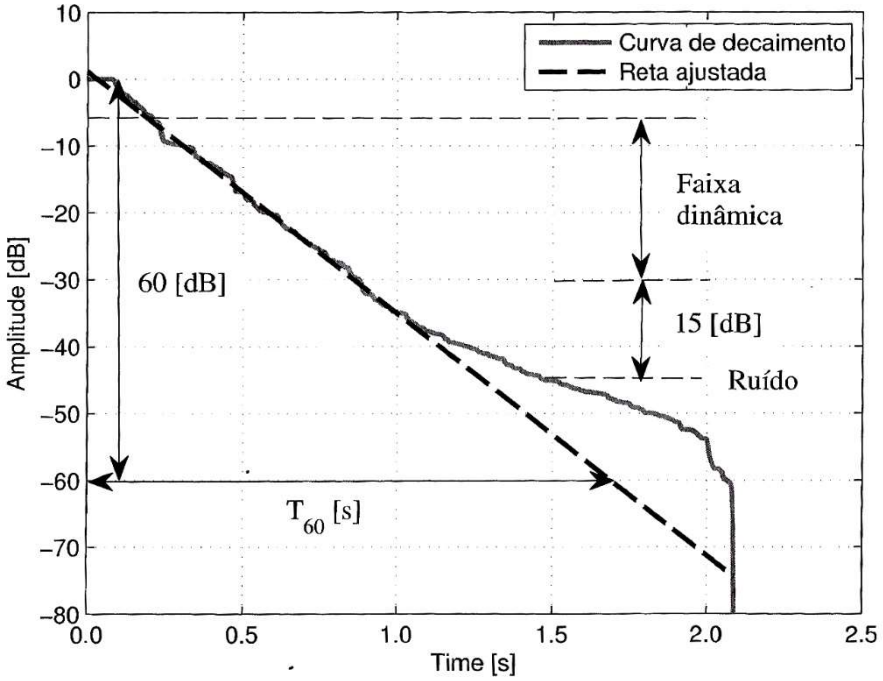
É necessário que o final do decaimento da pressão sonora fique 15 dB acima do som residual, assim como o início da medição do TR seja após a queda de 5 dB em relação ao estado estacionário (máximo da resposta ao impulso), devido ao decaimento errático geralmente apresentado nas primeiras reflexões. Dessa forma, para um som residual de 30 dB(A), a medição de um decaimento de 60dB precisaria de uma fonte cujo NPS fosse de 30+15+60+5 = 110 dB, um valor proibitivo como descrito por Everest (1989). Devido à impossibilidade em muitos casos de medir o T_{60}, foram definidos o T_{20} e o T_{30}, correspondentes ao tempo que o NPS no recinto leva para decair 60 dB, porém medido nas faixas entre -5 dB a -25 dB (T_{20}) e entre -5 dB e -35 dB (T_{30}). A Figura 2.17 apresenta a curva de decaimento do NPS em função do tempo, com a faixa entre -5 dB do valor máximo do NPS, até 15 dB acima do ruído de fundo, faixa esta que pode abranger o T_{30} ou o T_{20}. Sendo assim, os valores de T_{20} ou T_{30} equivalem ao valor de T_{60}, e são obtidos através das Equações (20) e (21), respectivamente (NBR 3382-1, 2017; Brandão, 2016).

Para este trabalho de dissertação, foi utilizado o T_{30} nas medições e simulações de Tempo de Reverberação.

$$T_{20} = 60\,\frac{t_{-25} - t_{-5}}{-5-(-25)} = 3(t_{-25} - t_{-5}), \qquad \textit{em decibels (dB)} \qquad (20)$$

$$T_{30} = 60\,\frac{t_{-35} - t_{-5}}{-5-(-35)} = 2(t_{-35} - t_{-5})\,. \qquad \textit{em decibels (dB)} \qquad (21)$$

FIGURA 2.17 – DETALHE DA CURVA DE MEDIÇÃO DE DECAIMENTO DA PRESSÃO SONORA



FONTE: BRANDÃO, 2016, P. 501

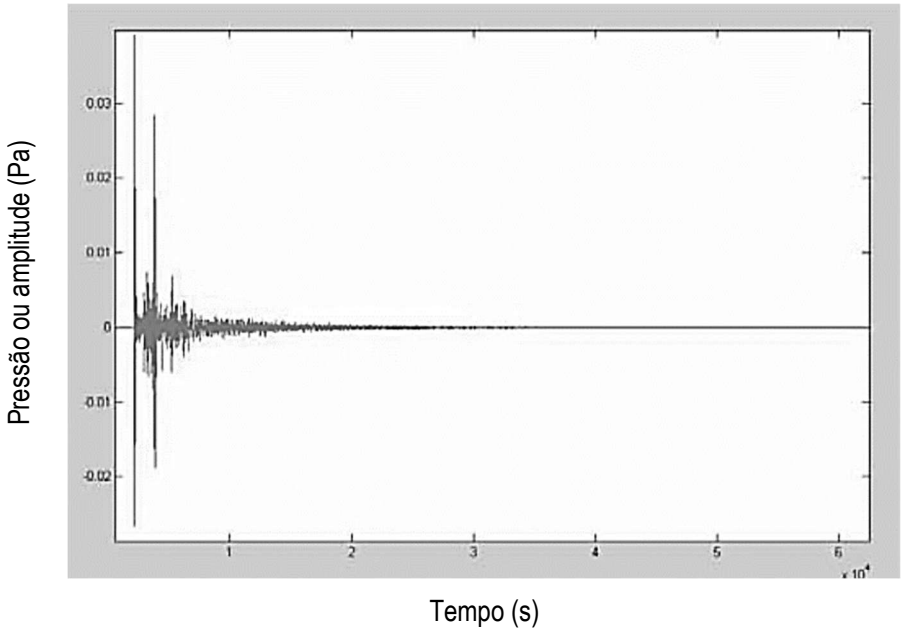
2.3.3 RESPOSTA IMPULSIVA

Figueiredo descreve a resposta impulsiva de uma sala:

> Ao excitarmos uma sala com um estímulo impulsivo, um tiro de pistola, por exemplo, o sinal captado por um microfone é a resposta impulsiva do sistema. A resposta impulsiva pode ser entendida como um histórico da pressão acústica entre dois pontos: o de excitação e o de captação.
> Quando um som é produzido no interior de um ambiente contornado por paredes ou contendo obstáculos, as ondas sonoras se espalham num padrão difuso de reflexões. A maneira como essas ondas interagem com a superfície e como elas se distribuem pelo espaço estará marcada na resposta impulsiva da sala. (2005, p. 49)

A Figura 2.18 apresenta um exemplo de resposta impulsiva, onde o eixo x é o tempo e o eixo y representa a pressão acústica. O primeiro grande traço no tempo é o som direto, e os demais traços são os sons referentes às reflexões das superfícies do ambiente. A “cauda” que se forma no gráfico é chamada de cauda reverberante.

FIGURA 2.18 – EXEMPLO DE RESPOSTA IMPULSIVA



FONTE: FIGUEIREDO, 2005

2.3.4 OUTROS PARÂMETROS ACÚSTICOS ALÉM DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Em 1994, Beranek fez uma publicação com "os seis atributos que uma sala de música pode ser arquitetonicamente controlada", que são o Tempo de Reverberação, o Intimismo (*Intimacy*), Retardo Inicial (*Initial Time-Delay Gap* – ITDG), Altura (G - *Loudness*), Difusividade (*Diffuseness*), Impressão Espacial (*Spatial Impression*), e Clareza ou Definição (*Early-To-Late-Reflections*). Nesta dissertação foram estudados alguns destes parâmetros acústicos.

Cada parâmetro acústico objetivo descreve um atributo acústico subjetivo, ou seja, que representa o que sentimos quando ouvimos um som dentro de uma sala. No caso do Tempo de Reverberação, é um parâmetro acústico objetivo que descreve o parâmetro subjetivo de reverberação da sala. Além do TR, existem diversos outros parâmetros acústicos que ajudam a analisar, descrever, compreender e melhorar a acústica de salas. Foram utilizados neste trabalho, além do TR, os parâmetros Clareza (C_{80}), Definição (D_{50}), Tempo Central (TC) e Tempo de Decaimento Inicial (EDT).

- **Fator de Clareza e Definição**

Os sons que chegam aos ouvidos dentro dos primeiros 50 a 80 milissegundos são essenciais para algumas propriedades da percepção sonora. São importantes nesses parâmetros o padrão de reflexão das superfícies da sala, a distância entre o emissor e o receptor, e as dimensões da sala, sendo a reverberação um atributo decisivo (Figueiredo, 2005).

Cabe destacar também que o Fator de Clareza (C_{80}) é dada em dB, e a Definição (D_{50}) em porcentagem.

> A expressão física da Clareza C_{80} (dB) é a razão logarítmica entre a energia que chega nos primeiros 80 milissegundos e a energia remanescente. Essa razão também pode ser tomada nos primeiros 50 milissegundos (C_{50}). A expressão física da Definição D_{50} é a razão linear entre energia que chega nos primeiros 50 milissegundos e a energia total. Essa razão também pode ser tomada nos primeiros 80 milissegundos (D_{80}) (Figueiredo, 2005, p. 41).

O limite de 80 milissegundos é indicado para avaliações de salas destinadas à música, e de 50 milissegundos para avaliações de salas indicadas para palavra. Sendo assim, os parâmetros C_{80} e D_{80} são utilizados para avaliação de salas de música, e o C_{50} e D_{50} são utilizados para avaliação de salas para fala, sendo mais comum a utilização do C_{80} e D_{50} (BRANDÃO, 2016).

Os valores da Clareza podem ser negativos, quando a região das primeiras reflexões possui menos energia que a cauda reverberante, ou seja, quando o T_{60} é muito extenso. São positivos quando a região das primeiras reflexões possui mais energia que a cauda reverberante. Se o valor for nulo, a região das primeiras reflexões possui a mesma quantidade de energia que a cauda reverberante (Brandão, 2016).

A Tabela 2.10 apresenta os valores indicados para o parâmetro Clareza C_{80}, de acordo com o tipo de música a ser utilizada numa sala (do Valle, 2009).

TABELA 2.10 – CLAREZA C_{80} E TIPO DE MÚSICA

Abaixo de 0 dB	Instrumentos de sopro, incluindo órgão, tocando melodias com notas longas.
De 0 dB a +4 dB	Música clássica e sinfônica, cordas e corais. Permite música mais rápida que o anterior, e é ideal para igrejas tradicionais.
De +2 dB a +6 dB	Instrumentos de cordas puxadas, música pop. Música religiosa mais moderna, jazz leve, estilos com notas mais rápidas.
De +6 dB a +10 dB	Instrumentos de percussão, rock n´roll inclusive em igrejas. Adapta-se melhor à música atual.
Valores superiores a +10 dB	Produzem salas muito “mortas” para música.

FONTE: DO VALLE, 2009

Quanto maior o TR, menor a Clareza ou Definição, e vice-versa. Para execução de música com trechos de muitas notas rápidas, é indicado maior nível de Clareza e Definição, ou seja, menor TR. Hoje a Clareza é um parâmetro acústico indicado em normas internacionais, como a ISO 3382 (Figueiredo, 2005).

As expressões de C_{80} e D_{50} são definidas respectivamente pelas Equações (22) e (23).

$$C_{80} = 10\log\left[\frac{\int_{0}^{80ms} p^2(t)dt}{\int_{80ms}^{t_f} p^2(t)dt}\right] \quad \textit{em decibels (dB)} \qquad (22)$$

$$D_{50} = \frac{\int_{0}^{50_{ms}} p^2(t)dt}{\int_{0}^{t_f} p^2(t)dt} \quad \textit{em porcentagem (\%)} \qquad (23)$$

onde p(t) é a pressão sonora instantânea da resposta impulsiva medida no ponto de medição.

- **Tempo Central (TC)**

Assim como os parâmetros C_{80} e D_{50}, o Tempo Central (TC) é uma medida da razão entre a energia das primeiras reflexões e a energia da cauda reverberante. Pode ser interpretado como o "centro de gravidade" da energia numa resposta de impulso. Se a área de absorção numa sala for aumentada, aumenta a concentração de energia na parte inicial do decaimento, alterando o "centro de gravidade" da curva de decaimento para um Tempo Central menor. Já aumentando o volume da sala o decaimento de energia se torna mais lento, concentrando mais energia na cauda reverberante e aumentando o TC. Menores valores de TC estão relacionados a maiores valores de C_{80} e D_{50} e menores valores de TR, e vice-versa (Brandão, 2016).

O valor de TC é obtido pela Equação (24), em função da resposta ao impulso h(t) da sala (vide seção 2.5.1).

$$TC = \frac{\int_{0}^{\infty} tp^2(t)\,\mathrm{d}t}{\int_{0}^{\infty} p^2(t)\,\mathrm{d}t} \quad \textit{em milissegundos (ms)} \qquad (24)$$

- **Tempo de decaimento inicial (EDT – *Early Decay Time*)**

O Tempo de Decaimento Inicial (*EDT – Early Decay Time*) é influenciado pelas primeiras reflexões e está relacionado ao início do decaimento da energia sonora. Este parâmetro é associado à configuração fonte-receptor na sala, e varia mais no ambiente do que o T_{60}. Corresponde ao tempo em segundos para o som emitido diminuir 10 decibels após interrupção do sinal sonoro. Multiplica-se este tempo por 6 para obtenção do EDT (Brandão, 2016; Oliveira, 2005).

É possível encontrar valores muito diferentes de EDT mesmo com valores muito próximos de TR, em diferentes medições ou simulações (Figueiredo, 2005).

- **Calor ou Razão de Graves**

O parâmetro físico que descreve o Calor é a Razão de Graves (BR – *bass ratio*), obtido com a divisão do tempo de reverberação nas frequências graves (125 e 250Hz) pelo tempo de reverberação nas frequências médias (500 e 1kHz). Este parâmetro, assim como o Brilho, está relacionado ao timbre da sala. Os revestimentos rígidos numa sala fazem as frequências graves reverberarem por mais tempo, aumentando o BR e a sensação de calor acústico.

A Equação (25) corresponde ao cálculo do BR médio. Também é possível calcular o BR para cada frequência grave (63, 125 ou 250 Hz). A Tabela 2.11 apresenta critério de mérito para Calor (Oliveira, 2005; Figueiredo, 2005, Brandão, 2016).

$$BR_{médio} = (TR_{125} + TR_{250}) / (TR_{500} + TR_{1000}) \quad (25)$$

TABELA 2.11 – CRITÉRIO DE MÉRITO PARA CALOR NA MÚSICA

Categoria	BR_{125}	BR_{250}	$BR_{médio}$
Excelente	1,27	1,14	1,21
Boa	1,03	1,06	1,05
Regular	0,95	0,97	0,96
Pobre	0,86	0,90	0,88

FONTE: FIGUEIREDO, 2005, P. 28

- **Brilho ou Razão de Agudos**

O Brilho está relacionado com os agudos assim como o Calor está relacionado com os graves. O parâmetro físico que o descreve é a Razão de Agudos. Deriva da proeminência dos harmônicos superiores e do relativo baixo decaimento para estas frequências. É impactado pelo intervalo entre o som direto e as primeiras reflexões, e relacionado com a Clareza. O Brilho Médio pode ser obtido através da Equação (26) (Figueiredo, 2005; Brandão, 2016).

$$Brilho\ Médio = (TR_{2000} + TR_{4000}) / (TR_{500} + TR_{1000}) \quad (26)$$

- **Vivacidade**

Está relacionada à reverberação nas médias frequências. Salas “vivas” possuem reverberação nestas frequências, salas “mortas” são “secas”, com pouca vivacidade. Beranek mediu o tempo de reverberação em 1kHz para salas consideradas secas. Para um repertório tradicional de orquestra sinfônica, regentes e ouvintes treinados levaram Beranek a considerar um tempo de reverberação de 1,6s como um valor mínimo nas frequências médias para uma sala de música ter uma vivacidade razoável (Figueiredo, 2005).

- **Intimismo**

O parâmetro subjetivo Intimismo corresponde à sensação do ouvinte de estar próximo aos músicos, e é medido pelo parâmetro objetivo ITDG (*Initial Time Delay Gap*), que é a diferença do tempo de chegada do som da primeira reflexão ao ouvido e do tempo de chegada do som direto ao ouvido. O ITDG ideal no meio do eixo longitudinal de um auditório é de aproximadamente 20 milissegundos. As salas consideradas "pobres" acusticamente possuem o ITDG maior que 70 milissegundos. Este parâmetro objetivo é obtido através da Equação (27) (Beranek, 2004).

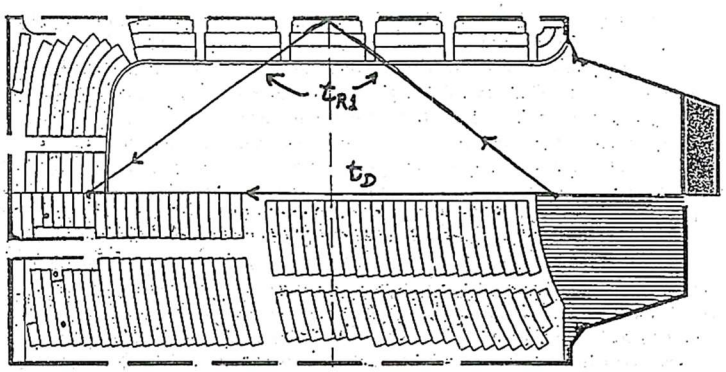
$$t_1 = t_{r1} - t_d \qquad \textit{em segundos (s)} \tag{27}$$

onde t_{r1} é o tempo de chegada da 1ª reflexão do som emitido da fonte até o receptor, e t_d é o tempo de chegada direto do som emitido da fonte até o receptor.

O Intimismo é influenciado estreitamente pela disposição das superfícies refletoras mais próximas. Se duas reflexões são separadas por mais de 70 milissegundos, o ouvido humano entende a segunda reflexão como um eco (Figueiredo, 2005).

O ITDG é retratado na Figura 2.19 (Beranek, 2004).

FIGURA 2.19 – INTIMISMO E ITDG



FONTE: BERANEK, 2004, P. 7

- **Fator de Força**

O Fator de Força (G – *Loudness*) é função da área coberta pelo público e do Tempo de Reverberação, pois cada pessoa recebe menos energia sonora se o público aumenta, ao mesmo tempo que o TR depende da razão entre o volume da sala e a área de público. Este parâmetro é obtido num receptor sonoro medindo a intensidade do som na sua posição em relação a uma fonte sonora no palco, e depois fazendo a razão deste valor com a medição da mesma intensidade da mesma fonte numa câmara anecoica, a 10m de distância. Como não é comum encontrar câmaras anecoicas com distâncias de pelo menos 10m, é possível fazer esta medição também ao ar livre. Multiplicando 10 vezes o logaritmo desta razão obtém-se o G, que normalmente é calculado nos primeiros 80 milissegundos, como também no intervalo 80ms-1s após a chegada do som direto. Valores altos de G nas

frequências de 45 a 350 Hz contribuem para a sensação de impressão espacial (Beranek, 2004; Brandão, 2016). G pode ser calculado através da Equação (28).

$$G = \quad 10 \log \frac{\int_0^{t_2} p^2(t)\,dt}{\int_0^{t_2} p_A^2(t)\,dt} \qquad \textit{em milissegundos (ms)} \qquad (28)$$

onde h(t) é a resposta ao impulso da configuração sala-fonte-receptor e $h_{10}(t)$ é a resposta ao impulso de uma configuração fonte-receptor medida a 10m da fonte em campo livre.

- **Nível de som direto**

A intensidade do som direto pode ser mascarada pelo som residual ou pelo som reverberante. Este parâmetro subjetivo depende de vários fatores: distância dos músicos aos ouvintes, padrão de reflexão sonora, tamanho da sala, entre outros. Depois de analisar diversas salas, Beranek chegou à conclusão que a melhor distância entre o maestro e o centro da plateia seria de 18,3m, que representa o melhor nível de som direto, e a pior sala analisada tinha uma distância do maestro para o centro da plateia de 48m, apresentando o pior nível de som direto. A sala Carnegie Hall em Nova Iorque a distância de 18,3m entre maestro e centro da plateia, sendo considerada perfeita neste parâmetro de Beranek (Figueiredo, 2005).

- **Coloração**

O Tempo de Reverberação de uma sala varia com a frequência, e cria uma Coloração para o ambiente, de acordo com a reverberação de cada frequência. Para uma Coloração bem equilibrada, o TR deve subir em torno de 50% nos graves e baixar cerca de 50% nos agudos. Excesso de reverberação nos graves torna a sala “retumbante” ou cavernosa, a falta de reverberação nos graves torna a sala “magra”, o excesso de reverberação nos agudos torna a sala muito “brilhante” ou muito “espelhada”, a falta de reverberação nos agudos torna a sala “abafada” ou “escura”, o excesso de reverberação em alguns médios torna a sala “ressonante” ou ”falsa”, e a falta de reverberação em alguns médios faz com que a sala “enterre” alguns instrumentos e vozes onde predominam aquelas frequências (do Valle, 2009).

- **Inteligibilidade**

É a principal característica acústica de um ambiente porque representa o grau de entendimento das palavras no seu interior (Carvalho, 2010).

É a facilidade de se entender as palavras numa sala (do Valle, 2009).

Os parâmetros acústicos objetivos que descrevem a Inteligibilidade são TR, D_{50} e C_{80}. Quanto menor o TR, maior serão os parâmetros D_{50} e C_{80}, e maior será a Inteligibilidade.

2.4 MATERIAIS E SUAS APLICAÇÕES PARA SALAS

Nesta dissertação serão apresentados e analisados alguns materiais existentes e propostos para o condicionamento acústico (desconsiderando suas características de isolamento acústico) do Teatro Armando Gonzaga. A principal propriedade analisada é a curva de absorção α dos materiais, de 125 Hz a 4 kHz.

A NBR 12179 (ABNT, 1992) apresenta uma lista de materiais na sua maioria já conhecidos pelos brasileiros, com seus coeficientes de absorção nas faixas de frequência de 125Hz a 4kHz, e foram utilizados para representar os materiais existentes da sala. Outras referências também foram utilizadas, quando não foram encontrados determinados materiais nesta lista. Para a proposta de adequação foram utilizados materiais atuais, de catálogos comerciais das empresas fabricantes.

A porosidade e a rigidez dos materiais são características importantes para determinação da absorção em função da frequência. A maioria dos materiais têm α bastante variado em função da frequência (Costa, 2009).

Para apresentar uma ideia geral de diferentes tipos de materiais, aqui serão apresentados alguns exemplos encontrados na Norma Brasileira. A Tabela 2.12 apresenta alguns materiais que têm pouca absorção sonora devido a sua rigidez, a Tabela 2.13 apresenta materiais com maior absorção nas altas frequências, como carpetes e tecidos, e a Tabela 2.14 apresenta materiais com maior absorção nas baixas frequências.

TABELA 2.12 – MATERIAIS RÍGIDOS DE BAIXA ABSORÇÃO SONORA

Material	Fonte	α_{125Hz}	α_{250Hz}	α_{500Hz}	α_{1kHz}	α_{2kHz}	α_{4kHz}
Superfície de concreto	NBR 12179	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Reboco liso	NBR 12179	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06
Chapa de mármore	NBR 12179	0,01	0,01	0,01	-	0,02	-

FONTE: NBR 12179, 1992

TABELA 2.13 – MATERIAIS COM MAIOR ABSORÇÃO SONORA EM ALTAS FREQUÊNCIAS

Material	Fonte	α_{125Hz}	α_{250Hz}	α_{500Hz}	α_{1kHz}	α_{2kHz}	α_{4kHz}
Tapete 5mm espessura	NBR 12179	0,04	0,04	0,15	0,29	0,52	0,59
Tapete de veludo	NBR 12179	0,05	0,06	0,10	0,24	0,42	0,60
Cortina de porta comum, opaca	NBR 12179	0,15	-	0,20	-	0,40	-

FONTE: NBR 12179, 1992

TABELA 2.14 – MATERIAIS COM MAIOR ABSORÇÃO SONORA EM BAIXAS FREQUÊNCIAS

Material	Fonte	α_{125Hz}	α_{250Hz}	α_{500Hz}	α_{1kHz}	α_{2kHz}	α_{4kHz}
Chapas de papelão-gesso, de 9,5mm, sem furos na frente, espaço de 50mm, enchido de lã mineral	NBR 12179	0,36	0,12	0,08	0,07	0,06	0,10
Revestimento de vidro espaçado a cada 5cm da parede	NBR 12179	0,25	0,20	0,10	0,05	0,02	0,02
Piso parquê sobre areia	Carvalho, 2010	0,20	0,15	0,13	0,12	0,09	0,06

FONTE: NBR 12179, 1992

2.5 SIMULAÇÕES ACÚSTICAS EM SALAS DE ESPETÁCULO

2.5.1 MÉTODOS DE SIMULAÇÃO

As simulações acústicas computacionais tiveram início na década de 1960 com a publicação de Krokstad, Strøm e Sørsdal (1968), em que foram desenvolvidos os primeiros algoritmos para simular o comportamento do campo sonoro dentro de salas. Evoluiram rapidamente, e nos anos 1990, já se produzia simulações com audibilização (*auralization*), onde se podia reproduzir o espaço acústico virtual através de fones de ouvido, simulando uma sensação binaural com fidelidade sonora. Hoje em dia, já é possível ouvir esse espaço acústico virtual muito próximo da realidade, inclusive unir esta tecnologia ao espaço físico arquitetônico virtual (VR = *virtual reality*), através da utilização de imagens em três dimensões juntamente à tecnologia de audibilização biauricular (Vorlander *et al.*, 2014).

As vantagens da simulação numérica de acústica são o baixo custo, a rapidez na modelagem e remodelagem da sala, e no tratamento dos resultados. Os experimentos com métodos híbridos, onde são combinados diversos fenômenos físicos da propagação do som, como reflexão, absorção, difusão, difração, transmissão e interferência, têm sido muito utilizados para simulação acústica computacional (Tenenbaum & Camilo, 2004; Tenenbaum *et al.*, 2007).

No método de simulação numérica acústica de traçado de raios, a modelagem da onda sonora segue os pressupostos da acústica geométrica, com raios acústicos retilíneos emitidos a partir da fonte sonora. Nesse método, cada raio possui as informações de potência da fonte, sendo seu percurso influenciado pela viscosidade do ar e pela geometria da sala, assim como pelos fenômenos de absorção, reflexão especular e reflexão difusa. O método de traçado de raios não é indicado para simulações que considerem espalhamento, pois nesse fenômeno um raio que incide sobre uma superfície é refletido em diversos outros novos raios. Esse método se restringe ao cálculo das reflexões especulares somando a essas toda a energia associada às reflexões difusas. Nesse método são relevantes a energia total emitida pela fonte sonora, o número de raios emitidos pela fonte, a direcionalidade da fonte através de coordenadas esféricas, o coeficiente de absorção do ar, a distância percorrida

pelo raio e os coeficientes de absorção das superfícies. A desvantagem do método do traçado de raios é a necessidade de muitos raios para a simulação (Tenenbaum & Camilo, 2004; Tenenbaum *et al.*, 2007).

No método de traçado de raios, fenômenos ondulatórios como interferência de ondas não são considerados. É um método estostático, em que não há garantias de que um raio chegará ao receptor, mesmo num campo livre, havendo apenas uma probabilidade de o raio chegar até o receptor (Torres, 2018).

No método de traçado de raios podem ser utilizadas fontes omnidirecionais (onde os raios são emitidos em todas as direções com a mesma energia sonora) ou direcionais (onde os raios são emitidos com diferentes energias sonoras nas diferentes direções). Os receptores são superfícies esféricas. A cada incidência de um raio em uma superfície, sua energia diminui de acordo com o coeficiente de absorção α e do coeficiente de espalhamento *s*, que está relacionado à difusão da superfície (Brandão, 2016).

Já o método da transição de energia (também chamado de método dos caminhos aleatórios, da radiosidade ou método dos pacotes de energia) é baseado na troca de energia entre as superfícies em intervalos regulares de tempo iguais ao tempo característico da sala (tempo de transição), que corresponde ao tempo para a onda sonora percorrer o livre caminho médio da sala (4V/S, onde V é o volume da sala e S a superfície total do seu contorno). Nesse método a fonte sonora distribui toda a energia para as superfícies da sala, que por sua vez emitem para as outras superfícies, e assim sucessivamente. Todas as superfícies nesse método são consideradas difusores perfeitos, ou seja, espalham a energia incidente para todas as direções do plano que contém a normal à superfície e o raio incidente (Tenenbaum & Camilo, 2004; Tenenbaum *et al.*, 2007).

O método híbrido emprega os dois métodos citados numa combinação, de forma a simular os três fenômenos físicos mais importante na acústica de salas: absorção, a reflexão especular e a reflexão difusa. Essa combinação usa o método do traçado de raios para as reflexões especulares e o método da transição de energia para as reflexões difusas, sobrepondo os dois resultados para o cálculo da resposta impulsiva (Tenenbaum *et al.*, 2007).

O modelo não deve ter um alto nível de detalhamento para evitar longos e desnecessários tempos para cálculo computacional na simulação (Vorlander, 2010).

É de conhecimento geral que nas salas típicas de música, após 3 ou 4 reflexões, a principal propagação de energia se transforma em som difuso, ou seja, se dispersa (Vorlander, 2011).

De acordo com Reis (2018), as ferramentas computacionais para acústica com mais publicações nos Periódicos Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) são as seguintes (Tabela 2.15):

TABELA 2.15 – PROGRAMAS PARA SIMULAÇÕES ACÚSTICAS COMPUTACIONAIS DE SALAS

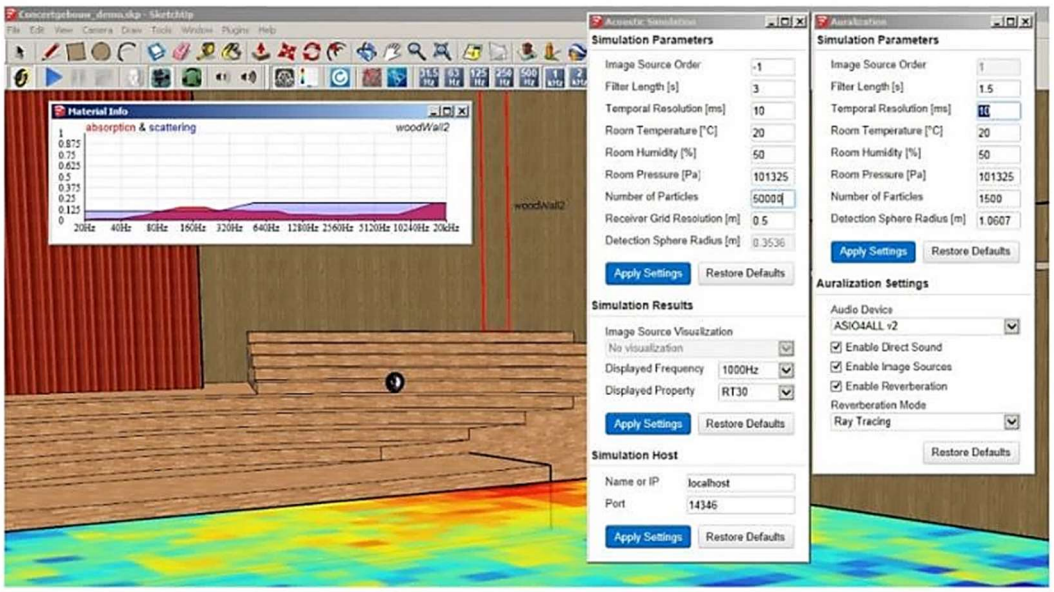
Software	**Representante comercial e país**
Odeon	Odeon A/S (Dinamarca)
CadnaR	DataKustik (Alemanha)
RAIOS	GROM (Brasil)
CATT-Acoustic	TUCT™ (Suécia)
EASE	AFMG Technologies GmbH (Alemanha)

FONTE: REIS, 2018

2.5.2 AUDIBILIZAÇÃO

No processo de projeto de arquitetura, muitas vezes a disciplina de acústica é esquecida, pois os arquitetos em sua maioria não têm conhecimento na área. Quando um especialista em acústica é envolvido no processo, quase sempre não é no início, e as opções já estão limitadas. Assim como o planejamento arquitetônico hoje em dia é feito com modelos tridimensionais, a acústica também pode ser "renderizada" com simulações ou audibilização (*auralization*) em tempo real de modelos virtuais. Pode-se ouvir os sons emitidos no modelo e a resposta aos mesmos, de acordo com a volumetria e os materiais da sala, assim como a posição do emissor e do receptor do som. Alguns *software* vêm sendo utilizados para simulação acústica e audibilização, como *Odeon, CATT e Ease*. Hoje em dia também pode ser utilizado um *plug-in* de acústica (*Raven*) dentro do *software* de arquitetura *Sketch Up* (Figura 2.20), para a audibilização do modelo tridimensional, com retorno em fones de ouvido em modo estereofônico (Aspock *et al.*, 2014).

FIGURA 2.20 – *SOFTWARE* SKETCH UP COM O *PLUG-IN* RAVEN

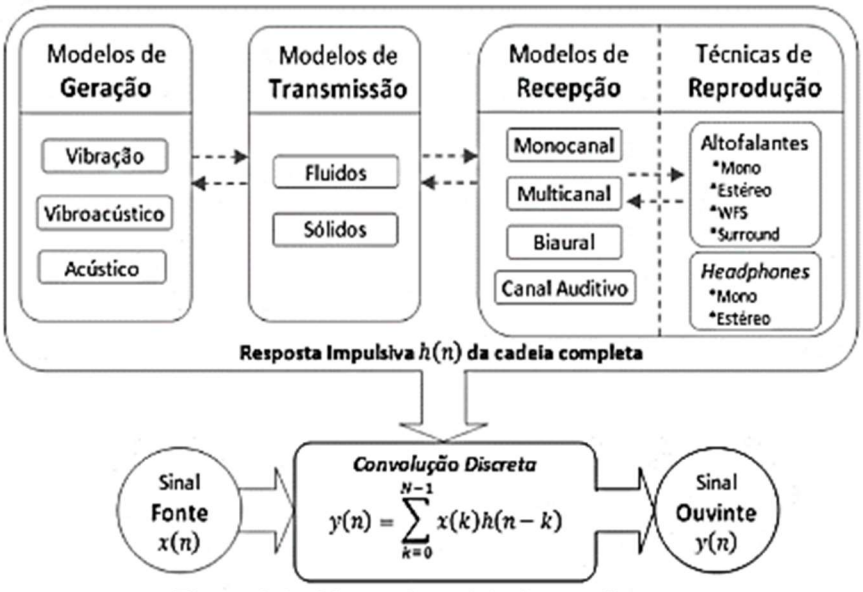


FONTE: VORLANDER, 2014

O processo de audibilização pode ser separado em processos de geração, propagação e reprodução de som, através de diagramas de blocos e da correspondente representação desses blocos como ferramentas da teoria de sistemas. Nesse processo, o sinal de uma fonte discreta, x(n), é dito anecoico (um som "seco"). O sinal resultante após a propagação do som no (e/ou entre) ambientes, y(n), contém as características da fonte sonora e dos sistemas de transmissão e de propagação do som. O desempenho de um sistema de transmissão de som é representado pela sua resposta impulsiva, h(n). O sinal de som na posição do receptor é então obtido por convolução do sinal anecoico original com a resposta impulsiva (geralmente representada por um filtro digital) (Vorlander, 2014; Carvalho, 2013).

A Figura 2.21 mostra o diagrama com o processo de audibilização.

FIGURA 2.21 – PROCESSO DE AUDIBILIZAÇÃO



FONTE: CARVALHO, 2013

Vorlander (2014) também ressalta a importância da tecnologia de áudio tridimensional, com audição espacial biauricular, e com o uso de “cabeças artificiais”, considerando forma, densidade e textura do corpo humano (cabeça, orelhas, dorso). O método de audibilização, com processamento em tempo real, pode fazer parte da tecnologia de “realidade virtual”, sendo associado ao espaço tridimensional. Esse método pode ser utilizado para acústica de salas, para engenharia de tráfego e urbana, reproduzindo espaços históricos já não mais existentes, e para psicoacústica e audiologia.

2.5.3 BRAZILIAN ROOM ACOUSTIC SIMULATOR

O BRASS (*Brazilian Room Acoustic Simulator*) é um *software* de simulação acústica em desenvolvimento na Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro pelo prof. Julio Cesar Boscher Torres, e que foi utilizado como ferramenta nesta dissertação de mestrado. Os parâmetros acústicos apresentados nos resultados das simulações nesse *software* são os Tempos de Reverberação (T_{60}, T_{30}, T_{20}), Tempo de Decaimento Inicial

(EDT), Clareza (C_{80}), Definição (D_{50}), Tempo Central (TC), Nível de Pressão Sonora (SPL – *Sound Pressure Level*) e Nível de Pressão Sonora Ponderado em “”A” (SPL(A)), para as 9 faixas de frequência 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k e 16kHz.

O BRASS utiliza somente o método de raios para obter respostas impulsivas mono e biauriculares nos receptores, e permite obter os principais parâmetros acústicos de qualidade da sala, com audibilização. Ao usar o BRASS em salas, a energia captada pelo receptor depende do número de raios emitidos pela fonte, a distância entre a fonte e o receptor, o raio de influência do receptor, a geometria da sala, bem como as características acústicas das superfícies (absorção, espalhamento e transmissão) (Torres, 2018).

Podem ser utilizadas fontes omnidirecionais ou direcionais no BRASS. A potência da fonte em Watts é calculada a 1m de distância dela, na direção do eixo principal de propagação, caso seja direcional. Os raios se propagem no ambiente, refletidos ou não pelas superfícies, de acordo com o coeficiente de absorção correspondente ao material associado a cada superfície. A resposta impulsiva que para um par fonte-receptor é o resultado da soma das energias de cada raio incidente no receptor (Torres, 2018).

Associando arquivos de áudio em formato *wav* para cada fonte sonora e receptores biauriculares, a audibilização no BRASS é efetuada automaticamente, gerando arquivos de áudio estereofônico formato *wav* que representam a sonoridade da sala, com uma ou mais fontes emitindo som ao mesmo tempo. Caso não sejam associadas cabeças virtuais nos receptores, os arquivos gerados serão de microfones omnidirecionais (Torres, 2018).

Um artifício do BRASS que diminui o tempo de simulação é a Cauda Artificial, que calcula a cauda reverberante do som emitido, ao invés de simular toda a reverberação, economizando tempo de cálculo. Esse procedimento foi desenvolvido com base na integração reversa de Schroeder, com métodos de Hirata, Chu e Lundeby (Farina, 2013), baseado no decaimento de energia de cada banda.

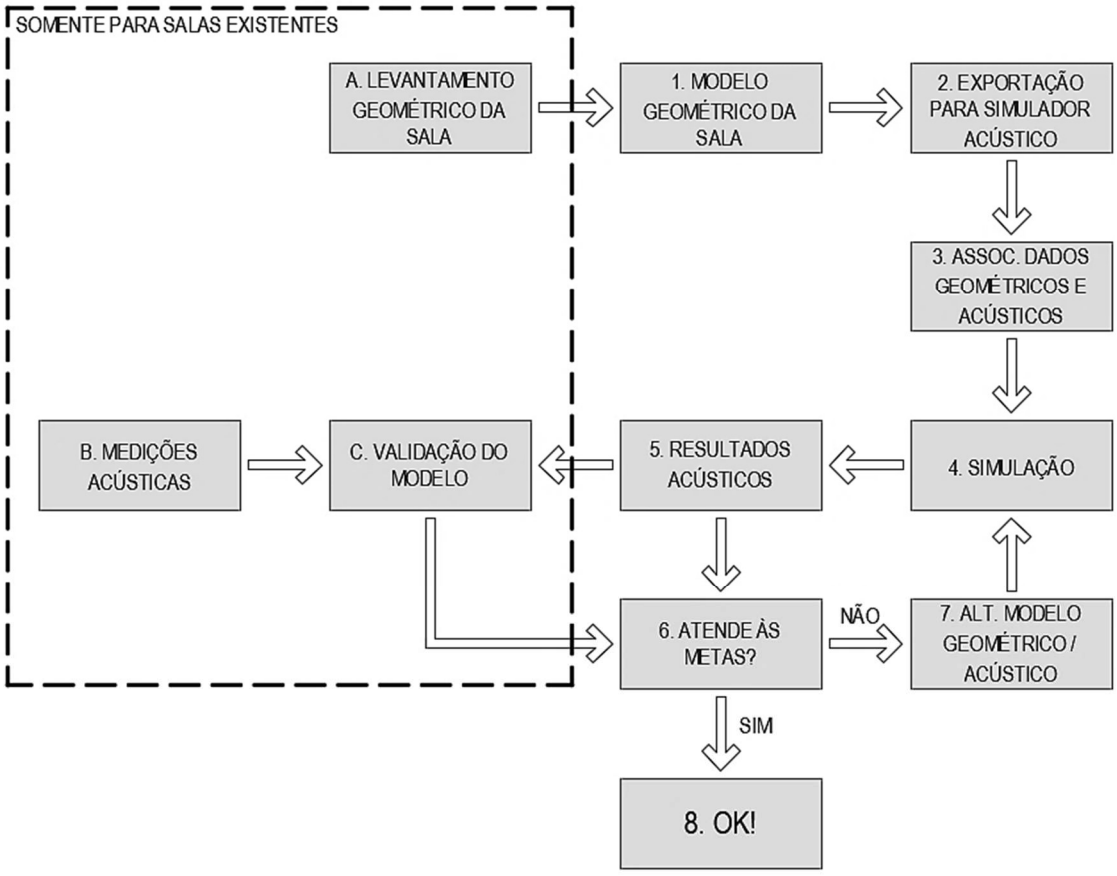
3 METODOLOGIA

Para atender ao objetivo geral deste trabalho, foi utilizado um método aplicável tanto ao projeto de espaços novos quanto à revitalização de salas existentes.

As etapas do método utilizado são apresentadas no diagrama da Figura 3.1. Para projetos de salas a construir, o processo a ser seguido é: (1) elaboração do modelo geométrico da sala; (2) exportação do modelo geométrico para o *software* de simulação acústica; (3) associação dos dados geométricos às informações acústicas; (4) simulação acústica; (5) obtenção dos resultados acústicos da simulação; (6) verificação de atendimento das metas; (7) se os resultados não atenderem às metas estabelecidas, é realizada alteração do modelo geométrico/acústico e o processo volta à etapa (4); se atenderem, o processo vai à etapa (8), fim do processo.

Observa-se que para salas existentes a metodologia inclui as etapas: (A) Levantamento geométrico da sala, necessária para construção do modelo geométrico; (B) Medições acústicas, em diferentes pontos da sala; (C) Validação do modelo, quando os resultados simulados da situação existente são comparados aos resultados das medições. Se o modelo não for validado, deve retornar à etapa (7) para alteração do modelo, nova simulação e nova validação, até o modelo estar validado. Para propor alterações projetuais no modelo, após a validação deve retornar à etapa (7) para propor as novas alterações geométricas/acústicas, e repetir o processo de simulação até atingir as metas almejadas.

FIGURA 3.1 – DIAGRAMA DA METODOLOGIA



FONTE: O AUTOR

3.1 O TEATRO ARMANDO GONZAGA

Como comentado na introdução para esta dissertação, foi definido como um dos objetivos específicos o estudo de caso do da acústica do Teatro Armando Gonzaga, incluindo diagnóstico da situação atual e propostas de adequação acústica considerando os usos para música acústica (sem amplificação) e palavra.

3.1.1 BREVE HISTÓRICO

O Teatro Armando Gonzaga, projeto do arquiteto Affonso Reidy no bairro de Marechal Hermes, Rio de Janeiro, foi inaugurado em 19 de abril de 1954, pelo presidente Getúlio Vargas. O paisagismo da obra foi feito por Burle Marx, e os painéis das fachadas laterais feitos por Paulo Werneck. O teatro pertencia à Prefeitura do Rio de Janeiro, e após a fusão do estado da Guanabara com o estado do Rio de Janeiro, passou a pertencer ao novo estado resultante, hoje sob a direção da FUNARJ (Fundação de Artes do Estado do Rio de Janeiro), uma autarquia vinculada à Secretaria de Estado de Cultura e Economia Criativa, do Governo do Rio de Janeiro. A Figura 3.2 mostra a vista externa do teatro.

FIGURA 3.2 – VISTA EXTERNA DO TEATRO ARMANDO GONZAGA

FONTE: O AUTOR

Além de ter feito grandes obras como o Ministério da Educação, o Parque do Flamengo e o Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro, cabe também ressaltar a importância de Reidy em outros projetos públicos de interesse social, como o Conjunto Residencial do Pedregulho, o Conjunto Residencial Marquês de São Vicente e o Albergue da Boa Vontade, todos no Rio de Janeiro.

Cavalcanti assim descreve a forma do teatro:

> O partido arquitetônico surgiu da interpenetração de dois prismas trapezoidais, opostos, com alturas distintas, bases de igual comprimento e larguras diferentes. O jogo de espaços e volumes resultante permitiu a Reidy organizar, de modo criativo,

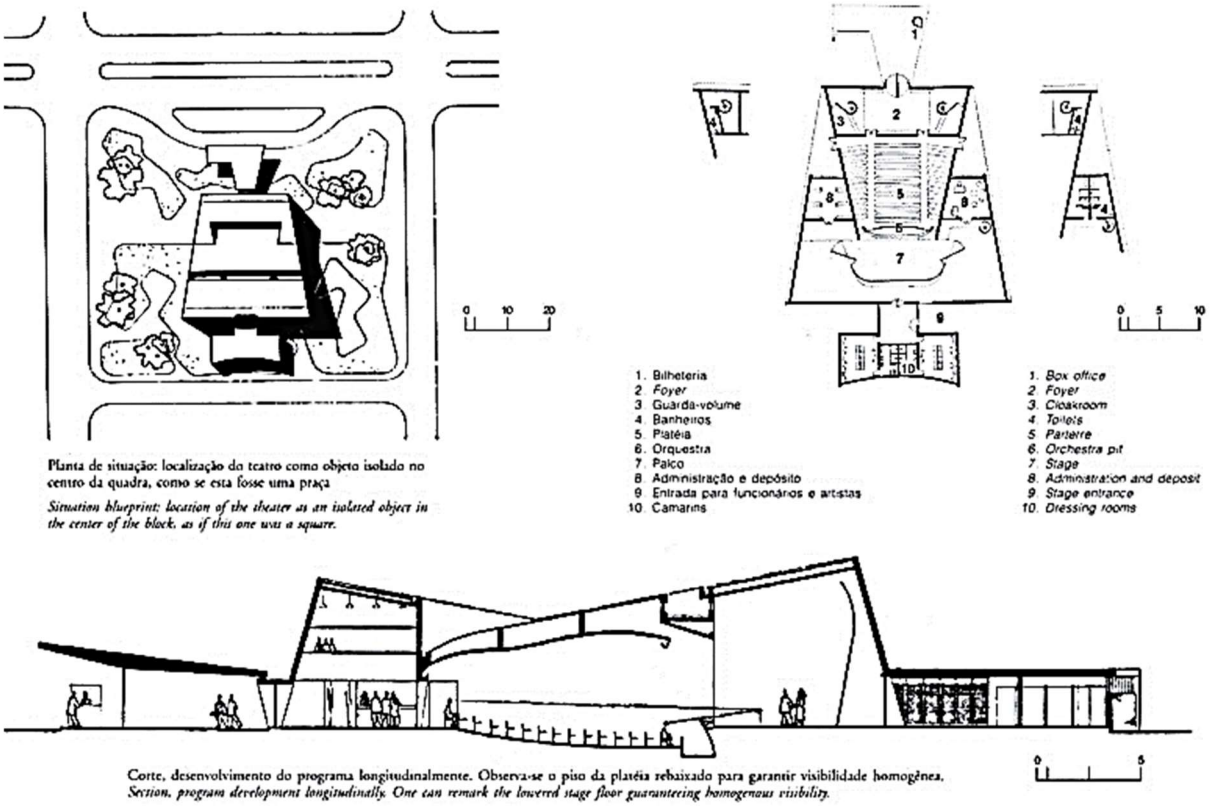
> preciso e racional, todos os espaços do teatro. A interpenetração das coberturas corresponde ao início do espaço do auditório. Na parede de interseção, janelas foram abertas para iluminar o saguão de entrada, enquanto no interior do auditório o espaço resultante foi aproveitado para conter a maquinaria teatral. Dois blocos menores e simétricos, um cego e outro vazado, apenas pontuado por marquise, tocam o volume principal. Os camarins e a entrada dos atores encontram-se na ala menor, atrás do palco. No extremo oposto, arrojada marquise assinala a entrada e a bilheteria, comunicando-se diretamente com o saguão de entrada. Neste, duas escadas helicoidais acessam os balcões e amplas portas abrem-se para a plateia. (2001, p. 40)

De acordo com Bruand, a disposição adotada para o Teatro Armando Gonzaga marca uma

> ruptura deliberada com a repartição tripartite em voga desde a Renascença, onde saguão, plateia e palco se exprimem sem rodeios em volumes distintos, perceptíveis tanto do exterior como do interior. Nada disso acontece aqui: pelo contrário, assiste-se a uma tentativa de unificação. A percepção autônoma dos três elementos desaparece totalmente na visão externa: a linha divisória transversal que surge na composição passa quase no prumo do meio da sala de espetáculos, cuja própria existência é difícil de suspeitar. (2010, p. 233)

A Figura 3.3 mostra as plantas e o corte longitudinal do teatro de forma geral (Bonduki, 2000), e as Figuras 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam o projeto de reforma de 1997 (planta do térreo, planta do pavimento superior e cortes, respectivamente) que se encontram no INEPAC, RJ.

FIGURA 3.3 – PLANTAS E CORTE DO TEATRO



Planta de situação: localização do teatro como objeto isolado no centro da quadra, como se esta fosse uma praça

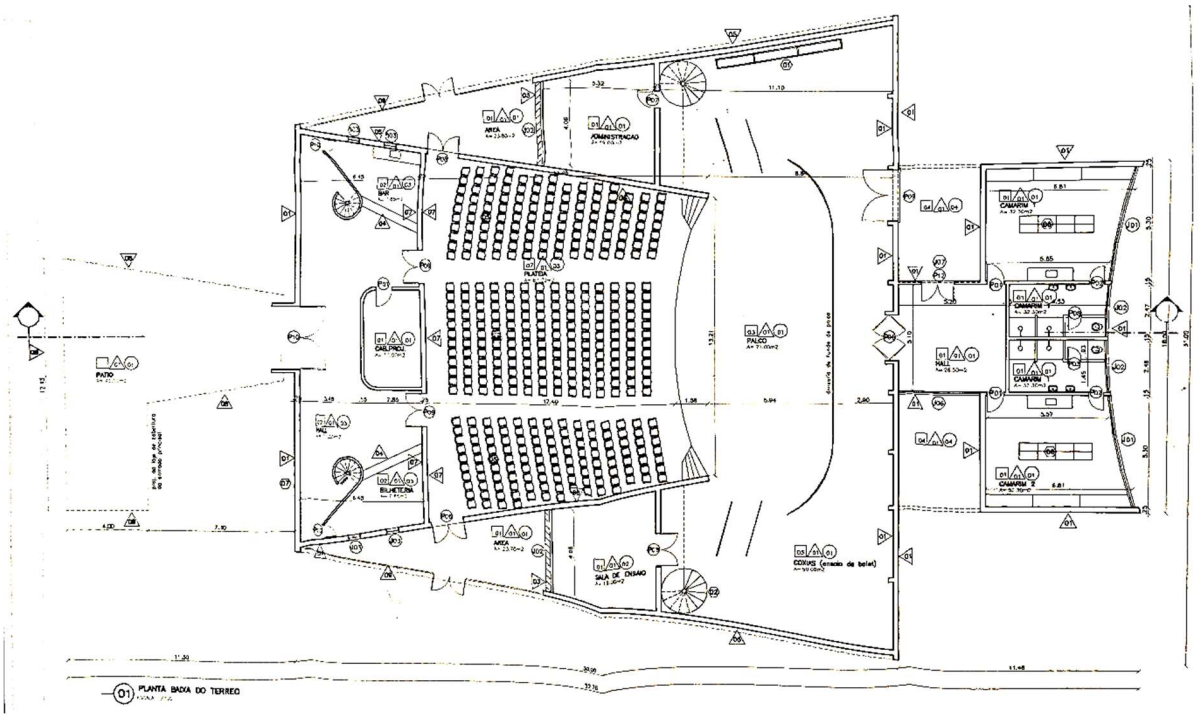
Situation blueprint: location of the theater as an isolated object in the center of the block, as if this one was a square.

Corte, desenvolvimento do programa longitudinalmente. Observa-se o piso da platéia rebaixado para garantir visibilidade homogênea.

Section, program development longitudinally. One can remark the lowered stage floor guaranteeing homogenous visibility.

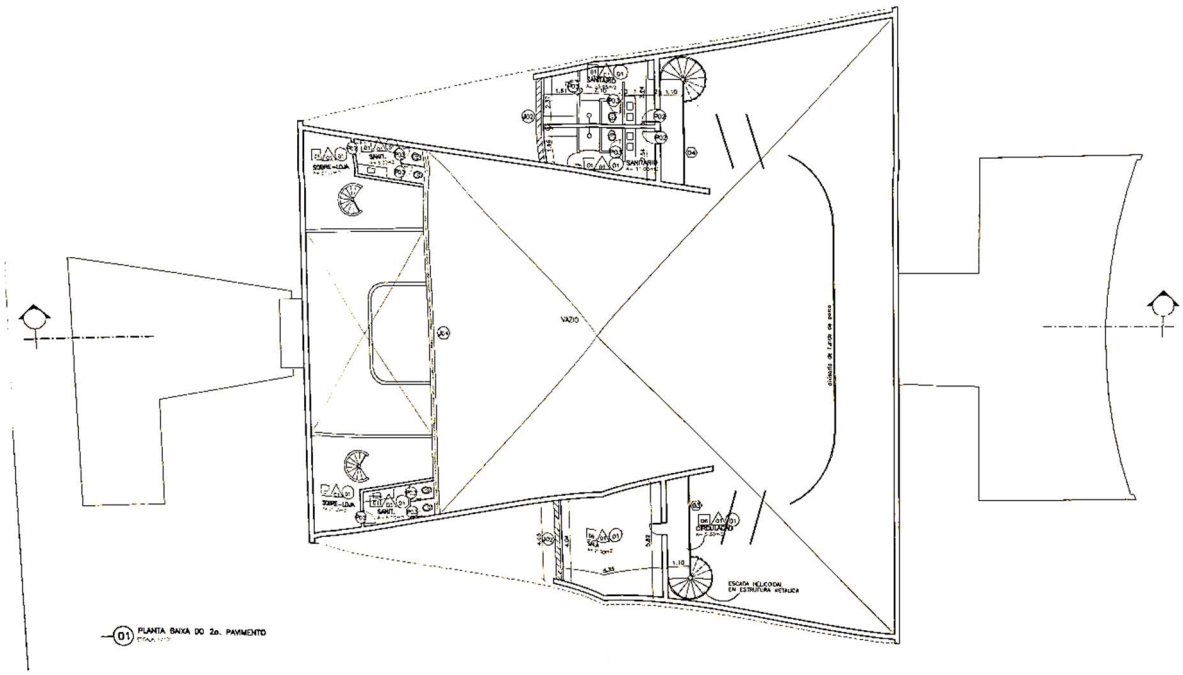
FONTE: BONDUKI, 2000

FIGURA 3.4 – PROJETO DE REFORMA – PLANTA PAV. TÉRREO



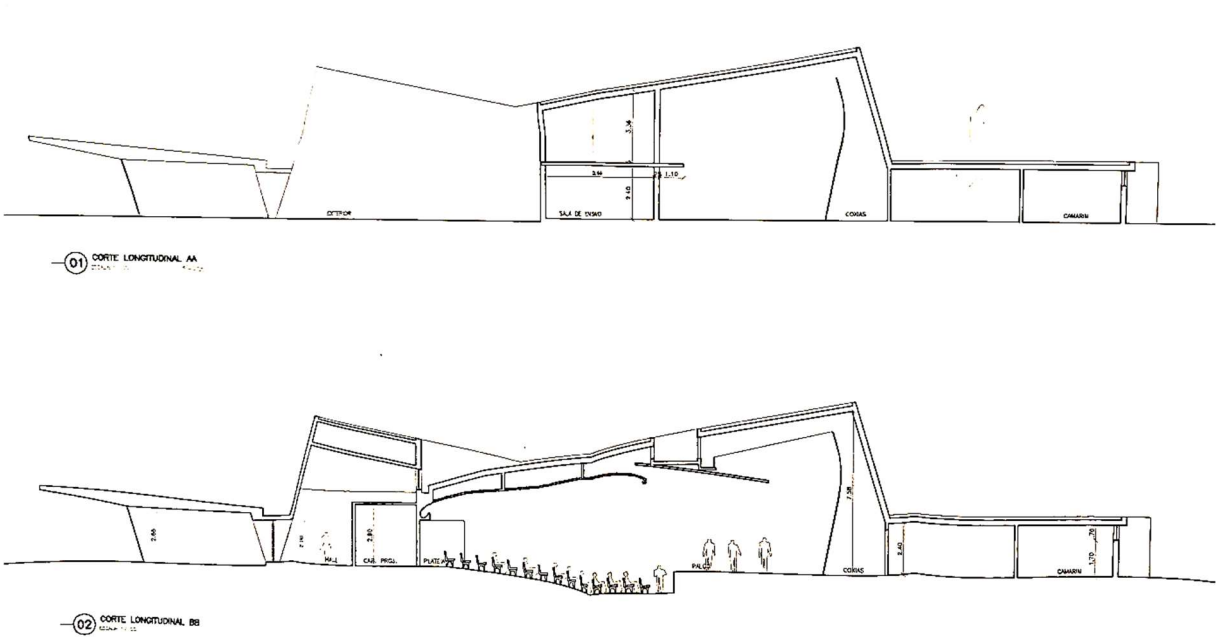
FONTE: INEPAC RJ, 1997

FIGURA 3.5 – PROJETO DE REFORMA – PLANTA PAV. SUPERIOR



FONTE: INEPAC RJ, 1997

FIGURA 3.6 – PROJETO DE REFORMA – CORTES



FONTE: INEPAC RJ, 1997

Esse bairro residencial situado na Zona Oeste do Rio de Janeiro foi fundado em 1911, pelo então presidente Hermes da Fonseca, com o nome de Vila Proletária. O desenho foi feito pelo tenente-engenheiro Palmyro Pulcherio, com ruas largas e arborizadas e 1350 edificações, dentre "casas para solteiros", escolas profissionalizantes femininas e masculinas, repartições públicas, biblioteca, praças de esporte, hospitais e creches. O projeto, sofrendo oposição da sociedade e da imprensa, foi abandonado com a saída do Marechal Hermes da presidência em 1914, com 10% construído (Lima, 1999).

No Estado Novo de Getúlio Vargas o projeto foi retomado, acrescido de conjuntos residenciais, chamados de "pombais" e casas baixas. Os nomes das ruas antes faziam referência a movimentos proletários, e foram substituídos por nomes de militares, evidenciando o regime autoritário (Lima, 1999).

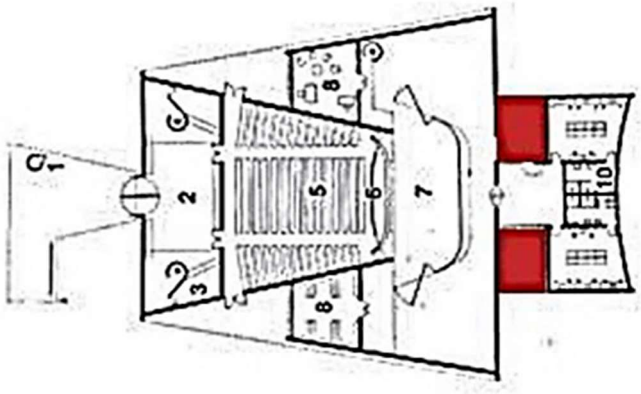
De acordo com Lima (1999), a localização do Teatro no bairro de Marechal Hermes é de uma particularidade importante, já que se localiza em área historicamente negligenciada pelo poder público e pelas elites, visto que no Rio de Janeiro quase todos os teatros se concentram no Centro e na Zonal Sul da cidade. A construção do teatro no subúrbio do Rio de Janeiro também evidenciava a preocupação social dos modernistas.

O nome Armando Gonzaga foi dado em homenagem ao escritor teatral de obras como "O Ministro do Supremo", "O amigo da Paz", "Cala a Boca Etelvina", "O Hóspede do Quarto Z", "O Avanço de Sinal", dentre outras, que retratavam o cotidiano carioca da primeira metade do século XX (Lima, 1999).

Nomes como Procópio Ferreira, Fernanda Montenegro, Oswaldo Loureiro, Tarcísio Meira, Glória Menezes, Elza Gomes, Henriqueta Brieba, Lady Francisco, Felipe Carone, Dercy Gonçalves, entre outros atores notáveis lotaram o público do teatro. O último show importante antes do seu fechamento foi de Alceu Valença, pois a partir de 1977 o ritmo de apresentações no teatro foi sendo reduzido (Lima, 1999).

O teatro ficou fechado durante anos, e suas instalações em estado precário, reflexo da falta de investimento público e privado em peças teatrais durante esse período. O fosso da orquestra foi removido pela falta de uso. Durante algum tempo, cogitou-se transformar o teatro em um supermercado, porém parte da comunidade fez um abaixo-assinado para o então governador Chagas Freitas reativá-lo, e, em 1980, foram iniciadas obras de restauração, mantendo a estrutura básica de 1954 e construindo dois anexos de serviços na parte em "T" dos camarins. Em 28 de julho de 1989, o Teatro Armando Gonzaga foi tombado pelo Instituto Estadual do Patrimônio Cultural. Os anexos posteriormente construídos (em vermelho na Figura 3.7) foram condenados e sua demolição solicitada pelo INEPAC no tombamento, o que não foi feito até o momento. (Lima, 1999).

FIGURA 3.7 – ANEXOS DO TEATRO CONSTRUÍDOS POSTERIORMENTE



FONTE: BONDUKI, 2000; ADAPTADO PELO AUTOR

Inicialmente, o teatro tinha capacidade para 300 pessoas, e após adequações com exigências do Corpo de Bombeiros e da Prefeitura, hoje se encontra com 205 lugares.

Além da edificação do teatro que foi tombada, a praça que o envolve foi considerada como área de tutela para proteção da ambiência pelo INEPAC em 1989. O painel de mosaicos de Paulo Werneck foi tombado pela Prefeitura do Rio de Janeiro em 2015 (Ofício N°1171, INEPAC, 1989; Ofício N°27, Prefeitura do Rio de Janeiro, 2015).

3.1.2 CONDIÇÕES ATUAIS DO TEATRO

O Jornal O Globo publicou uma matéria em 25/05/2018 (Figuras 3.8a e 3.8b) apresentando os problemas de manutenção dos teatros públicos do Rio de Janeiro, citando diversos teatros, incluindo o Armando Gonzaga. A Figura 3.8a é apresentada em tamanho maior, no ANEXO I.

Além desse problema de inundação da sala quando chove, foram encontradas várias infiltrações em visita técnica, realizada no dia 07 de janeiro de 2019. Foi verificado que quase todas as patologias construtivas encontradas são por ação da umidade, causando infiltrações devido à água da chuva, a vazamentos nas instalações hidrossanitárias, e à inundação do terreno. A Figura 3.9 apresenta as fachadas do teatro em 4 ângulos (a, b, c, d). Foi realizado um mapeamento das patologias do teatro, que é apresentado no ANEXO II deste trabalho.

FIGURA 3.8 – NOTÍCIA DE JORNAL

a)
SEGUNDO CADERNO

CENÁRIO DRAMÁTICO

b)
FOTOS DE MARCOS DE PAULA

TEATRO ARMANDO GONZAGA

PROBLEMAS: Sala de espetáculos sofre efeitos de um alagamento no ano passado.

PROMESSAS: Conserto das bombas e instalação de tubulação, diz Nelson Freitas, da fundação estadual que administra os teatros.

FONTE: JORNAL O GLOBO, 25/05/2018

Os piores problemas estão nos teatros mais afastados do circuito Zona Sul – Centro. Em Marechal Hermes, na Zona Norte, o Armando Gonzaga teve situação agravada no segundo semestre de 2017, por causa de um temporal que inundou a sala de espetáculos. Foi preciso abrir um buraco no chão para escoar o aguaceiro, mas o cheiro de mofo não saiu. Fora isso, um camarim está interditado há quase quatro meses por causa de uma infiltração. Tudo isso num prédio tombado, com projeto de Affonso Eduardo Reidy e jardins de Burle Marx (O Globo, Segundo Caderno, 25/05/2018).

FIGURA 3.9 – FACHADAS DO TEATRO

a)

b)

c)

d)

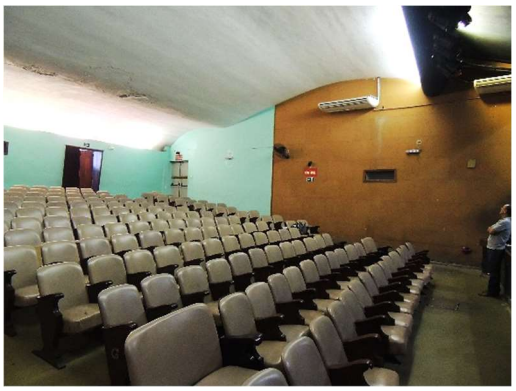
FONTE: O AUTOR

A adequação acústica da sala deverá ser inserida no contexto geral de revitalização do teatro, que inclui a restauração do espaço físico, respeitando as diretrizes do tombamento; *retrofit* dos sistemas de instalação (elétrica, hidráulica, condicionamento térmico, combate a incêndio etc.) e acessibilidade.

A Figura 3.10 mostra o interior do teatro em diferentes ângulos (a, b, c, d, e, f).

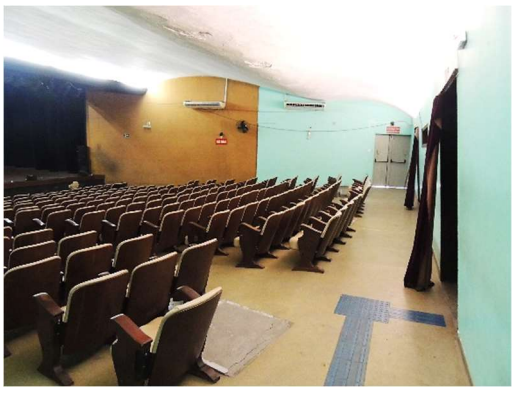
FIGURA 3.10 – INTERIOR DO TEATRO

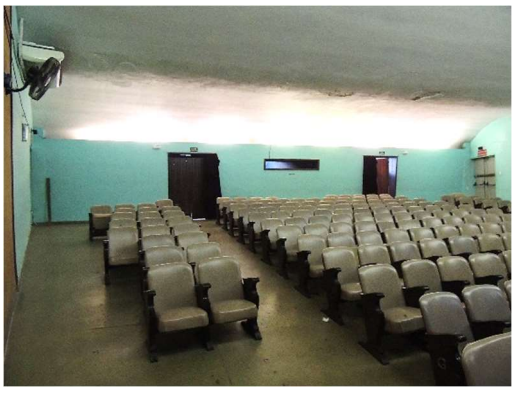
a)

b) 

c)

d)

e) 

f) 

FONTE: O AUTOR

3.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

- **ETAPA A: LEVANTAMENTO GEOMÉTRICO**

Para salas existentes, a etapa inicial envolve a coleta documental de informações: desenhos em papel, CAD (*Computer Aided Design*) ou outros arquivos de imagem e memoriais descritivos. Esta pesquisa assume particular importância quando o projeto de revitalização tem como objeto edifícios de valor arquitetônico, com limitações impostas por órgãos de tutela do patrimônio. Em edifícios existentes as informações documentais devem ser necessariamente complementadas pelo levantamento métrico da sala para identificação de eventuais modificações sofridas pelo projeto original.

No estudo de caso, foi realizado levantamento com trena eletrônica na visita, conferidas as medidas com as plantas encontradas no INEPAC, e foram feitos os desenhos em CAD. No levantamento, foram também identificados os materiais de revestimento interno da sala (paredes próximas ao palco de cortiça, paredes do auditório e da caixa cênica em emboço liso, teto em emboço áspero, piso do palco de madeira sobre espaço vazio, piso do auditório em vinílico sobre concreto, poltronas de couro sintético, cortinas do palco em tecido comum, portas de madeira).

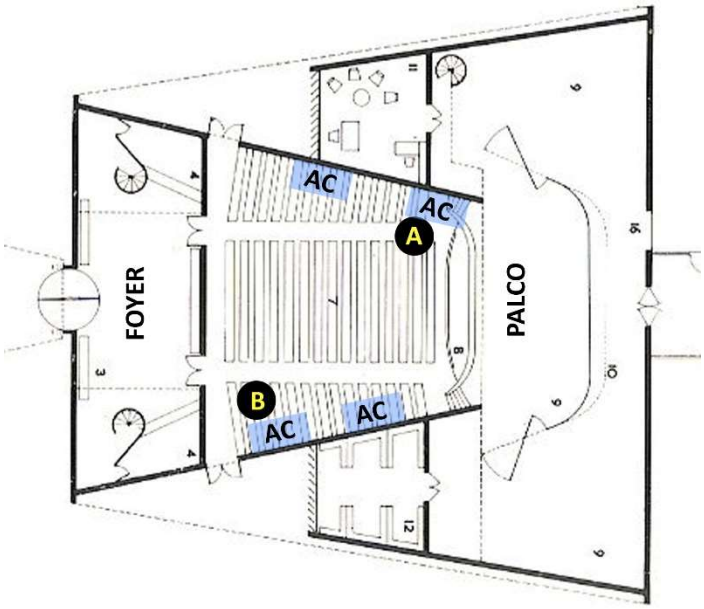
- **ETAPA B: MEDIÇÕES ACÚSTICAS**

Para analisar as caraterísticas acústicas atuais do teatro, foram realizadas medições de nível de pressão sonora e de respostas impulsivas. As medições foram realizadas com equipamentos classe 2 (calibrador e sonômetro). Durante a sessão de medição, foi verificado que o sistema de ar condicionado split piso-teto (4 unidades evaporadoras de 58mil btus) era bastante ruidoso e optou-se por medir o ruído residual a fim de determinar o nível de potência sonora da fonte para as medições das respostas impulsivas. O ruído residual foi medido em duas situações: com o sistema de ar ligado e desligado. O descritor acústico utilizado foi o L_{Aeq} (nível de pressão sonora equivalente ponderado em "A"), medido em dois pontos no auditório: um próximo ao palco e outro no fundo do auditório, com duração de 5 minutos cada. A Figura 3.11 apresenta os pontos A e B de medição de ruído de fundo no auditório. A Tabela 3.1 apresenta os valores obtidos para cada caso e local de medição.

O valor recomendado pela NBR 10152 – Acústica – Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações (ABNT, 2017) para o ruído residual no caso de um teatro deve ficar abaixo de 35 dB. Contudo, com o sistema de ar ligado, esse valor encontra-se aproximadamente 20 dB acima do recomendado. Por esse motivo, optou-se por realizar o levantamento das respostas ao impulso com a sala desocupada e com o sistema de ar-condicionado desligado, a fim de se obter melhor relação sinal/ruído nas medições.

É notável que o sistema de ar condicionado tipo split piso-teto do teatro deve ser alterado para um sistema dutado com uma casa de máquinas acusticamente isolada, considerando também o isolamento para a vibração das máquinas e o controle da velocidade de insuflamento do ar. Na Tabela 3.1, são mostrados os pontos de medição de ruído de fundo, bem como a localização das máquinas evaporadoras de ar condicionado.

FIGURA 3.11 – MEDIÇÕES DE SOM RESIDUAL DO AUDITÓRIO



FONTE: O AUTOR

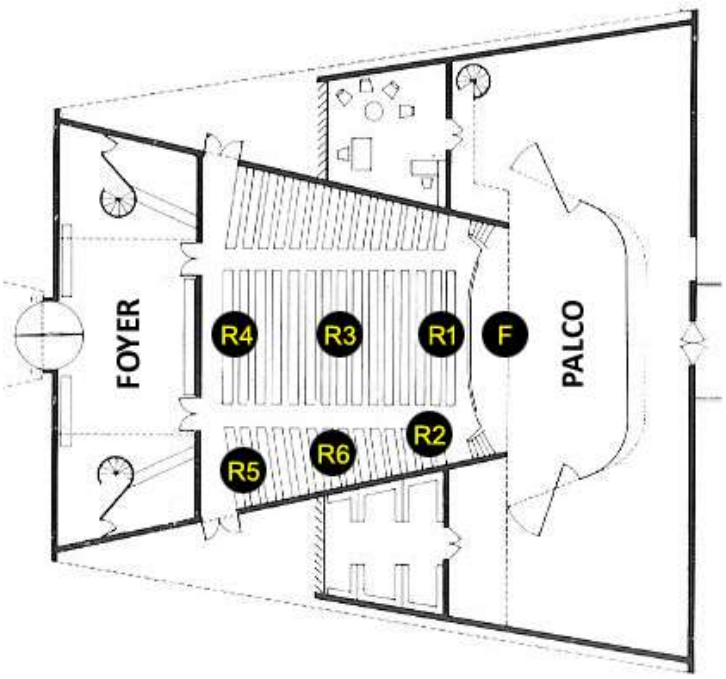
TABELA 3.1 – MEDIÇÕES ACÚSTICAS DE SOM RESIDUAL NO INTERIOR DO AUDITÓRIO

Ponto	Ar condicionado	Medições em dB(A)	NBR 10.152 (2017) em dB(A)
A	Desligado	36.0	30-35
A	Ligado	58.4	30-35
B	Desligado	37.7	30-35
B	Ligado	58.4	30-35

FONTE: O AUTOR

Para a medição de respostas impulsivas, tempo de reverberação e parâmetros acústicos no Teatro Armando Gonzaga, foram selecionados 6 locais no auditório (receptores R1 a R6), com a fonte sonora (F) no centro do palco, conforme a Figura 3.12. Os parâmetros acústicos foram obtidos em função dessas respostas ao impulso medidas, para cada par fonte-receptor, de acordo com a norma ISO3382-1 – Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas - Parte 1: Salas de espetáculos (ABNT, 2017). Foi utilizada a placa de áudio ASIO M-AUDIO M-TRACK, o *software* REW V5.20, microfone ECM-8000 e caixa de som Behringer modelo B212. Devido à indisponibilidade de fonte omnidirecional, foi utilizada fonte direcional. O sistema de medição foi calibrado utilizando calibrador classe 2. A fonte sonora foi ajustada para emitir nível de pressão sonora ponderada em "A" (Sound Pressure Level – SPL(A)) de 94 dB a uma distância de 1 metro do eixo da caixa de som. Dessa forma, com o som residual abaixo de 40 dB foi possível aferir uma faixa dinâmica de 54 dB para a medição das respostas impulsivas. Para a medição de tempo de reverberação, foram emitidos sinais sonoros de curva de senos, de 20Hz a 20kHz. Nestas medições de TR, o sistema de ar condicionado encontrava-se desligado, e em todas as medições internas a sala encontrava-se desocupada.

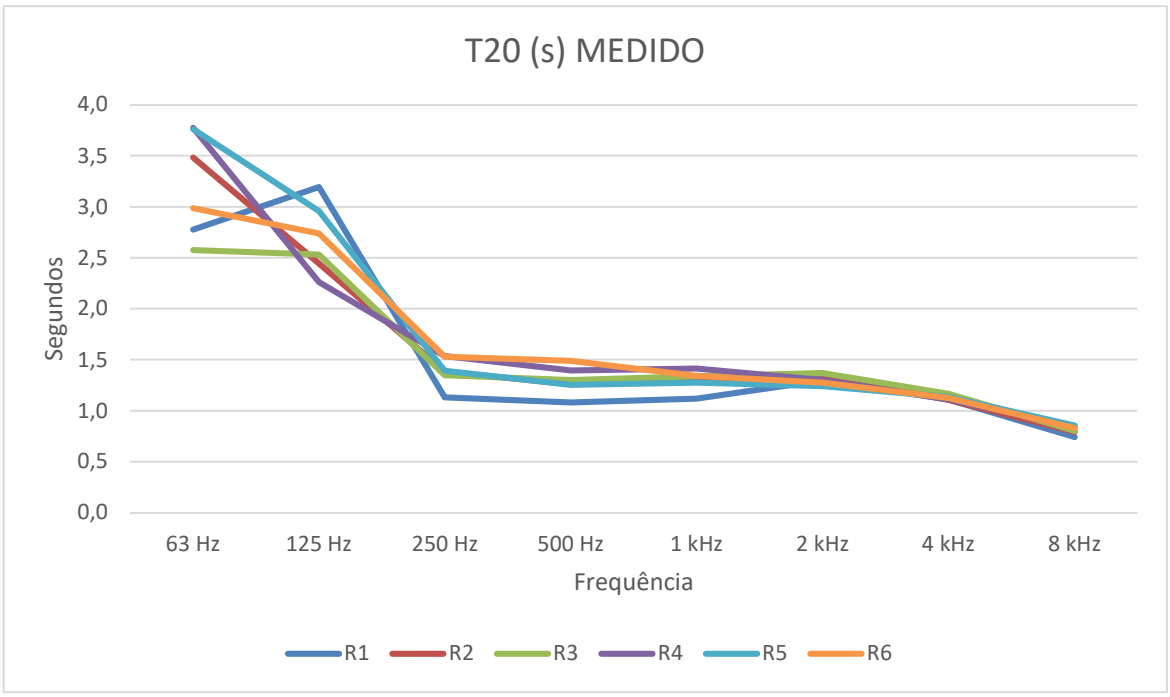
FIGURA 3.12 – MEDIÇÕES ACÚSTICAS DE TEMPO DE REVERBERAÇÃO DO AUDITÓRIO



FONTE: O AUTOR

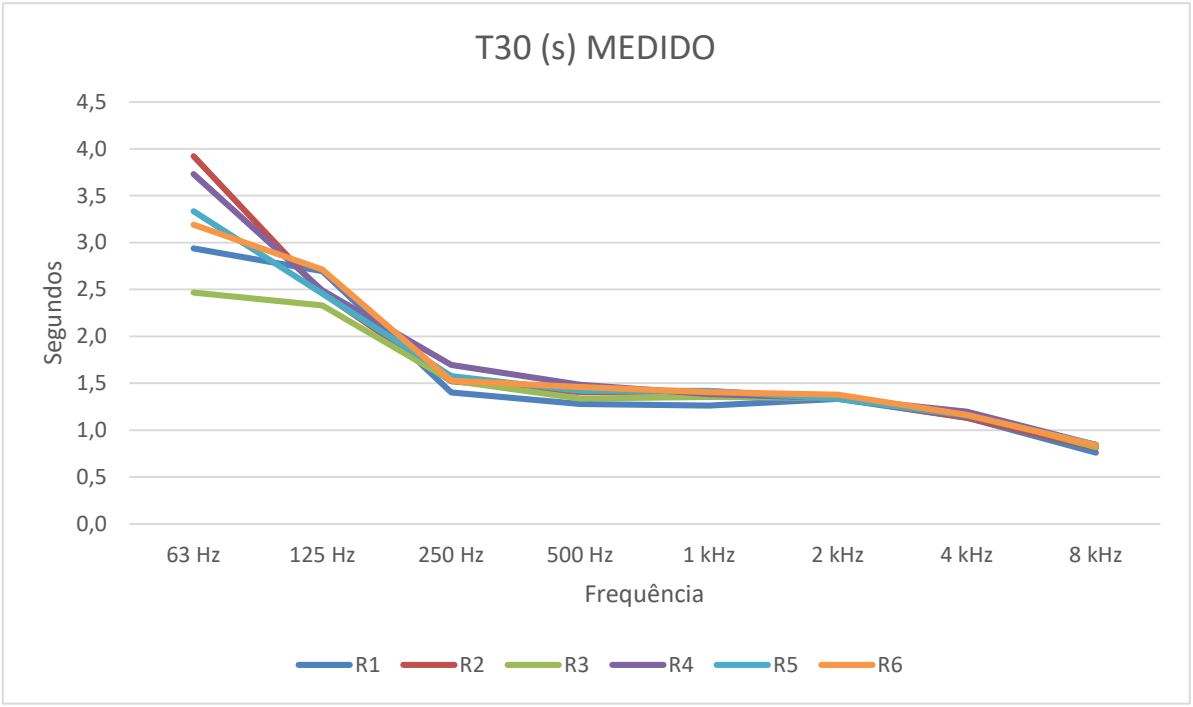
Os parâmetros acústicos apresentados nas medições são EDT (Tempo de Decaimento Inicial), T_{20}, T_{30}, C_{80} (Clareza), D_{50} (Definição) e TC (Tempo Central), em relação a cada faixa de frequência medida (63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8kHz). As Figuras 3.13 a 3.19 apresentam os gráficos para cada parâmetro acústico, nos 6 receptores. Os valores em tabela dos parâmetros acústicos obtidos nas 6 medições de TR feitas no auditório vazio, do ponto do Receptor 1 ao ponto do Receptor 6 são apresentados no Anexo III.

FIGURA 3.13 – PARÂMETRO T_{20} MEDIDO NOS 6 RECEPTORES, SALA NO ESTADO ATUAL



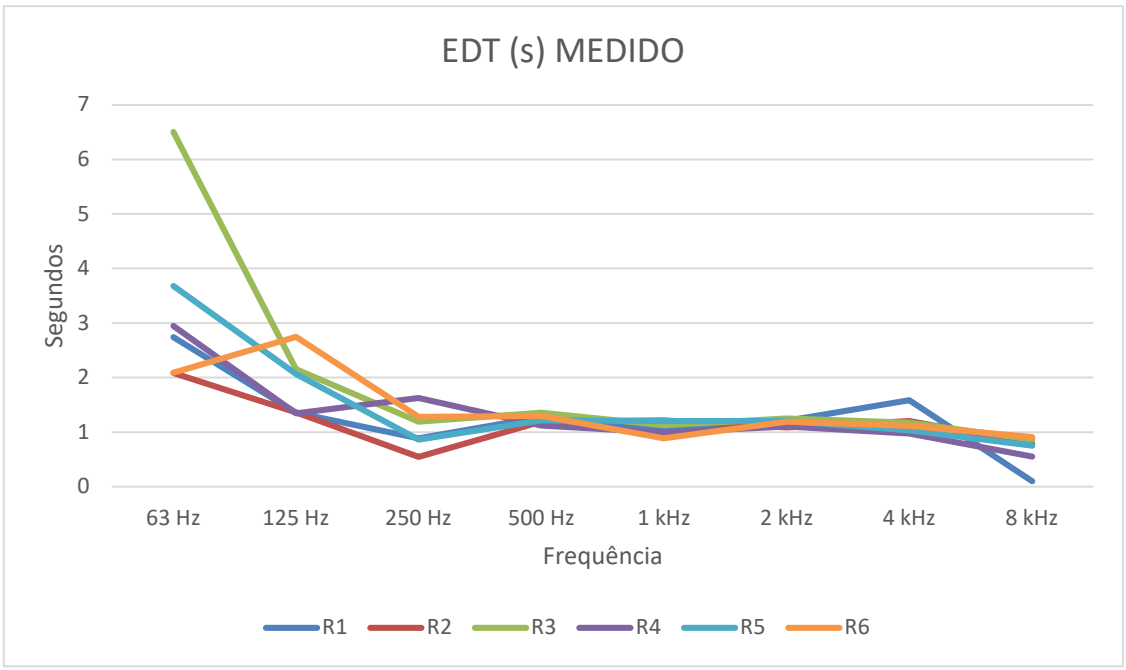
FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.14 – PARÂMETRO T_{30} MEDIDO NOS 6 RECEPTORES, SALA NO ESTADO ATUAL



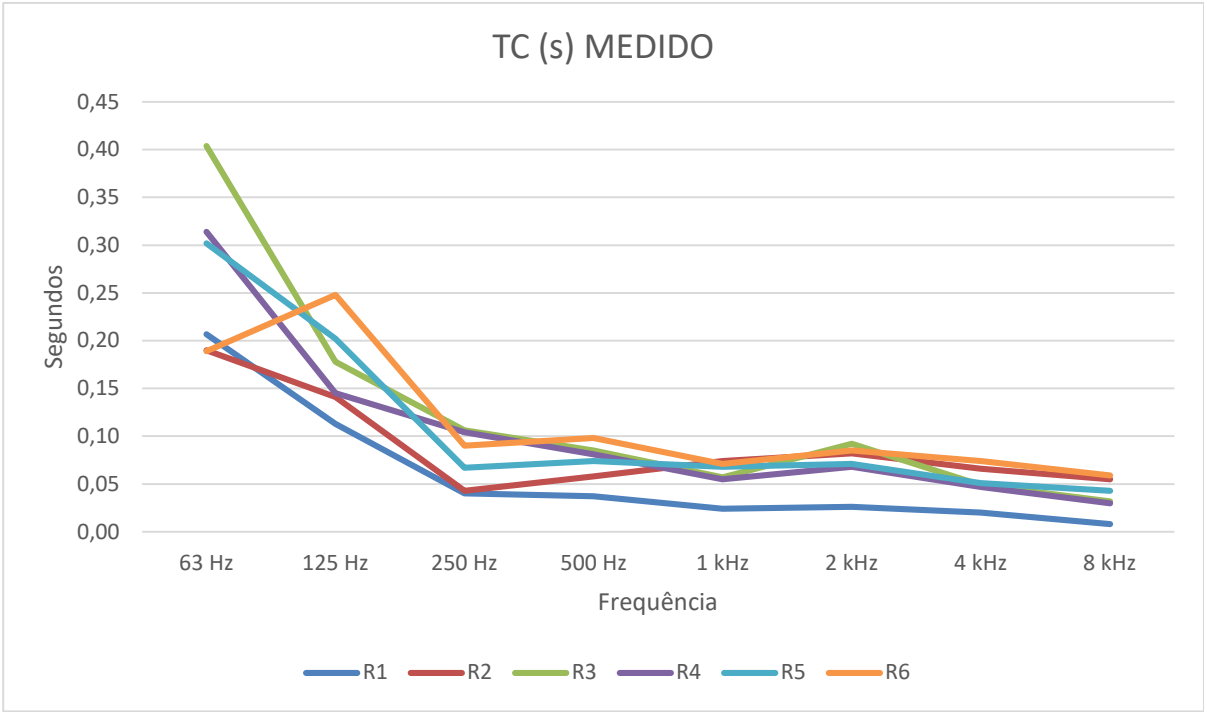
FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.15 – PARÂMETRO EDT MEDIDO NOS 6 RECEPTORES, SALA NO ESTADO ATUAL



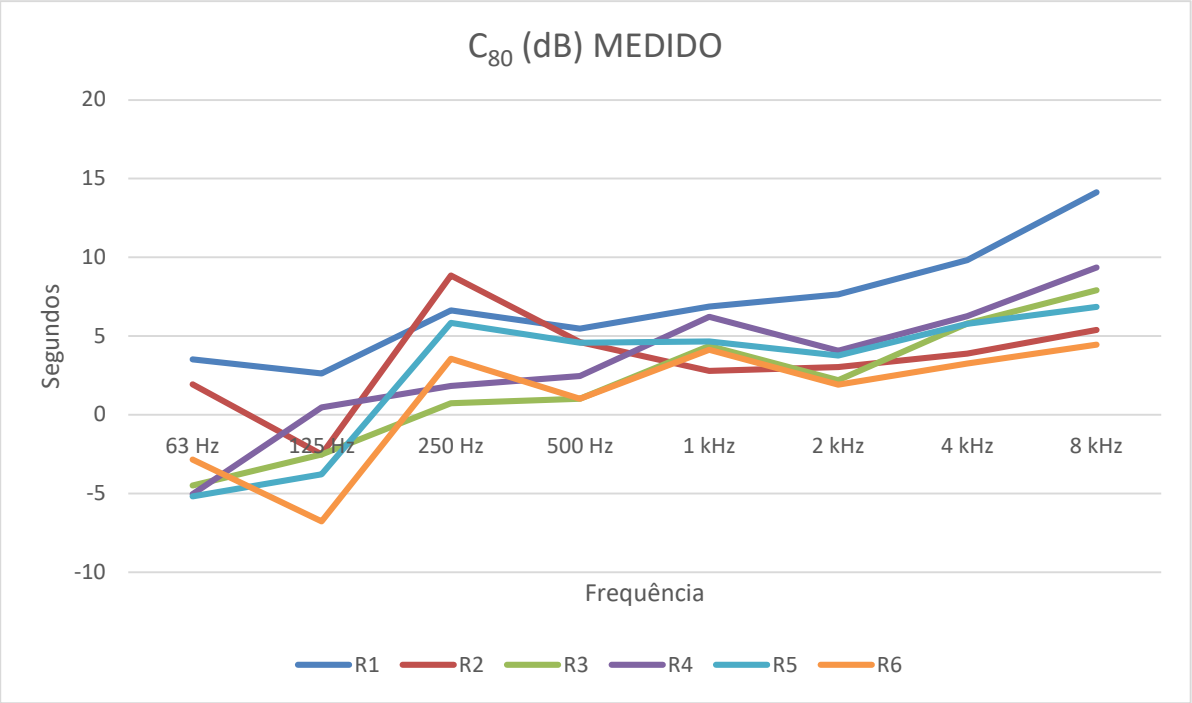
FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.16 – PARÂMETRO TC (TEMPO CENTRAL) MEDIDO NOS 6 RECEPTORES, SALA NO ESTADO ATUAL



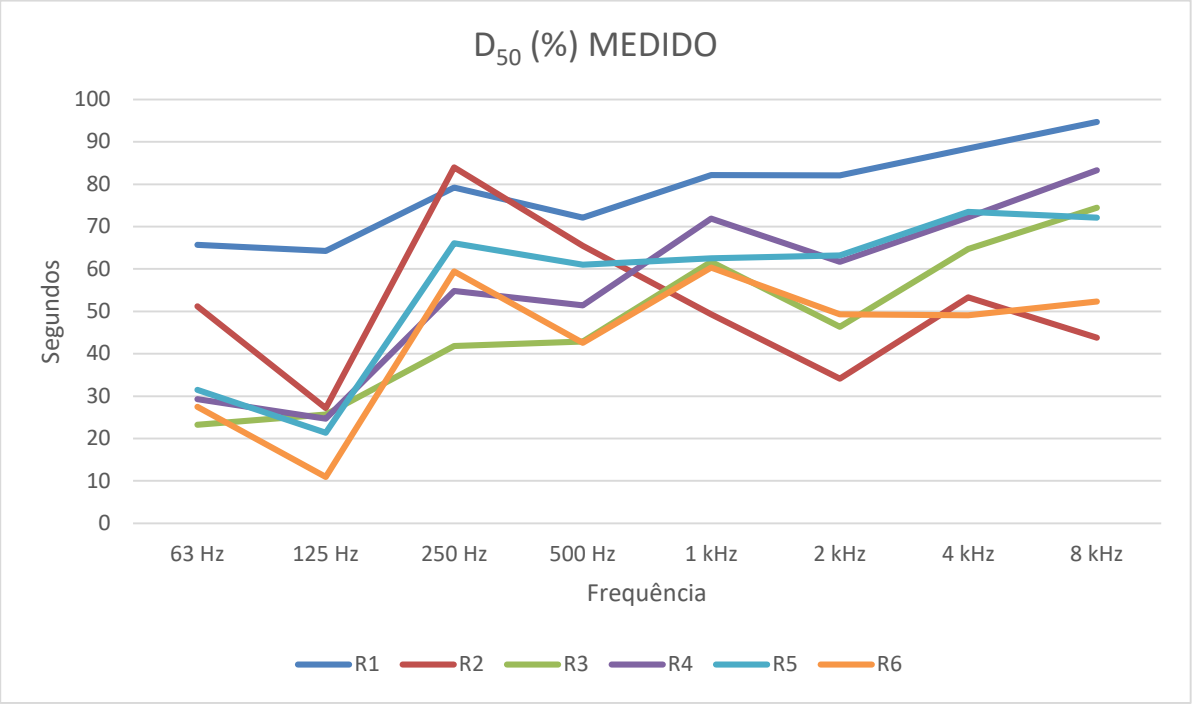
FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.17 – PARÂMETRO C_{80} (CLAREZA) MEDIDO NOS 6 RECEPTORES, SALA NO ESTADO ATUAL



FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.18 – PARÂMETRO D_{50} (DEFINIÇÃO) MEDIDO NOS 6 RECEPTORES, SALA NO ESTADO ATUAL



FONTE: O AUTOR

Analisando as Figuras 3.13 (T_{20}) e 3.14 (T_{30}) é possível notar que há pouca variação do tempo de reverberação entre os locais medidos, sendo o T_{30} aproximadamente constante em 1,5 s para a faixa de 250 Hz a 2 kHz, com grande elevação para as faixas de 63 Hz e 125 Hz, e decréscimo para as altas frequências.

Comportamento semelhante é observado para o parâmetro EDT (Figura 3.15), com maior variação nas faixas de 63 Hz e 250 Hz. Isso mostra que a reverberação é homogênea na plateia, com decaimento inicial de energia também similar.

O Tempo Central (Figura 3.16) também tem comportamento semelhante aos parâmetros T_{20}, T_{30} e EDT, sendo menor no R1 e maior no R6, sendo diretamente relacionado ao TR nesses 2 receptores.

Analisando os parâmetros C_{80} (Figura 3.17) e D_{50} (Figura 3.18) observa-se que o comportamento em cada receptor varia consideravelmente. No T_{20} e no T_{30}, pode-se observar que o decaimento no R4 é mais lento do que no R1, o que contribui para uma variação também dos parâmetros C_{80} e D_{50}. O R1, mais próximo à fonte, é o que possui maiores valores de Clareza e Definição. Os receptores R4 e R5 (mais distantes da fonte) possuem valores intermediários, sendo os receptores R3 (centro da plateia) e R6 (lateral/meio) os de menor valor. Isso mostra que o fator de clareza e a definição no centro da plateia são menores ou "piores" do que no fundo. Por outro lado, é esperado que os receptores próximos às paredes possuam um acréscimo nos valores de Clareza e Definição, devido à incidência de reflexões primárias, que elevam a energia na parte inicial da resposta ao impulso. Esse padrão é observado para os receptores R2, R5 e R6. Além disso, é possível visualizar a grande variação entre receptores na Definição, com diferenças de até 50%, como é o caso do R1 e R3 em 63 Hz, e R1 e R2 em 8kHz. Dessa forma, em função de uma variação ampla nos parâmetros Clareza e Definição, observa-se que há uma necessidade de adequação acústica no teatro.

Em uma situação de projeto, procura-se fazer com que os assentos possuam um coeficiente de absorção aproximado de uma pessoa. Isso evita a necessidade da presença de público durante a medição e a variação na ocupação do local não trará consequências significativas para o desempenho acústico. Como o teatro não foi medido com a presença de plateia, e os assentos são de couro, cujas características de absorção diferem das de um assento ocupado, os tempos de reverberação medidos e os ideais, segundo as normas, não são comparáveis. Como alternativa, utilizam-se programas de simulação acústica, que possibilitam avaliar a influência da taxa de ocupação na plateia.

- **ETAPA 1: MODELO GEOMÉTRICO**

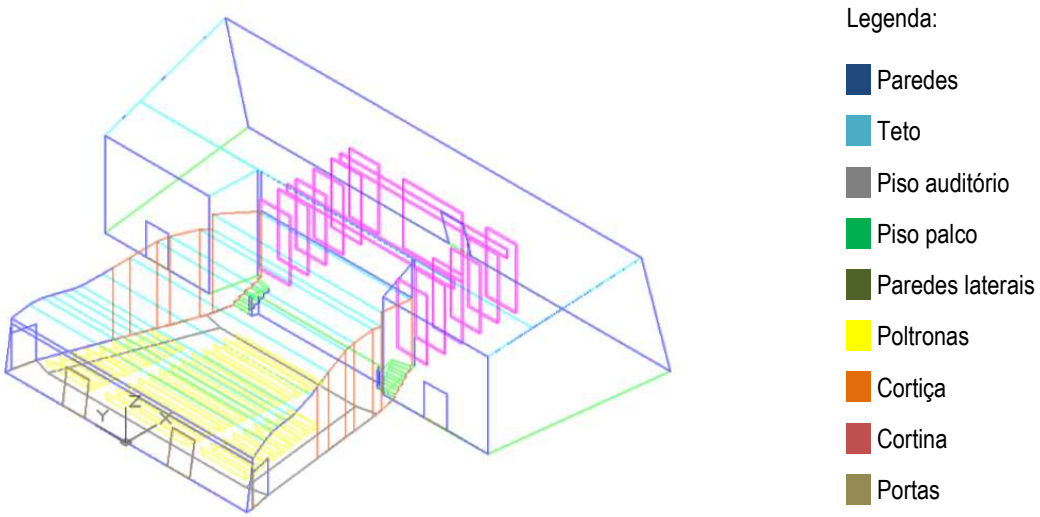
O modelo geométrico inicial, usado para validação, foi construído a partir dos desenhos em Autocad. Todas as superfícies internas do auditório (paredes, piso, teto, palco e painéis acústicos) foram transformados em planos (através do comando *3dpolyline* do Autocad*)* obedecendo à lei de Ampère, onde todas as faces devem ser voltadas para o interior do recinto.

Foram definidas as seguintes camadas (*layers*) para o modelo: emboço da parede, emboço do teto, cortiça das duas paredes próximas ao palco, piso de madeira do palco, piso vinílica do auditório, poltronas de couro sintético vazias, cortinas no palco, e porta de madeira nos quatro acessos laterais da sala e nas coxias do palco. Cada plano foi associado a uma camada, correspondente a um material. Cada camada/material teve suas características

acústicas posteriormente definidas no simulador. Os elementos fora da sala interna não influenciam a simulação acústica computacional, portanto não foram modelados.

Na Figura 3.19 pode-se ver o modelo feito no *software* Autocad, onde cada camada corresponde a uma cor / material.

FIGURA 3.19 – MODELO TRIDIMENSIONAL DA SITUAÇÃO ATUAL NO *SOFTWARE* AUTOCAD



FONTE: O AUTOR

- **ETAPA 2: EXPORTAÇÃO PARA O SIMULADOR ACÚSTICO**

Para simulações no BRASS (*Brazilian Room Acoustic Simulator*), *software* usado neste trabalho, o arquivo em Autocad deve ser salvo em formato .dxf. No processo de exportação para o simulador, automaticamente, as informações geométricas (planos das superfícies internas) e as camadas (*layers*) são transformadas em arquivo de texto (.txt).

- **ETAPA 3: ASSOCIAÇÃO DE DADOS GEOMÉTRICOS E ACÚSTICOS**

No BRASS, foram associados os coeficientes de absorção para cada material correspondente a uma camada no arquivo .txt do BRASS, em nove frequências (63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k, 8k, 16kHz), de acordo com os dados obtidos da NBR 12.179 (1992) e de Carvalho (2010). Para os valores das bandas não encontrados nas referências (63Hz, 8kHz e 16kHz) foram repetidos os valores das bandas adjacentes.

A inserção da(s) fonte(s) sonora(s) e do(s) receptor(es) no *software* BRASS é realizada a partir do sistema de coordenadas x, y, z. Devem ser também definidas as características de direcionalidade das fontes e dos receptores. Os receptores foram definidos com captação omnidirecional (conforme microfone utilizado), enquanto a fonte sonora foi definida com a direcionalidade de uma caixa acústica de dois alto-falantes, todos na altura de 1,20m, conforme estabelecido na ISO3382-1 (ABNT, 2017).

A Tabela 3.2 apresenta os materiais existentes na sala utilizados no modelo para validação no BRASS, a referência

onde foram encontradas estas informações, os locais onde se encontram na sala e seus respectivos coeficientes de absorção em cada faixa de frequência.

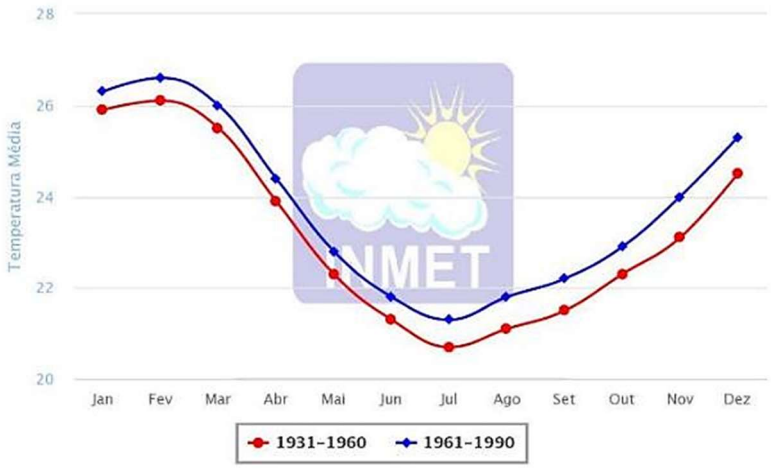
TABELA 3.2 – MATERIAIS EXISTENTES, REFERÊNCIA, LOCAL DE APLICAÇÃO E COEFICIENTES DE ABSORÇÃO NAS DIFERENTES FAIXAS DE FREQUÊNCIA

Material	Referência	Local	125	250	500	1000	2000	4000
Cortiça 8mm	Carvalho (2010)	Paredes	0,08	0,23	0,37	0,34	0,30	0,47
Cortina	NBR 12.179 (1992)	Palco	0,25	0,33	0,40	0,50	0,60	0,60
Emboço liso	NBR 12.179 (1992)	Paredes	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06
Emboço áspero	NBR 12.179 (1992)	Teto	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Piso madeira	Carvalho (2010)	Palco	0,20	0,15	0,13	0,12	0,09	0,06
Piso vinílico	NBR 12.179 (1992)	Piso aud.	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Poltronas couro	Carvalho (2010)	Auditório	0,09	0,12	0,15	0,15	0,11	0,07
Porta madeira	NBR 12.179 (1992)	Aud. / palco	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10

FONTE: O AUTOR

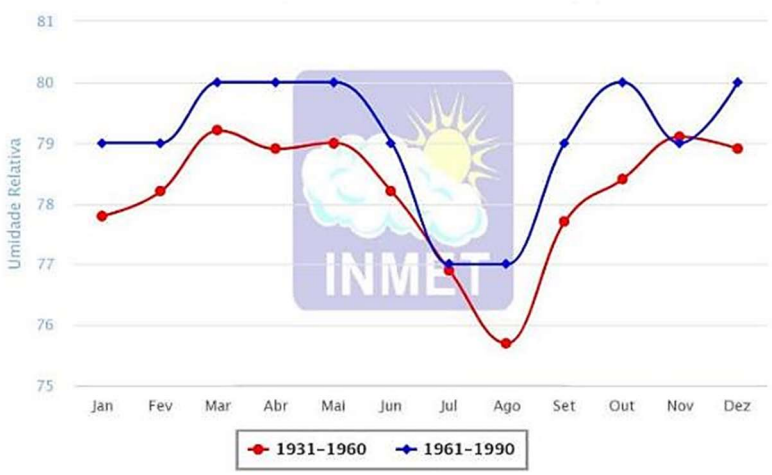
Como os planos feitos na Etapa 1 estão associados às camadas, cada plano ficou associado a um material, com coeficientes de absorção específicos, em cada uma das nove faixas de frequência. Outros dados devem ser inseridos no *software*, como temperatura, umidade e pressão. De acordo com os dados do INMET para o Rio de Janeiro (Figuras 3.20 e 3.21), a temperatura a ser utilizada no BRASS é de 21,5°C e a umidade 77%. Para a pressão foi considerado 1Pa.

FIGURA 3.20 – TEMPERTURA MÉDIA POR MÊS (°C), CIDADE DO RIO DE JANEIRO



FONTE: INMET, 2020

FIGURA 3.21 – UMIDADE RELATIVA MÉDIA POR MÊS (%), CIDADE DO RIO DE JANEIRO

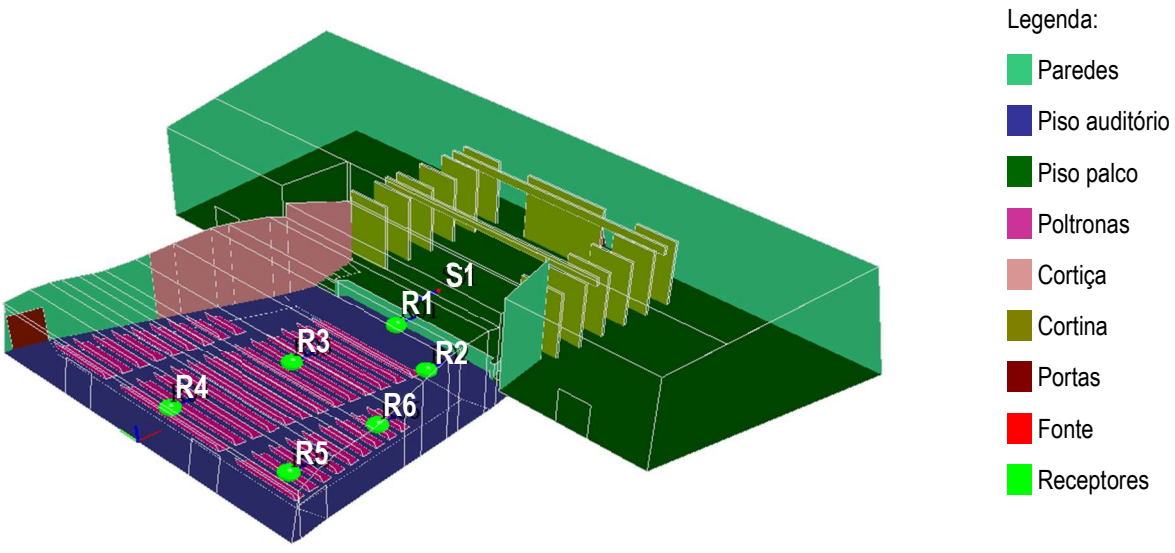


FONTE: INMET, 2020

A potência da fonte foi ajustada para produzir um nível de pressão sonora (NPS) de 94 dB a um metro de distância, no eixo da caixa, que ficou direcionado para o centro geométrico da sala, conforme o procedimento de medição. A simulação foi realizada emitindo 20.000 raios acústicos da fonte, valor adequado para as características da sala (Vorländer, 1988). A versão atual do BRASS não conta com método para cálculo da difusão. Portanto, foram utilizados apenas os coeficientes de absorção, sem considerar o espalhamento. O formato do arquivo utilizado para a fonte sonora é *omini.daff* (Site Opendaff, 2020).

A Figura 3.13 apresenta a visualização do modelo tridimensional da sala no BRASS, em que cada material está associado a uma cor, a fonte sonora S01 está representada como um ponto vermelho e os receptores R1 a R6 representados por esferas verdes. A direção do eixo da fonte está representada numa linha azul.

FIGURA 3.22 – MODELO TRIDIMENSIONAL DA SALA EXISTENTE NO *SOFTWARE* BRASS



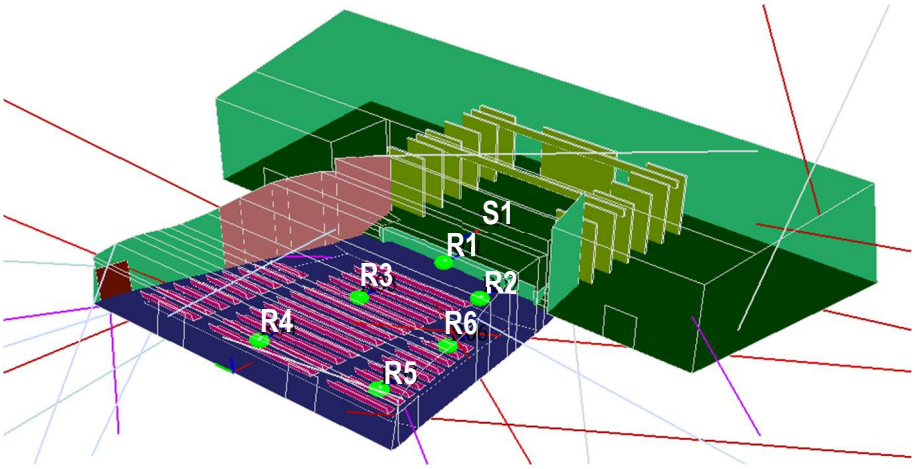
FONTE: O AUTOR

- **ETAPA 4: SIMULAÇÃO ACÚSTICA**

Um fator que influencia nos resultados das simulações é a escolha dos materiais. Por exemplo, como existem diferentes tipos de cortinas e pisos de madeira nas referências, com diferentes coeficientes de absorção α por frequência, no estudo de caso foi necessário realizar um ajuste para avaliar qual dos tipos de materiais correspondiam aos existentes na sala real.

Outro recurso apresentado pelo BRASS é a verificação dos raios perdidos (*lost-rays*), que são os raios que de alguma forma saem do recinto, devido à falta de planos ou defeitos na geometria desenhada. Alguns planos do modelo tiveram que ser ajustados de maneira a diminuir ao máximo o número de raios perdidos, de forma a não interferir nos resultados de simulação. A configuração final é apresentada na Figura 3.14, com poucos raios perdidos, que nesse caso estão passando por algumas linhas de encontro de diferentes planos.

FIGURA 3.23 – RAIOS PERDIDOS NA SIMULAÇÃO



FONTE: O AUTOR

- **ETAPA 5: RESULTADOS DA SIMULAÇÃO**

A partir das respostas impulsivas medidas ou simuladas, é possível calcular os parâmetros de qualidade acústica (T_{60}, T_{30}, T_{20}, TC, C_{80}, D_{50}, EDT, SPL e SPL(A)) e realizar uma comparação entre os resultados de medição e de simulação. No estudo de caso, todos os parâmetros foram calculados sobre as respostas impulsivas, utilizando o pacote de rotinas de acústica fornecidos pelo Instituto de Acústica Técnica (ITA-Aachen) para o *software* Matlab (Berzborn *et al.*, 2017). Assim, evita-se a possibilidade de usar diferentes algoritmos para o cálculo dos parâmetros entre as respostas medidas e as simuladas (Karjalainen *et al.*, 2002).

- **ETAPA C: VALIDAÇÃO DO MODELO**

Para salas existentes, os resultados simulados poderão ser comparados às medições de Tempo de Reverberação realizadas no local. Os valores de som residual medidos devem ser usados como referência para definir o melhor parâmetro e avaliação (T_{60}, T_{30} ou T_{20}), conforme visto no Capítulo 2. Caso os valores medidos e simulados apresentem valores semelhantes, o modelo estará validado (Hak *et al.*, 2012). Caso contrário, o modelo deverá

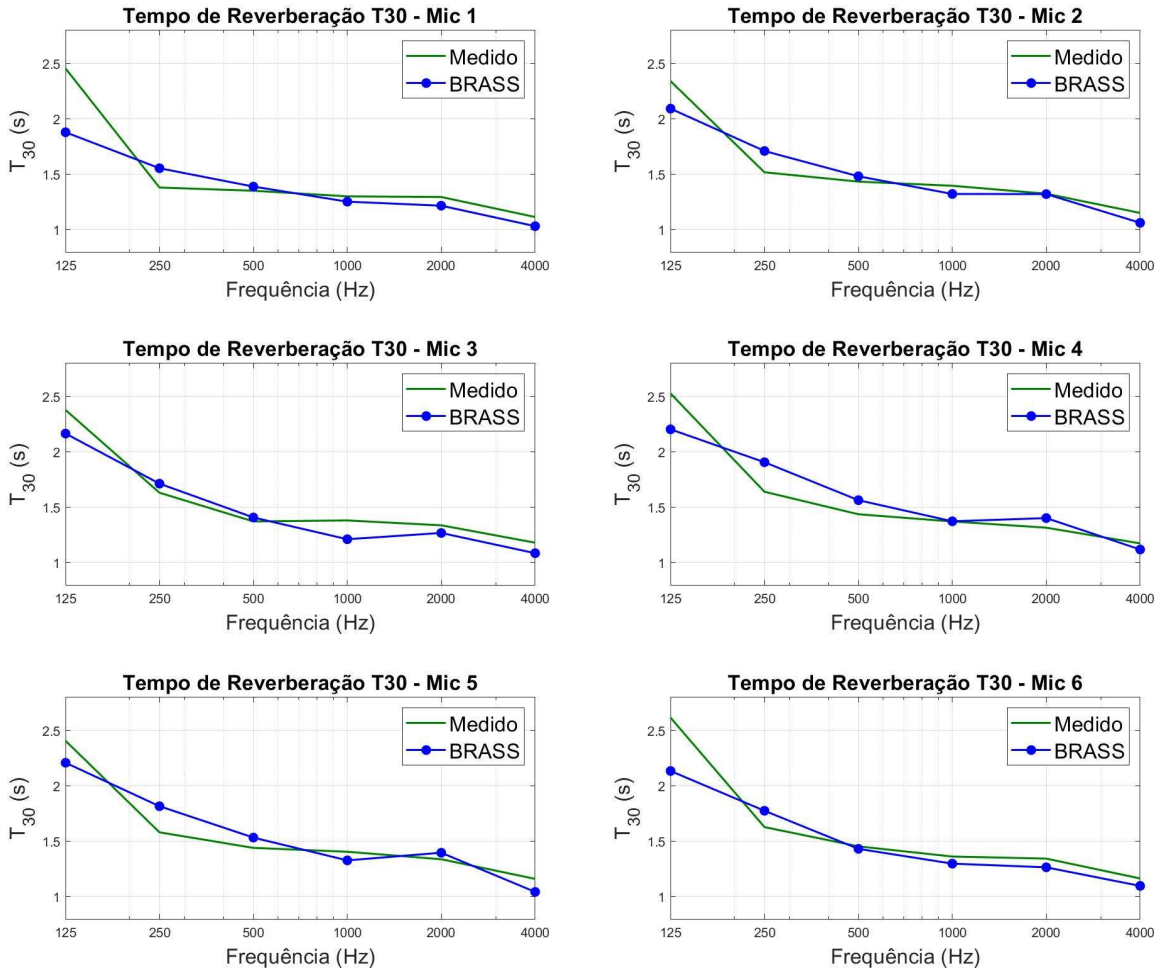
ser ajustado, retornando à ETAPA 1 (modelo geométrico), em que elementos referentes à forma da sala (planos) serão corrigidos, ou à ETAPA 3 (associação de dados geométricos e acústicos), na qual serão corrigidos os materiais e suas correspondentes curvas de absorção.

No estudo de caso, após os ajustes dos materiais e respectivos coeficientes de absorção, os resultados do Tempo de Reverberação T_{30} obtidos por simulação e por medição ficaram muito próximos principalmente nas médias e altas frequências, enquanto nas baixas frequências houve um desvio maior. Isso ocorre devido à menor precisão do método de traçado de raios para baixas frequências, por não considerar os efeitos ondulatórios. Para as médias e altas frequências os valores simulados de T_{30} ficaram, na maioria dos casos, dentro da faixa de ±5% da "diferença apenas perceptível" (*Just Noticeable Difference – JND*) para o Tempo de reverberação (Hak *et al*, 2012).

Sendo o Tempo de Reverberação T_{30} o principal parâmetro acústico trabalhado, considerou-se que o modelo acústico se encontra validado e representativo do cenário atual do Teatro.

A Figura 3.24 apresenta os gráficos com os valores medidos e simulados, para o Tempo de Reverberação T_{30} nos 6 receptores.

FIGURA 3.24 – TEMPO DE REVERBERAÇÃO T_{30} – MEDIDO X SIMULADO

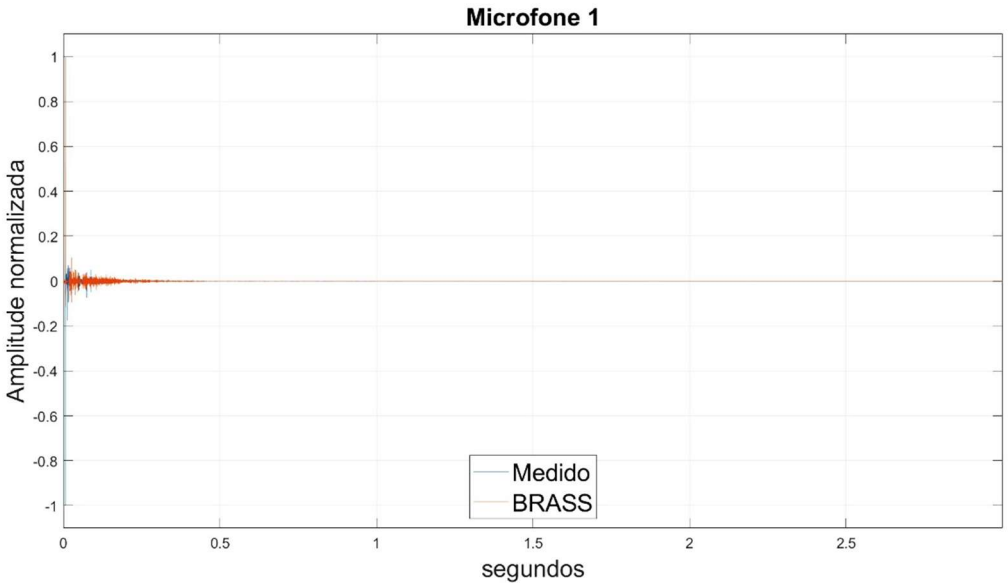


FONTE: O AUTOR

Nos gráficos de Tempo de Reverberação pode ser visto que para as médias e altas frequências (500, 1k, 2k, 4kHz) os valores simulados ficaram muito próximos dos valores medidos, todos os valores simulados em 125 Hz ficaram abaixo dos valores medidos, já os valores simulados em 250 Hz ficaram ligeiramente superiores aos valores medidos.

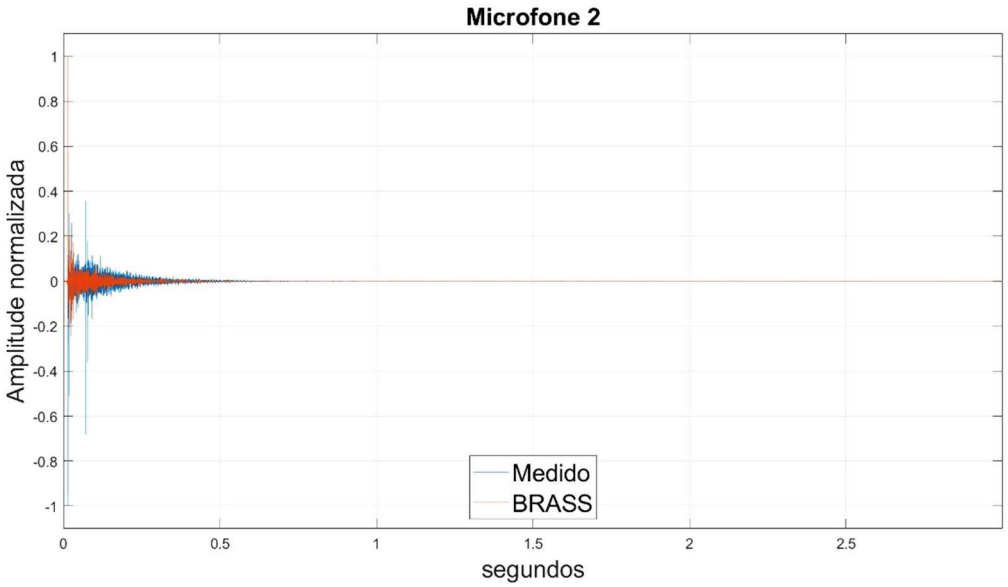
As Figuras 3.25 a 3.30 apresentam as Respostas ao Impulso medidas e simuladas para os 6 receptores.

FIGURA 3.25 – RESPOSTA AO IMPULSO - RECEPTOR 1



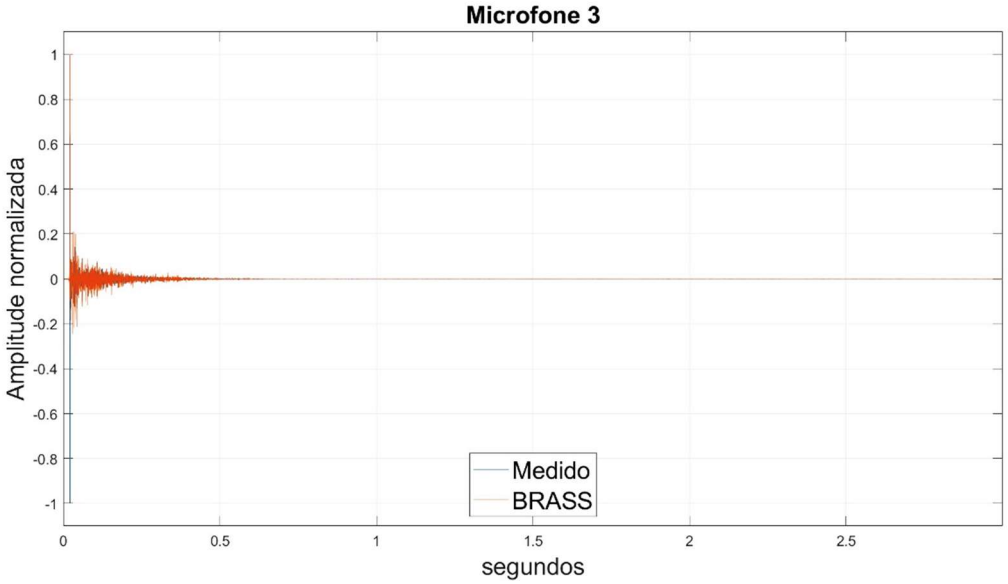
FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.26 – RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 2



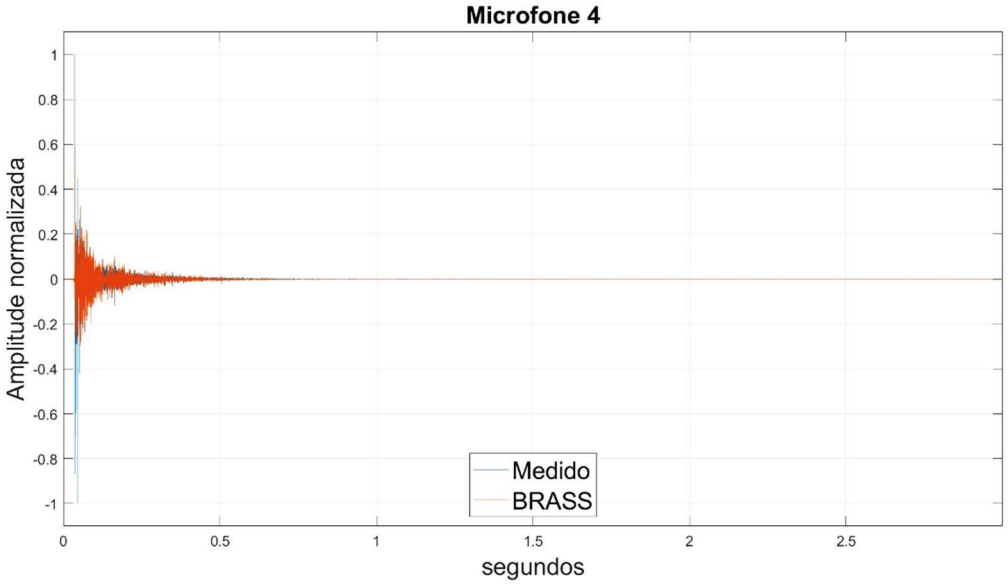
FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.27 – RESPOSTA AO IMPULSO - RECEPTOR 3



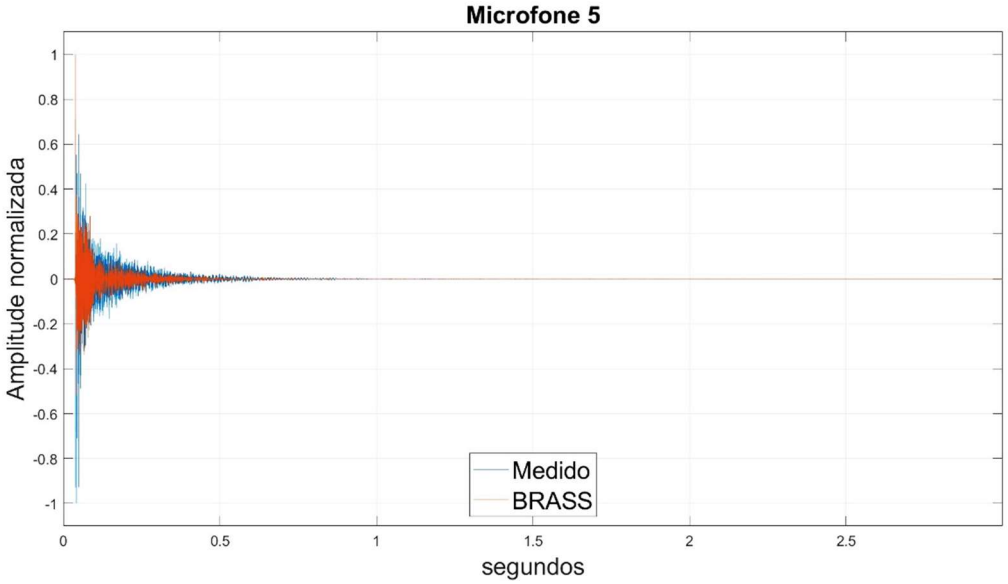
FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.28 – RESPOSTA AO IMPULSO - RECEPTOR 4



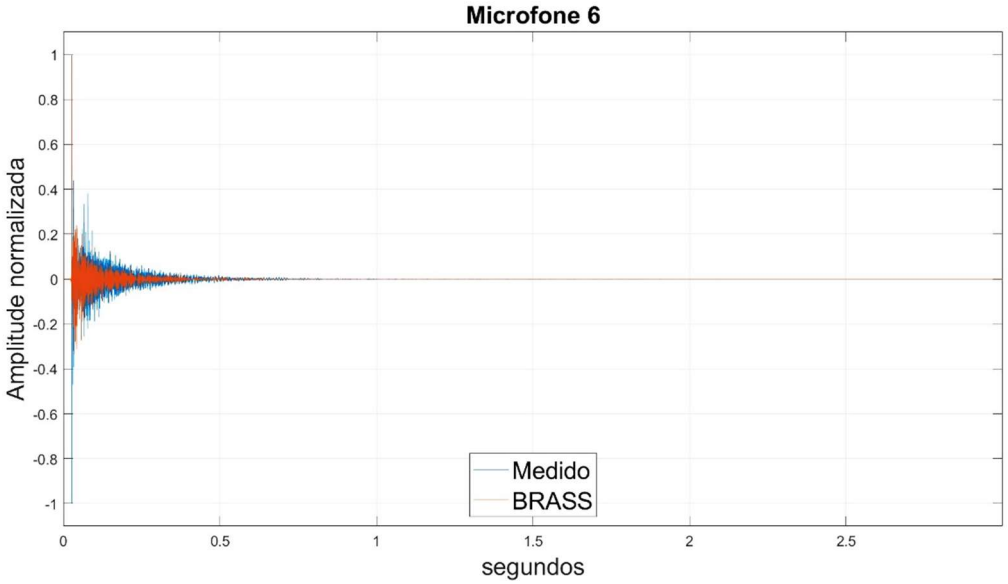
FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.29 – RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 5



FONTE: O AUTOR

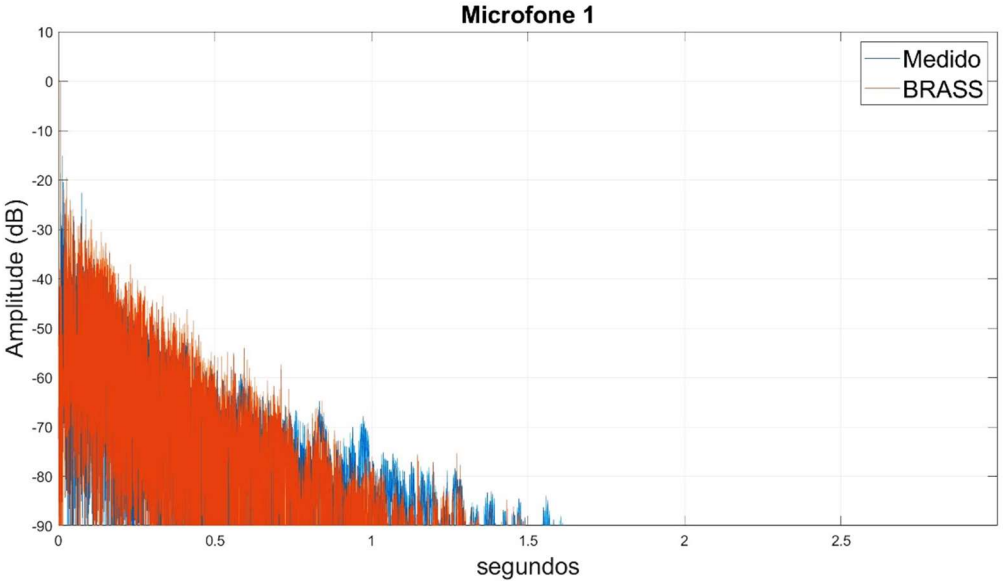
FIGURA 3.30 – RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 6



FONTE: O AUTOR

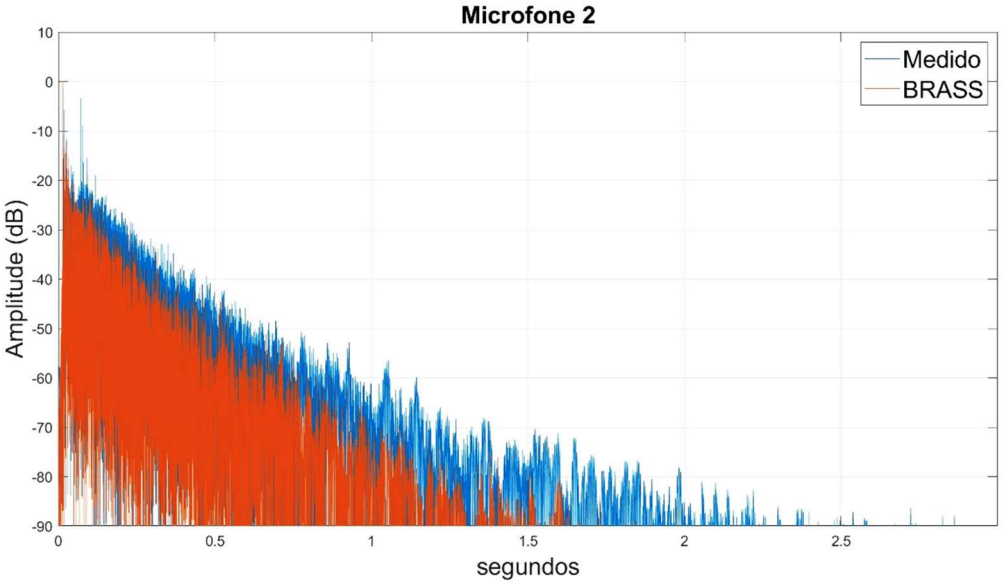
As Figuras 3.31 a 3.36 apresentam a comparação dos módulos das Respostas ao Impulso medida e simulada para os 6 receptores, em dB (módulo, ref. 20µPa), podendo ser observado o mesmo padrão de decaimento global de energia nos receptores R1, R3 e R4, que estão no eixo longitudinal do auditório. Os receptores R2, R5 e R6 tiveram um padrão de decaimento ligeiramente maior na simulação do que na medição.

FIGURA 3.31 – MÓDULO DA RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 1



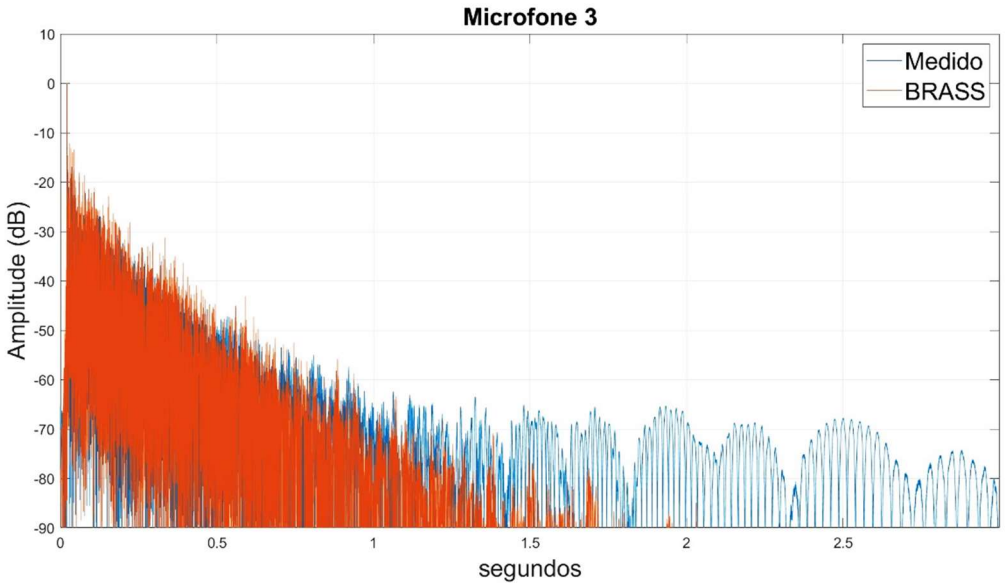
FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.32 – MÓDULO DA RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 2



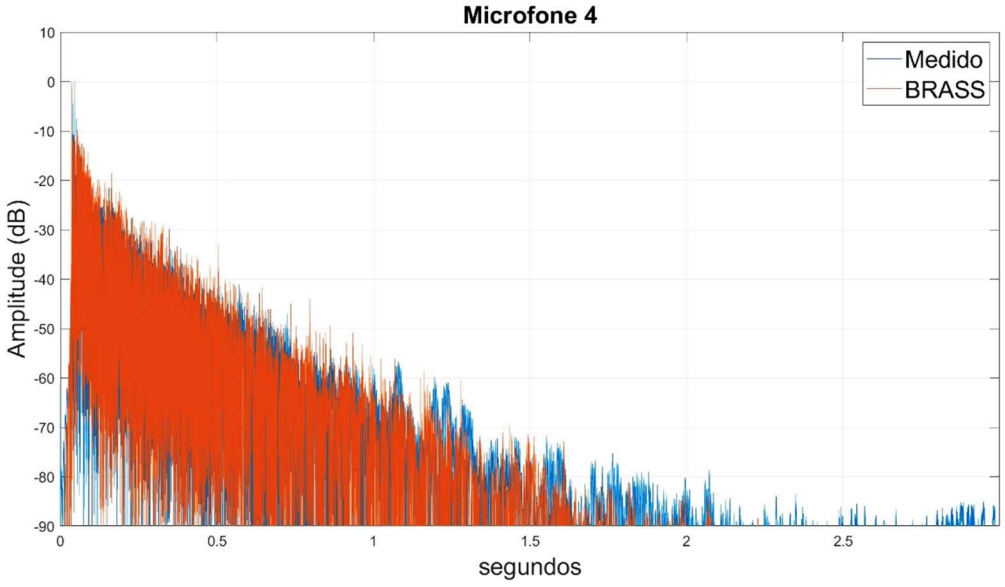
FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.33 – MÓDULO DA RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 3



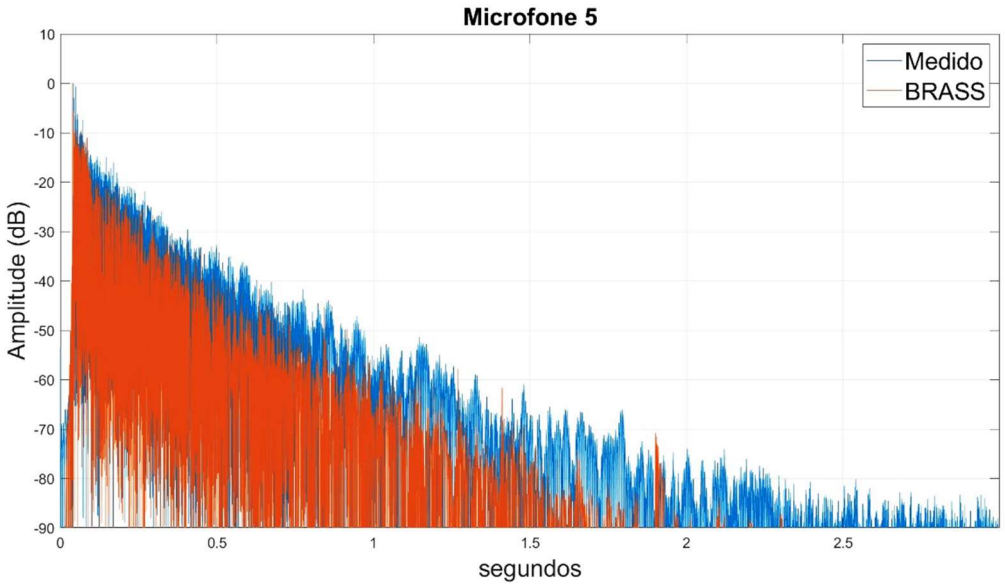
FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.34 – MÓDULO DA RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 4



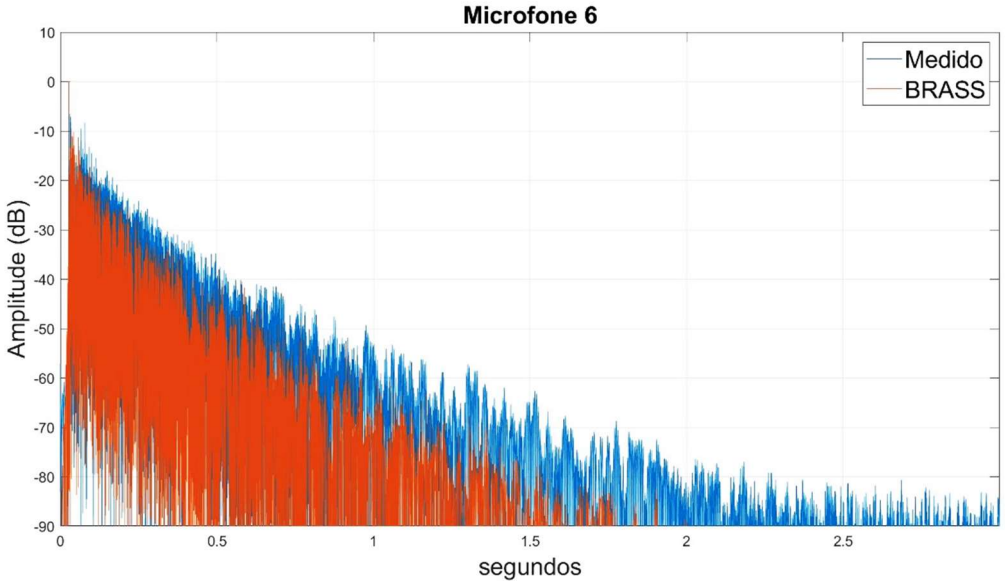
FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.35 – MÓDULO DA RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 5



FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.36 – MÓDULO DA RESPOSTA AO IMPULSO – RECEPTOR 6

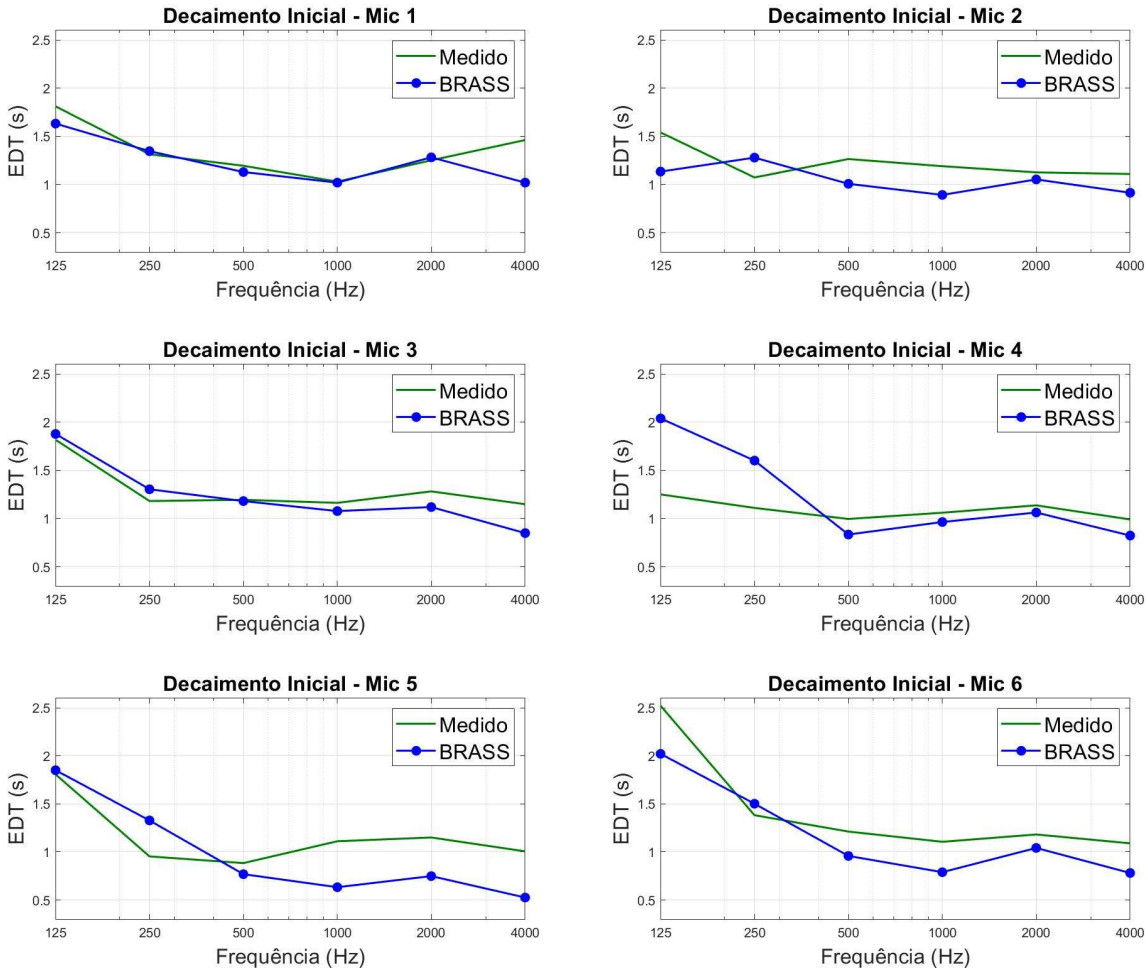


FONTE: O AUTOR

Nos gráficos de resposta ao impulso, é possível notar que as simulações que tiveram valores mais próximos das medições foram nos microfones 1, 3 e 4, no eixo longitudinal do auditório, alinhados com a fonte sonora. Já os valores das simulações nos receptores 2, 5 e 6 ficaram mais divergentes dos valores nas medições, sendo estes 3 pontos fora do eixo longitudinal do auditório.

A Figura 3.37 apresenta os gráficos com os valores medidos e simulados para o EDT nos 6 receptores.

FIGURA 3.37 – EDT – MEDIDO X SIMULADO

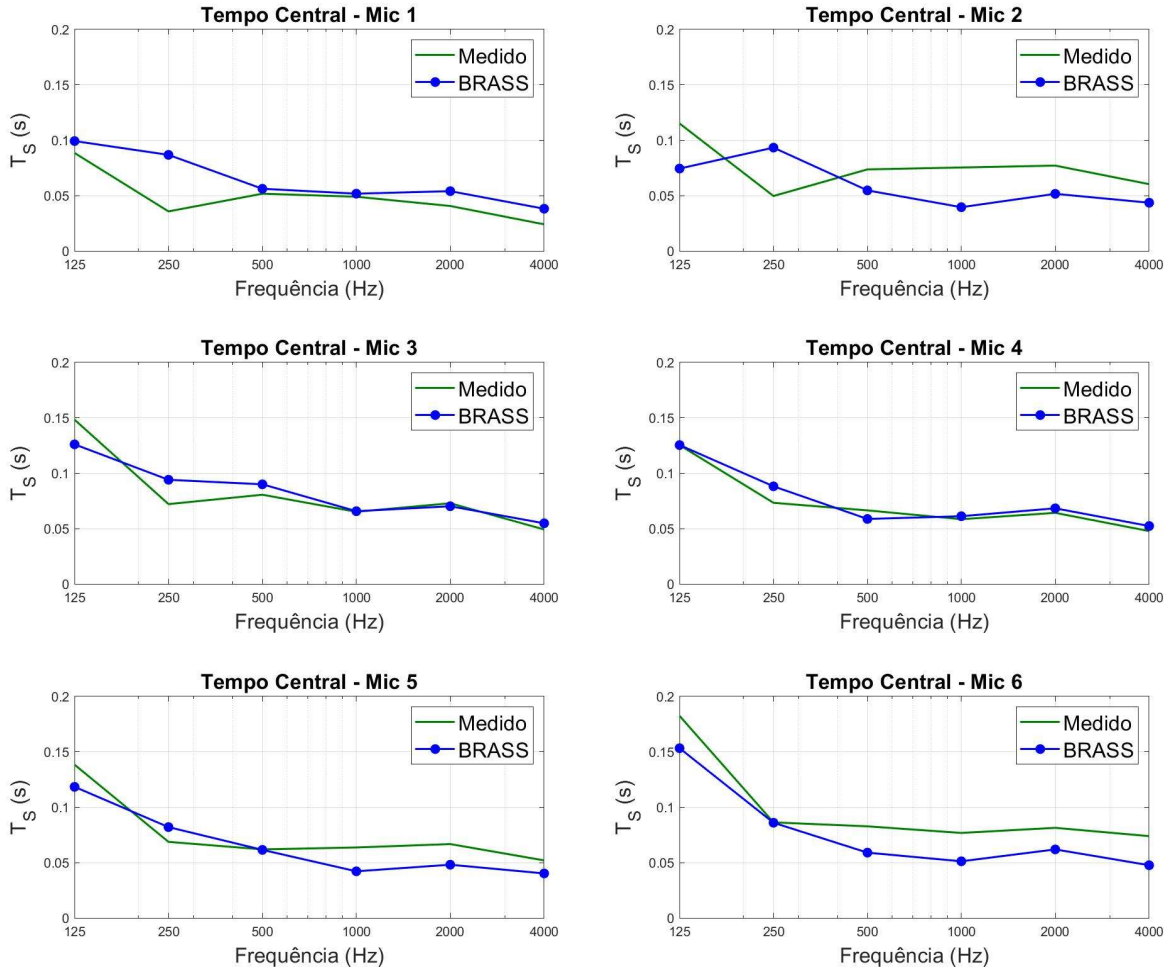


FONTE: O AUTOR

Neste parâmetro acústico, as simulações mais próximas das medições ocorreram nos Receptores 1 e 3, que ficam no eixo longitudinal do auditório e mais próximos ao palco.

A Figura 3.38 apresenta os gráficos com os valores medidos e simulados para o TC nos 6 receptores.

FIGURA 3.38 – TC – MEDIDO X SIMULADO

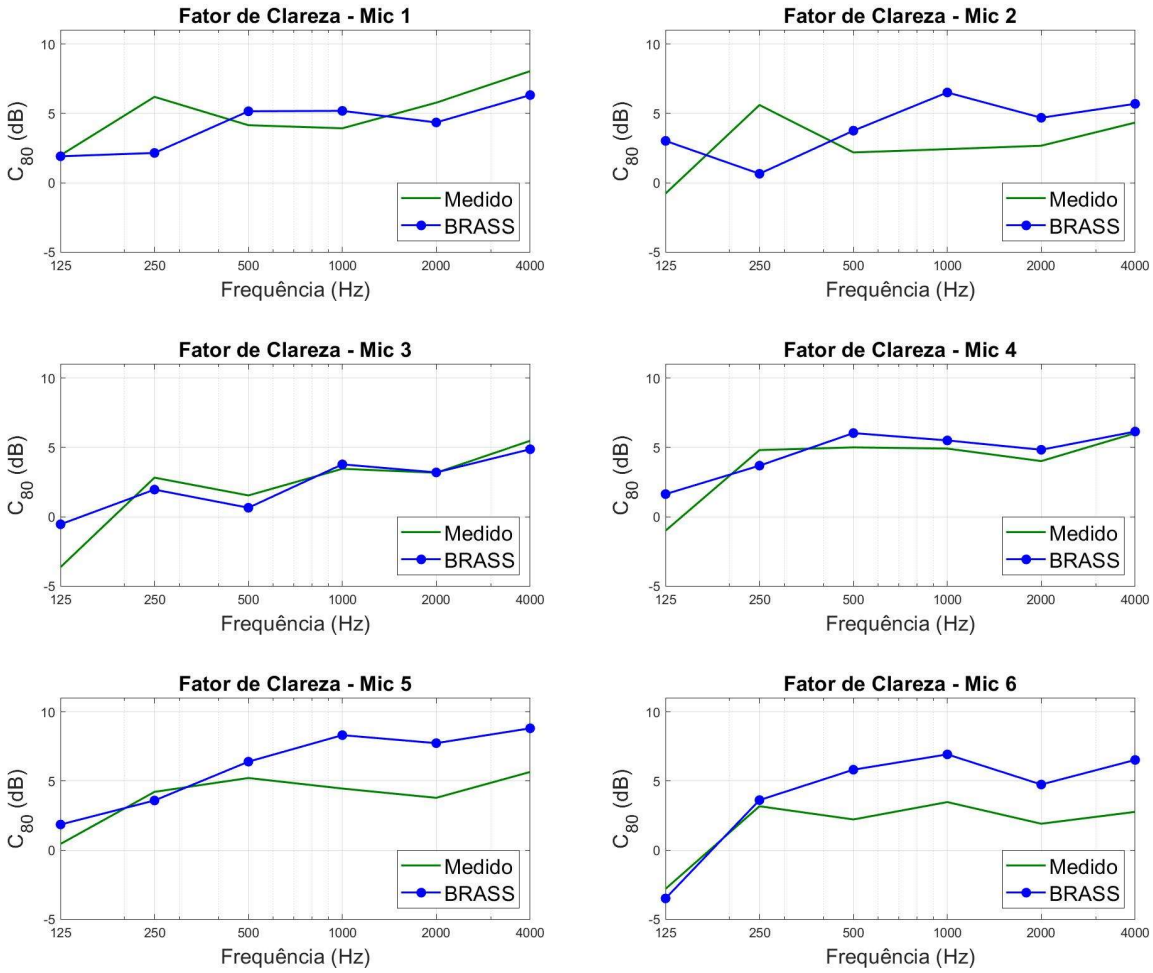


FONTE: O AUTOR

Nos gráficos de Tempo Central, os resultados das simulações mais próximos das medições foram nos Receptores 3 e 4, que ficam no eixo central do auditório. O resultado das simulações menos próximo das medições foi no Receptor 2. No Receptor 6, os valores simulados ficaram abaixo dos medidos em todas as frequências, exceto em 250Hz.

A Figura 3.39 apresenta os gráficos com os valores medidos e simulados para o Fator de Clareza nos 6 receptores.

FIGURA 3.39 – C_{80} – MEDIDO X SIMULADO

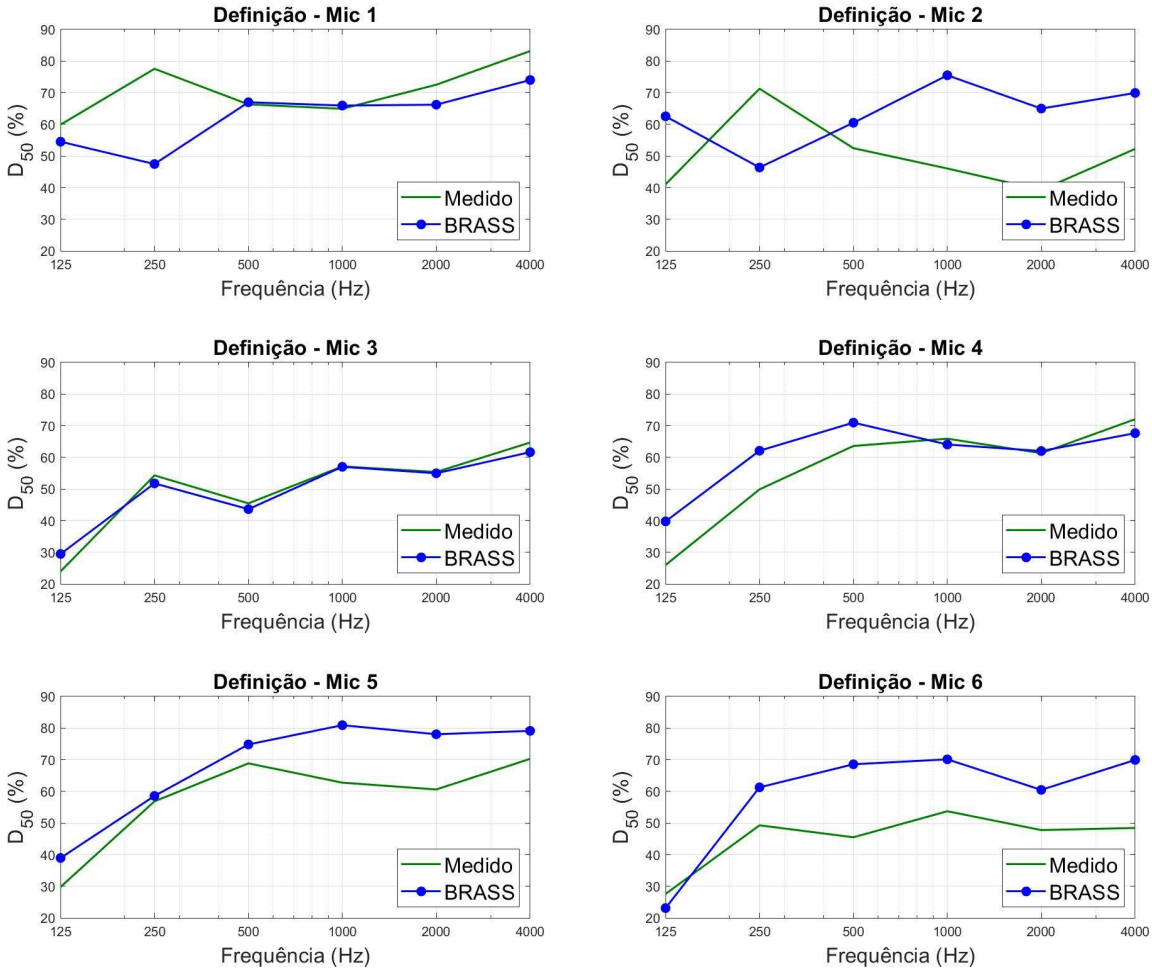


FONTE: O AUTOR

Nos gráficos de Clareza, os valores simulados nos Receptores 3 e 4 foram os mais próximos dos valores medidos, enquanto nos Receptores 2 e 6 os valores simulados ficaram mais distantes dos valores medidos.

A Figura 3.40 apresenta os gráficos com os valores medidos e simulados para a Definição nos 6 receptores.

FIGURA 3.40 – D_{50} – MEDIDO X SIMULADO



FONTE: O AUTOR

Assim como nos gráficos de Clareza, o gráfico de Definição onde as simulações ficaram mais próximas das medições foi no Receptor 3, que ficam no centro do auditório. Os Receptores que tiveram maior desvio foram 2 e 6.

- **COMPARAÇÃO DAS MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES ACÚSTICAS AOS MÉTODOS DE SABINE E EYRING**

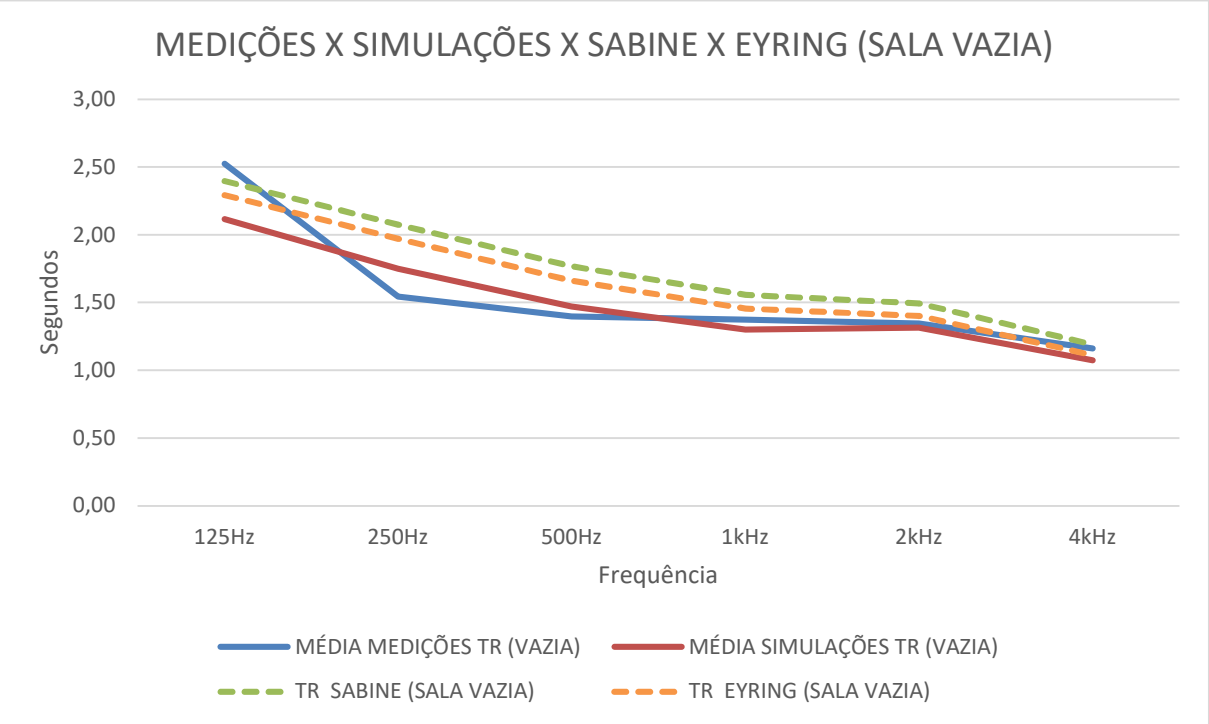
Os resultados também foram comparados aos métodos tradicionais de cálculo de T_{60} por faixa de frequência para o espaço como um todo, a partir das equações de Sabine e Eyring. A comparação foi feita entre a média aritmética dos tempos de reverberação simulados nos 6 receptores, para a sala vazia, com os resultados obtidos pelo método de cálculo tradicional de T_{60} de Sabine e Eyring, por faixa de frequência, conforme Tabela 3.3 e Figura 3.41.

TABELA 3.3 – COMPARAÇÃO DA MÉDIA DAS MEDIÇÕES, MÉDIA DAS SIMULAÇÕES, TR DE SABINE E TR DE EYRING

FREQUÊNCIA	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
MÉDIA MEDIÇÕES TR (SALA VAZIA)	2,53	1,54	1,40	1,37	1,35	1,16
MÉDIA SIMULAÇÕES TR (VAZIA)	2,12	1,75	1,47	1,30	1,31	1,07
TR SABINE (SALA VAZIA)	2,40	2,07	1,77	1,61	1,54	1,19
TR EYRING (SALA VAZIA)	2,29	1,97	1,66	1,50	1,45	1,11
DESVIO MÉDIA SIMULAÇÕES TR	19,37%	-11,76%	-4,94%	5,72%	2,47%	8,00%
DESVIO TR SABINE	5,36%	-25,67%	-20,94%	-11,84%	-9,91%	-2,55%
DESVIO TR EYRING	10,11%	-21,74%	-15,94%	-5,69%	-3,93%	4,38%

FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.41 – GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DA MÉDIA DAS MEDIÇÕES, MÉDIA DAS SIMULAÇÕES, TR DE SABINE E TR DE EYRING



FONTE: O AUTOR

Pode ser visto que tanto o método de Sabine quanto o de Eyring estão acima das simulações no BRASS. Contudo, as simulações ficaram mais próximas dos valores medidos do que os dois outros métodos. Uma das hipóteses para esse desvio é que a simulação considera a modelagem das poltronas, assim como de outros elementos, tais como a diferenciação dos dois volumes da sala (auditório e caixa cênica), com o traçado de raios. Já os outros dois métodos consideram a sala como um volume genérico, sem considerar as características geométricas dos planos, os dois volumes da sala, além de considerarem para cálculo o número de poltronas ou sua projeção, e

não a sua modelagem tridimensional. Os valores da fórmula de Eyring se aproximam mais aos valores simulados do que os valores da fórmula de Sabine por considerarem mais absorção nas superfícies.

- **ETAPA 6: VERIFICAÇÃO DE ATENDIMENTO ÀS METAS ESTABELECIDAS**

O parâmetro utilizado para essa avaliação foi o tempo de reverberação, por ser o mais amplamente utilizado e estar diretamente relacionado com o fator de clareza (Figueiredo, 2005). Para ter uma noção real do TR da sala em uso, deve ser considerada a mesma ocupada, com 2/3 de ocupação. Em uma situação de projeto, procura-se fazer com que os assentos possuam um coeficiente de absorção aproximado de uma pessoa. Isso evita a necessidade da presença de público durante a medição e a variação na ocupação do local não trará consequências significativas para o desempenho acústico. No caso do teatro Armando Gonzaga, os assentos são de couro, cujas características de absorção diferem das de um assento ocupado. Dessa forma, os tempos de reverberação medidos e os ideais, segundo as normas, não são comparáveis. Como alternativa, utilizam-se programas de simulação acústica, que possibilitam avaliar a influência da taxa de ocupação na plateia.

A Tabela 3.4 apresenta os coeficientes de absorção utilizados para produzir uma combinação de materiais que corresponde a 2/3 de poltronas ocupadas e 1/3 de poltronas vazias. Os coeficientes obtidos com essa ponderação ("Ocupação 2/3") foram então usados na simulação. A Tabela 3.5 e a Figura 3.42 apresentam as simulações de TR em cada receptor.

TABELA 3.4 – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO PARA AS POLTRONAS NO AUDITÓRIO OCUPADO

Material (m^2)	Fonte	Ocupação	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Poltronas couro vazias	Carvalho (2010)	1/3	0,09	0,12	0,15	0,15	0,11	0,07
Poltronas ocupadas	NBR 12.179 (1992)	2/3	0,33	0,39	0,44	0,45	0,46	0,46
Ocupação 2/3		3/3	0,25	0,30	0,34	0,35	0,34	0,33

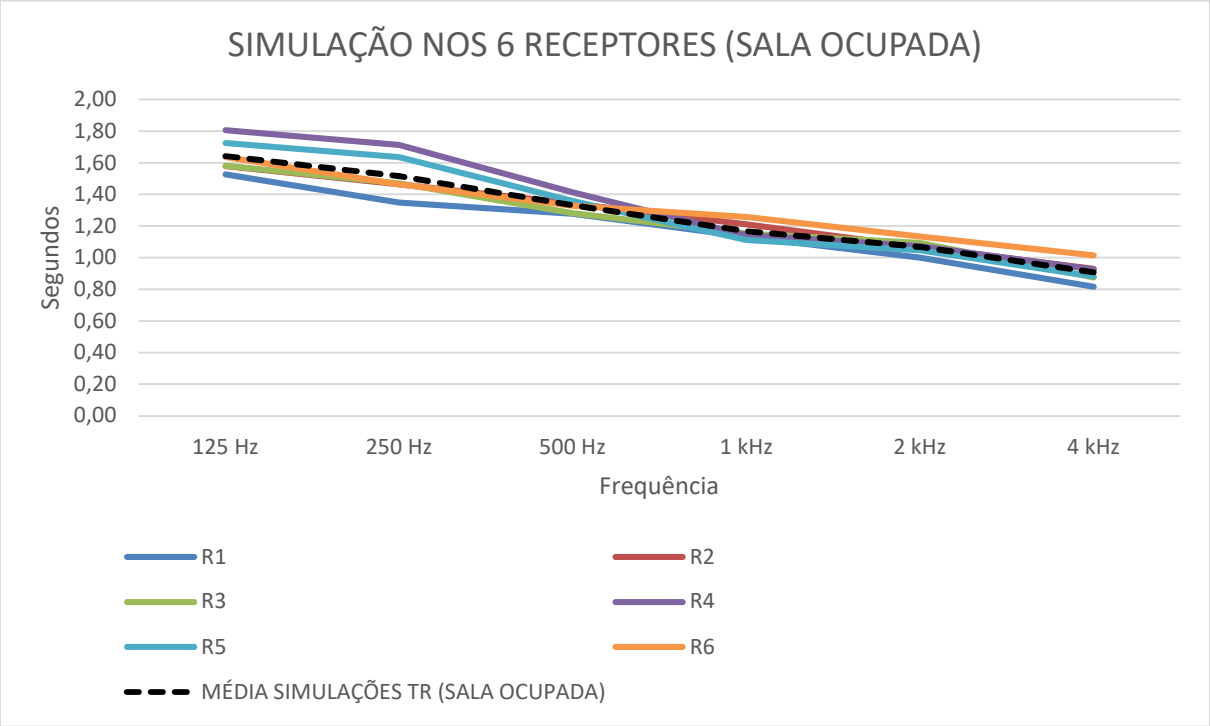
FONTE: O AUTOR

TABELA 3.5 – VALORES SIMULADOS DE TR (SALA EXISTENTE COM 2/3 DE OCUPAÇÃO)

FREQUÊNCIA	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
SIMULAÇÃO R1	1,59	1,36	1,28	1,15	1,05	0,84
SIMULAÇÃO R2	1,70	1,47	1,35	1,21	1,10	0,94
SIMULAÇÃO R3	1,68	1,50	1,28	1,15	1,12	0,89
SIMULAÇÃO R4	1,85	1,73	1,42	1,19	1,17	0,97
SIMULAÇÃO R5	1,81	1,65	1,36	1,18	1,15	0,91
SIMULAÇÃO R6	1,73	1,51	1,33	1,24	1,12	1,02

FONTE: O AUTOR

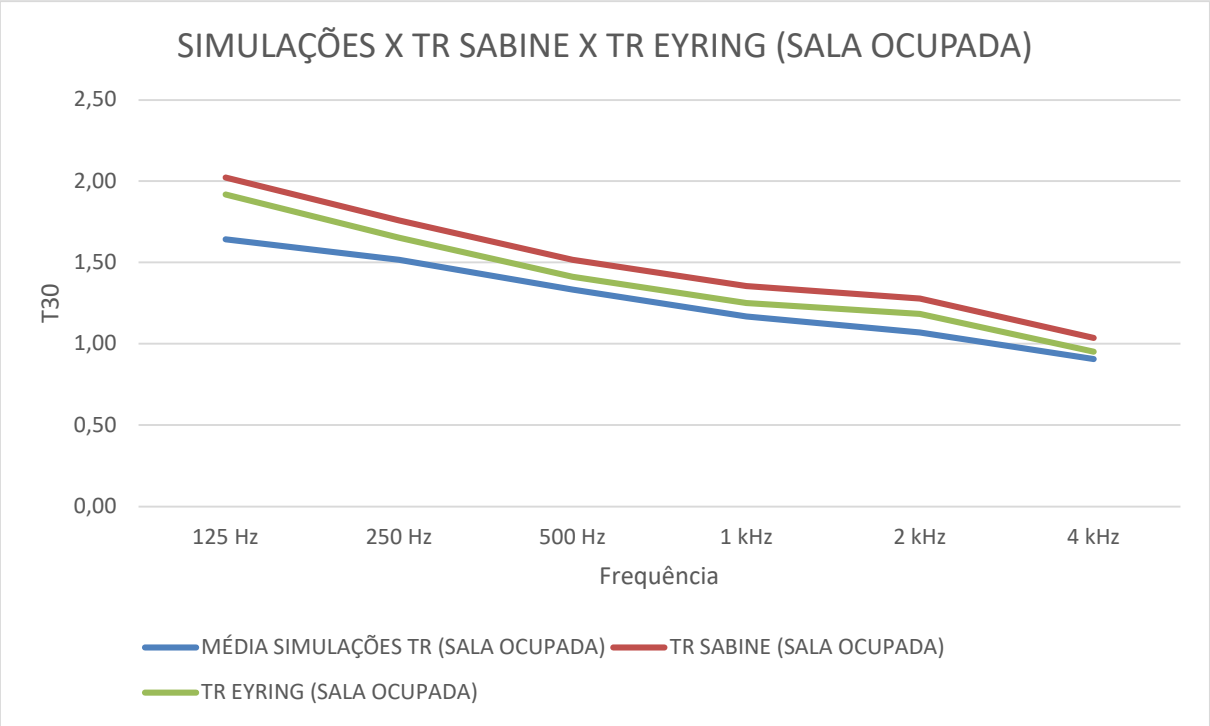
FIGURA 3.42 – SIMULAÇÃO TR NOS 6 RECEPTORES (SALA EXISTENTE COM 2/3 DE OCUPAÇÃO)



FONTE: O AUTOR

A Figura 3.43 mostra os valores médios simulados do TR, o TR de Sabine e o TR de Eyring para a sala com 2/3 de ocupação. Conforme visto anteriormente, os valores de Eyring e Sabine ficaram superiores aos valores das simulações.

FIGURA 3.43 – MÉDIA DAS SIMULAÇÕES, TR DE SABINE E TR DE EYRING PARA A SALA OCUPADA



FONTE: O AUTOR

De acordo com a Figura 2.14, o TR ideal na frequência de 500 Hz para o Teatro Armando Gonzaga, que possui aproximadamente 2.500m³, seria de 0,97s para palavra e 1,37s para música. Alguns autores apresentam fatores de correção para as demais frequências: Costa (2003), Carvalho (2010) e Brandão (2016).

A Tabela 3.6 mostra a comparação entre o TR das simulações da sala ocupada, os valores de TR da sala ocupada calculados pelos métodos de Sabine e Eyring, e os valores de TR recomendados pelos diferentes autores, para música e para palavra. A partir deste momento não foram mais considerados neste trabalho os métodos de Sabine, e Eyring no trabalho, mantendo apenas os valores das simulações no BRASS.

TABELA 3.6 – TRS IDEAIS POR DIFERENTES AUTORES (SALA EXISTENTE COM 2/3 DE OCUPAÇÃO)

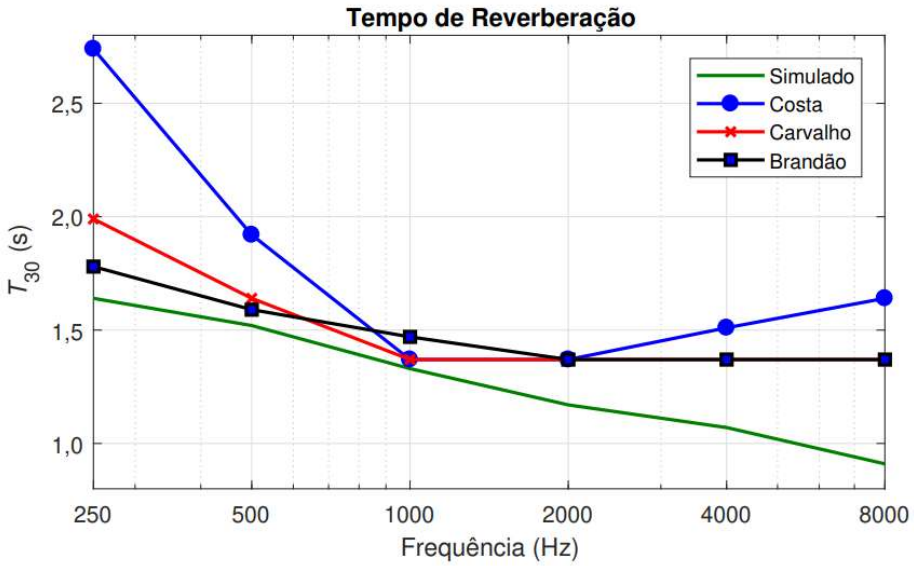
FREQUÊNCIA	**125Hz**	**250Hz**	**500Hz**	**1kHz**	**2kHz**	**4kHz**
MÉDIA SIMULAÇÕES TR (SALA OCUPADA)	1,64	1,52	1,33	1,17	1,07	0,91
TR SABINE (SALA OCUPADA)	2,02	1,76	1,52	1,35	1,28	1,04
TR EYRING (SALA OCUPADA)	1,92	1,65	1,41	1,25	1,18	0,95
TR IDEAL MÚSICA (COSTA, 2003)	2,74	1,92	1,37	1,37	1,51	1,64
TR IDEAL MÚSICA (CARVALHO, 2010)	1,99	1,64	1,37	1,37	1,37	1,37
TR IDEAL MÚSICA (BRANDÃO, 2016)	1,78	1,59	1,47	1,37	1,37	1,37
TR IDEAL PALAVRA (COSTA, 2003)	1,26	1,07	0,97	0,97	1,07	1,26
TR IDEAL PALAVRA (CARVALHO, 2010)	1,41	1,16	0,97	0,97	0,97	0,97

FONTE: O AUTOR

Na Figura 3.44 são comparados os valores de tempo de reverberação considerados “ideais” – segundo Costa (2003), Carvalho (2010) e Brandão (2016), com a média dos valores obtidos na simulação, para uso musical. Nesse caso, a sala deveria ter um tempo de reverberação maior, principalmente nas baixas e altas frequências.

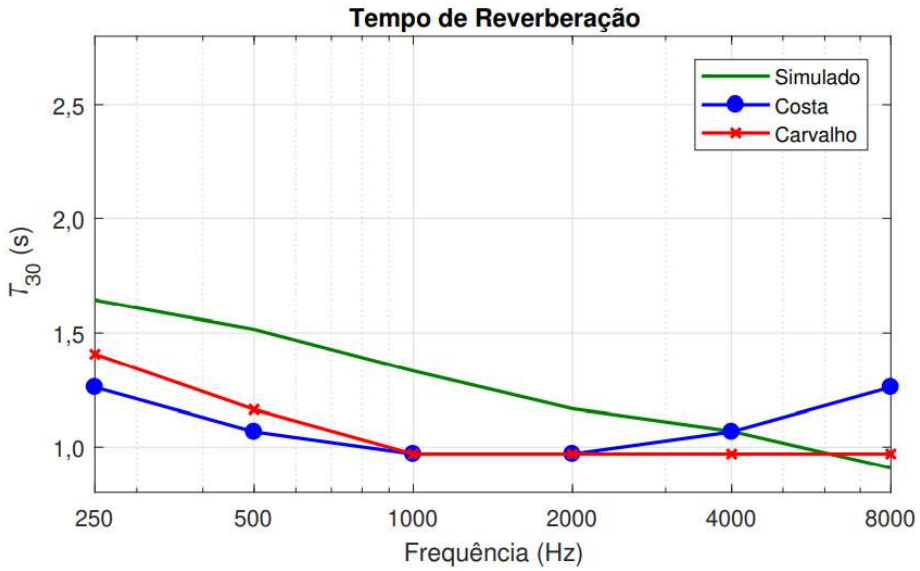
A mesma análise foi realizada para palavra, cujos valores simulados podem ser comparados com valores ideais para fala na Figura 3.45, segundo Costa (2003) e Carvalho (2010). Para o uso da palavra, o tempo de reverberação deveria ser menor para as baixas e médias frequências. Dessa forma, verifica-se que o Teatro não possui características de reverberação adequadas nem para música nem para palavra, havendo uma maior necessidade de adequação do espaço para o uso da palavra, enquanto para o uso de música o grau de intervenção necessário é menor.

FIGURA 3.44 –T_{30} médio obtido para uma ocupação de 2/3 da plateia, e TR ideais para música.



FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.45 – T_{30} médio obtido para uma ocupação de 2/3 da plateia, e TR ideais para palavra.



FONTE: O AUTOR

- **ETAPA 7: ALTERAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO ACÚSTICO**

Para projeto de salas novas, quando os parâmetros acústicos simulados não estiverem de acordo com o uso da sala, o projeto deverá sofrer ajustes na geometria e/ou nos materiais de revestimento, visando a adequação acústica do espaço às atividades previstas no programa de necessidades.

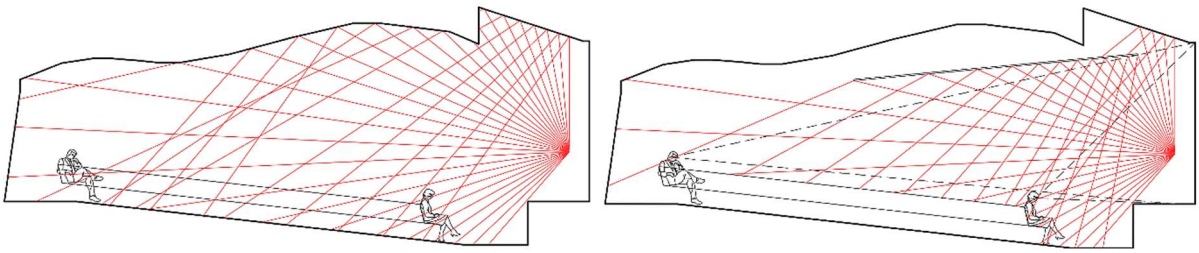
Para salas existentes, se os resultados validados pelas medições não estiverem de acordo com os parâmetros recomendados para o tipo de uso da sala, deverá ser proposta uma intervenção para a adequação acústica na sala. Se, ao contrário, o tempo de reverberação e demais parâmetros acústicos forem compatíveis com o uso da sala, não haverá necessidade de intervenção.

No caso de revitalização de salas de valor patrimonial, deverá ser estabelecido como meta atingir o maior grau de adequação acústica possível pelas intervenções, respeitadas as restrições impostas pelos órgãos de tutela.

As alterações do modelo geométrico acústico devem ser realizadas tantas vezes quanto necessário até que os parâmetros acústicos simulados se aproximem das metas estabelecidas. Essas alterações podem também ser usadas como ferramenta para comparar o desempenho de soluções alternativas para o projeto (materiais de revestimento das superfícies, painéis suspensos ou móveis).

Inicialmente, foi feita a análise geométrica do teatro no *software* Autocad, de modo a observar as reflexões sonoras mais importantes, e foi verificado na análise do corte que a forma côncava do teto do auditório não favorece uma distribuição homogênea da energia sonora, gerando pontos de foco, o que é desaconselhável acusticamente, conforme Figura 3.46(a). A Figura 3.46(b) apresenta um exemplo de proposta de teto que distribuiria de forma mais homogênea a energia sonora no auditório, sem atrapalhar a visão dos espectadores.

FIGURA 3.46 – GEOMETRIA DA SALA EXISTENTE – CORTE



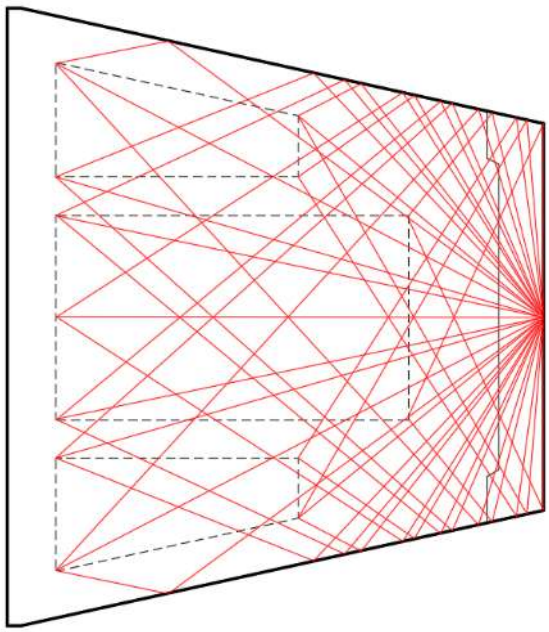
(a) (b)

FONTE: O AUTOR

Analisando a planta baixa do auditório em forma de leque, existe o problema típico desse formato de sala, onde as reflexões laterais são prejudicadas devido à inclinação das paredes, que distanciam o caminho percorrido pelo som refletido até o espectador à medida em este que se distancia do palco, como pode ser visto na Figura 3.47, também feita no *software* Autocad. As linhas tracejadas representam os assentos do auditório.

Sendo um edifício tombado, as propostas de intervenções devem ser feitas com sistemas de materiais independentes e removíveis, se necessário, de forma a respeitar a arquitetura histórica do teatro e adequar o ambiente sonoro aos diferentes cenários.

FIGURA 3.47 – PLANTA BAIXA DA SALA EXISTENTE



FONTE: O AUTOR

O valor de TR deve ser usado como guia: se o TR simulado for maior que desejado (caso para palavra), deverão ser empregados materiais com maiores coeficientes de absorção (α) ou aumentada a área de aplicação. Caso contrário (caso para música), devem ser usados materiais com menor coeficiente de absorção (α) ou reduzida a área de aplicação. Para cada alteração do modelo deve ser realizada nova simulação.

Nesse sentido, o uso de painéis deslizantes nas paredes laterais possibilitaria duas configurações: uma com maior absorção da energia sonora, para uso para palavra, e outra com maior reflexão, para uso em espetáculos musicais. Este sistema de painéis duplos possui para cada módulo um painel fixo e outro móvel que, de acordo com a finalidade, proporcionam baixa absorção sonora (com duas placas de gesso para música acústica) ou maior absorção sonora (com uma placa de gesso e outra de madeira perfurada com lã, para o caso da palavra). A Figura

3.48 mostra o detalhe de um módulo deste sistema proposto. A montagem dos painéis com inclinação em relação à parede visa diminuir o caminho percorrido pelo som até os espectadores, principalmente os que ficam no fundo.

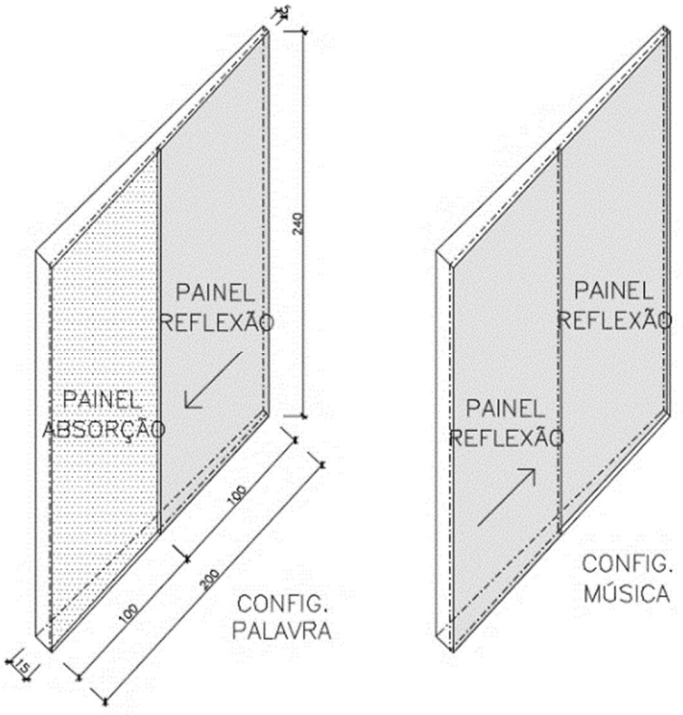
Para as paredes do fundo do auditório, também foram propostos painéis perfurados, absorventes, com uma configuração fixa, tanto para música quanto palavra. No fundo do palco, foi proposto painel refletor de placas de gesso, para projetar o som para o auditório, podendo estas serem com relevos que ajudam na difusão do som além da reflexão.

No piso não houve intervenção.

Para palavra, além dos painéis laterais configurados para absorção, foi proposto um sistema de forro removível com tecido de poliéster translúcido resistente ao fogo, que poderá ser esticado sobre o auditório através de estrutura independente, assim como duas cortinas que deverão ser abertas nas coxias do palco, e fechadas para uso da música.

A Tabela 3.7 apresenta os coeficientes de absorção destes materiais, locais de aplicação e referência. A Figura 3.49 apresenta a imagem dos materiais utilizados na intervenção. As Figuras 3.50 a 3.51 apresentam os modelos em Autocad e no BRASS, nas configurações para música e palavra.

FIGURA 3.48 – MÓDULO DE PAINEIS DESLIZANTES DE PAREDE LATERAL



FONTE: O AUTOR

TABELA 3.7 – MATERIAIS EMPREGADOS NAS INTERVENÇÕES, LOCAL DE APLICAÇÃO E SUAS CURVAS DE ABSORÇÃO

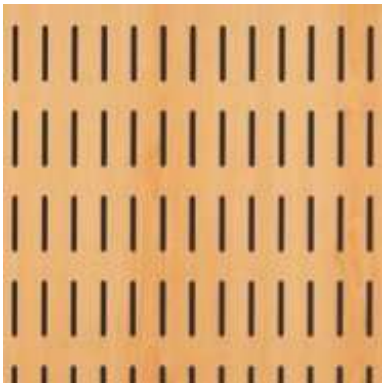
Material (m²)	Local de aplicação	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Painel OWA Nexacustic 500	Paineis laterais	0,40	0,95	1,00	0,80	0,45	0,25
Painel reflexão gesso liso (NBR 12.179)	Paineis laterais / Palco	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05
Painel OWA Nexacustic MI188	Fundo plateia	0,17	0,78	0,89	0,39	0,21	0,18
Tecido poliéster (Vescom Marmara)	Teto (palavra)	0,04	0,19	0,45	0,47	0,44	0,41

FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.49 – MATERIAIS UTILIZADOS NA INTERVENÇÃO

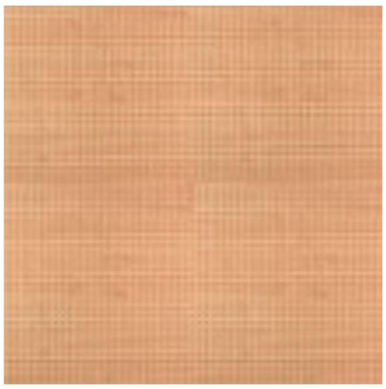
PLACAS DE GESSO COM RELEVOS (PALCO)

FONTE: SITE DA EMPRESA EVEREST, 2020



PAINEL OWA NEXACUSTIC 500 (LATERAIS)

FONTE: CATÁLOGO OWA NEXACUSTIC, 2020



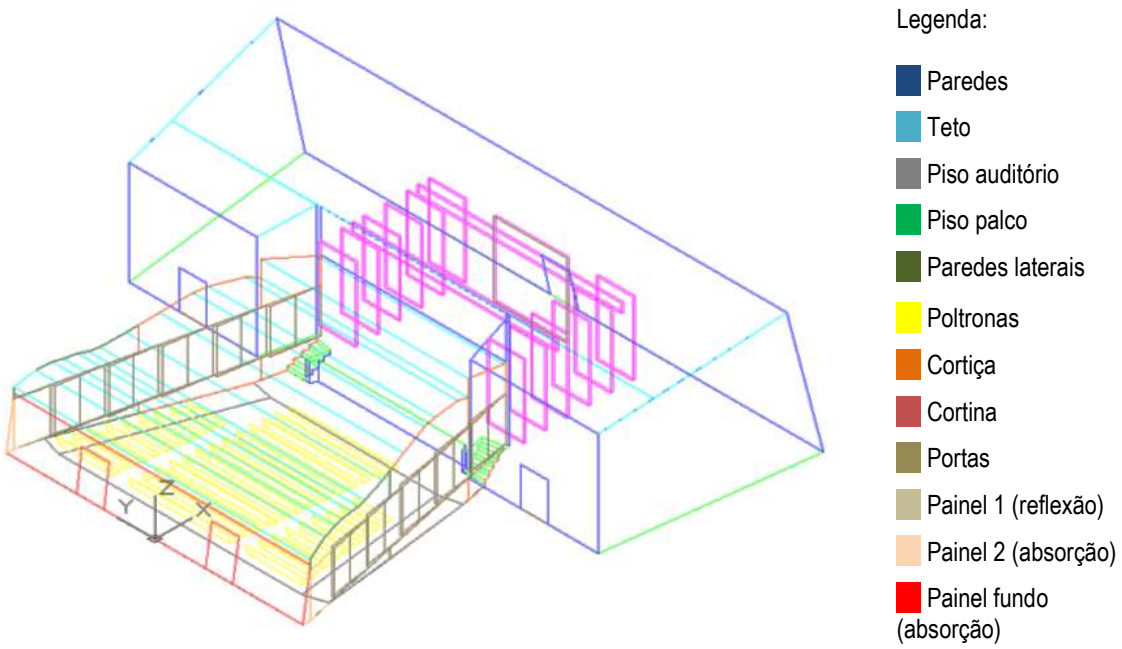
PAINEL OWA NEXACUSTIC MI188 (FUNDO AUDITÓRIO)

FONTE: CATÁLOGO OWA NEXACUSTIC

TECIDO DE POLIÉSTER TRANSLÚCIDO VESCOM MARMARA (TETO NA CONFIG. PARA PALAVRA)

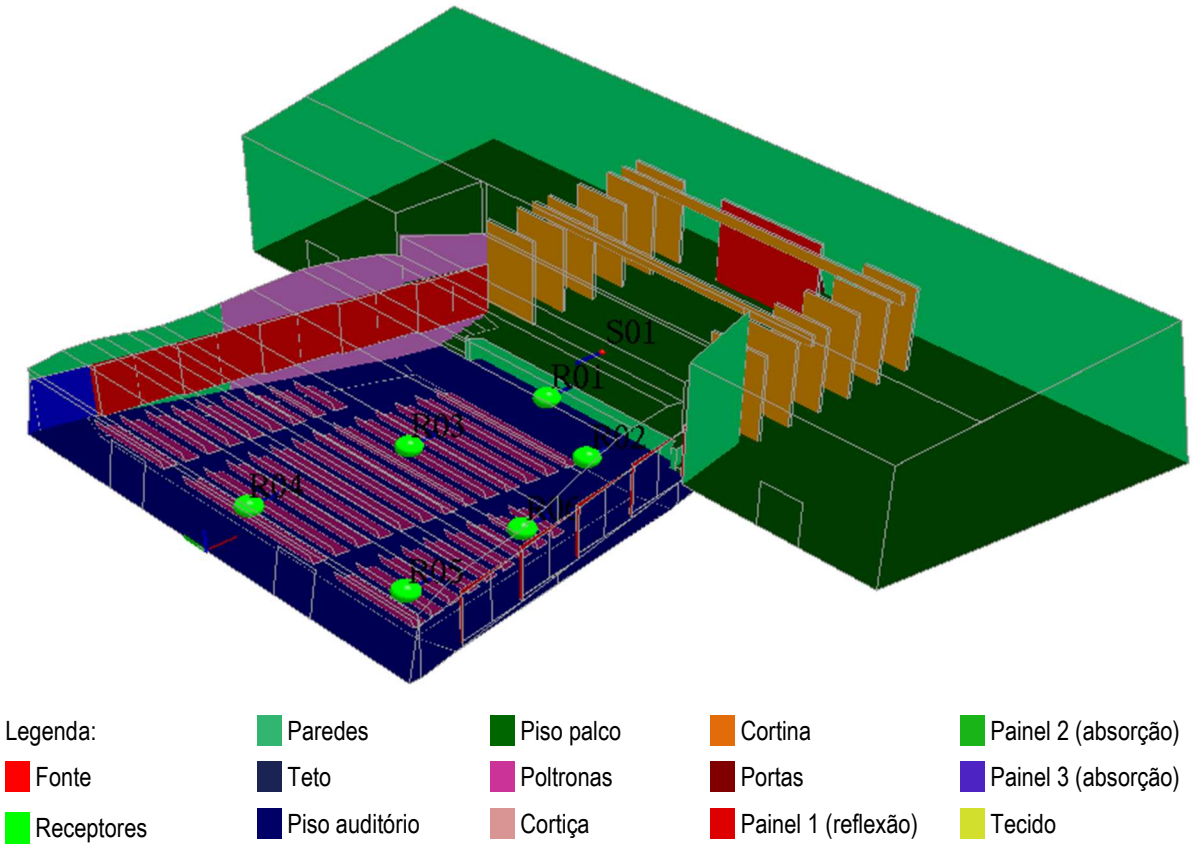
FONTE: SITE DA EMPRESA VESCOM, 2020

FIGURA 3.50 – AUDITÓRIO CONFIGURADO PARA MÚSICA NO AUTOCAD



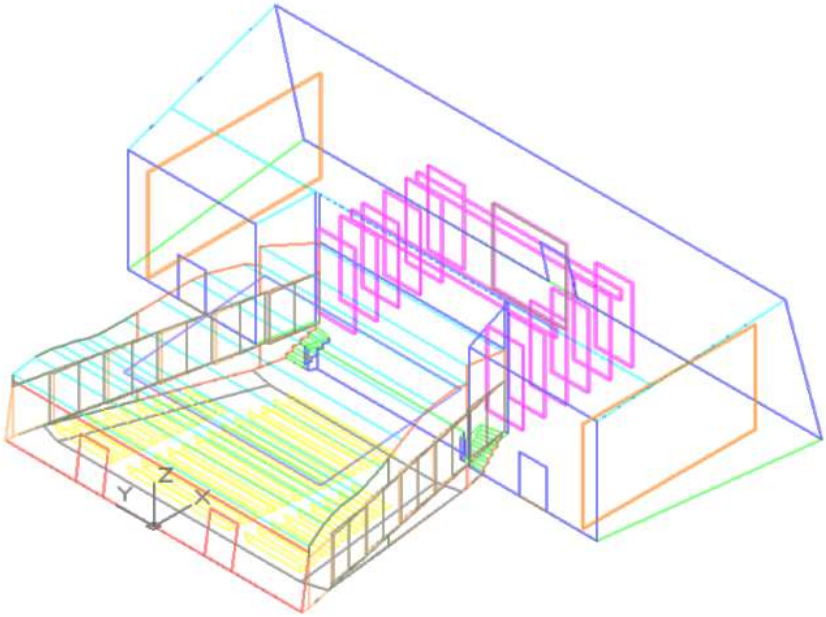
FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.51 – AUDITÓRIO CONFIGURADO PARA MÚSICA NO BRASS



FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.52 – AUDITÓRIO CONFIGURADO PARA PALAVRA NO AUTOCAD

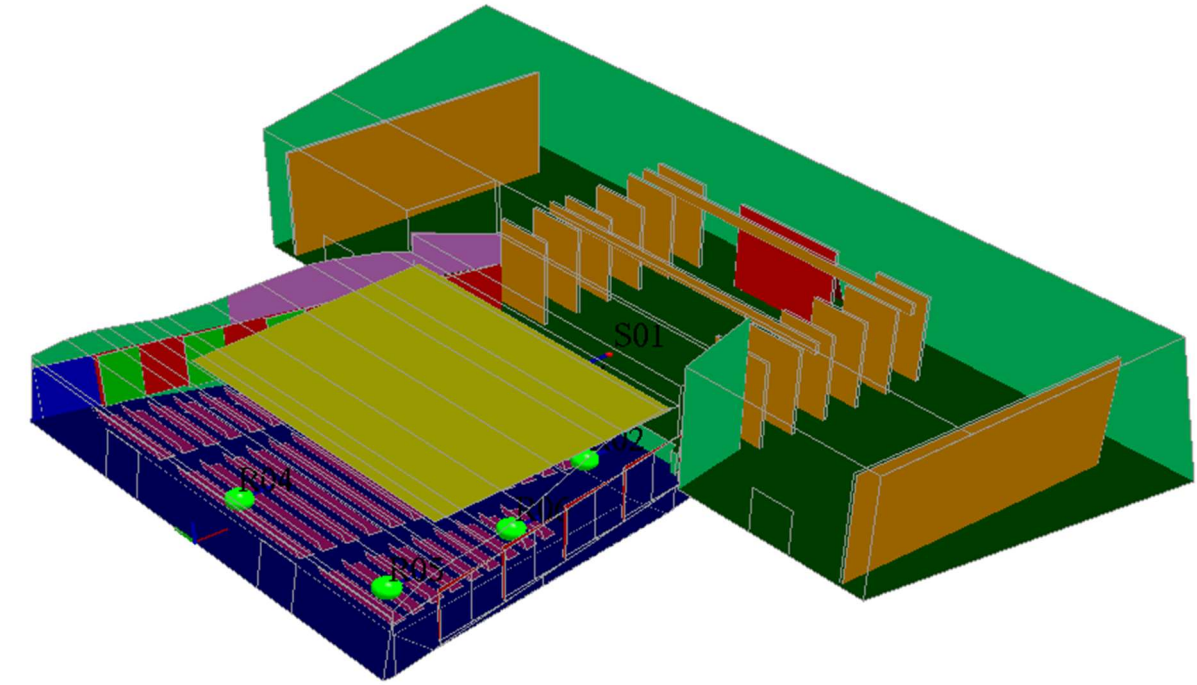


Legenda:

- Paredes
- Teto
- Piso auditório
- Piso palco
- Paredes laterais
- Poltronas
- Cortiça
- Cortina
- Portas
- Novas cortinas na caixa cênica
- Painel 1 (reflexão)
- Painel 2 (absorção)
- Painel fundo (absorção)
- Painel teto (tecido)

FONTE: O AUTOR

FIGURA 3.53 – AUDITÓRIO CONFIGURADO PARA PALAVRA NO BRASS



Legenda:	Paredes	Piso palco	Cortina	Painel 2 (absorção)
Fonte	Teto	Poltronas	Portas	Painel 3 (absorção)
Receptores	Piso auditório	Cortiça	Painel 1 (reflexão)	Tecido

FONTE: O AUTOR

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos da simulação nos dois cenários simulados (música acústica e palavra) no Teatro Armando Gonzaga, comparados com o cenário atual. Todas as simulações neste capítulo consideram ocupação de 2/3 da plateia.

4.1 MÉDIAS DOS RESULTADOS

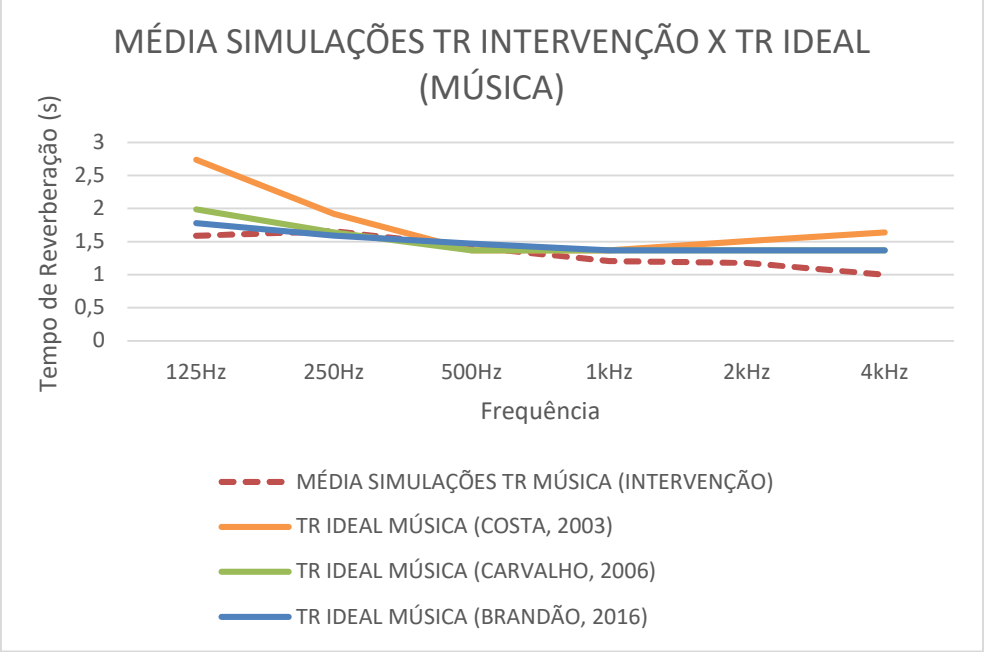
As Tabelas 4.1 e 4.2 mostram as médias dos resultados do TR de todos os receptores com a intervenção proposta com a sala ocupada, e o TR ideal por diferentes autores, para música acústica e palavra respectivamente, por frequência. As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam os gráficos que ilustram estes valores.

TABELA 4.1 – MÉDIA SIMULAÇÕES TR INTERVENÇÃO SALA OCUPADA X TR IDEAL (MÚSICA)

FREQUÊNCIA	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
MÉDIA SIMULAÇÕES TR MÚSICA (INTERVENÇÃO)	1,59	1,66	1,42	1,21	1,18	1,00
TR IDEAL MÚSICA (COSTA, 2003)	2,74	1,92	1,37	1,37	1,51	1,64
TR IDEAL MÚSICA (CARVALHO, 2006)	1,99	1,64	1,37	1,37	1,37	1,37
TR IDEAL MÚSICA (BRANDÃO, 2016)	1,78	1,59	1,47	1,37	1,37	1,37

FONTE: O AUTOR

FIGURA 4.1 – MÉDIA DAS SIMULAÇÕES TR INTERVENÇÃO SALA OCUPADA X TR IDEAL (MÚSICA)



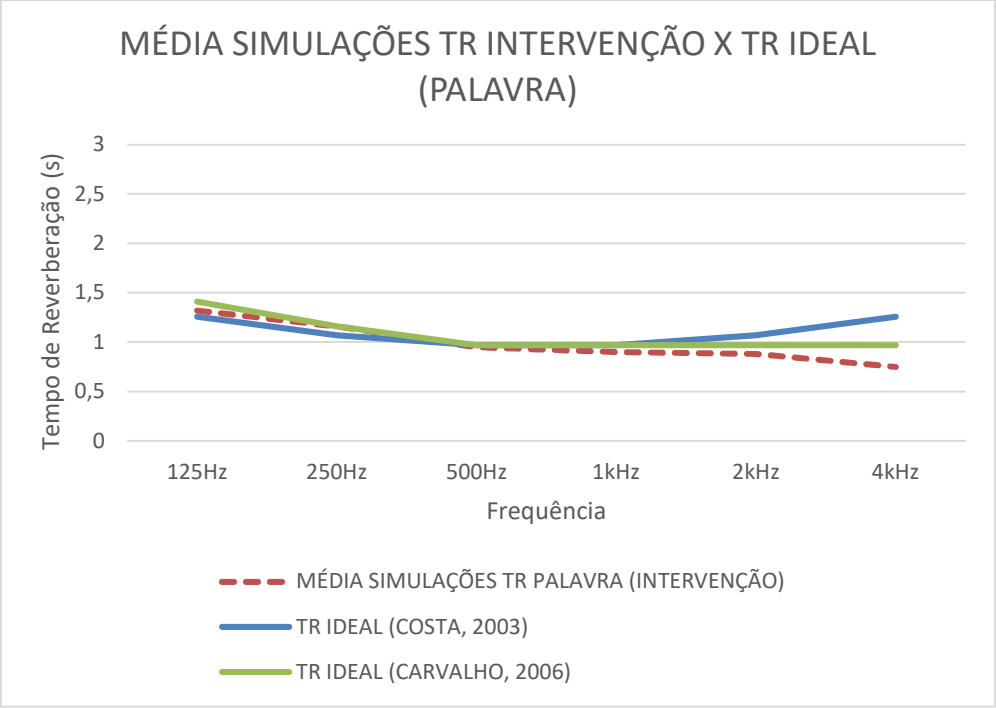
FONTE: O AUTOR

TABELA 4.2 – MÉDIA SIMULAÇÕES TR INTERVENÇÃO SALA OCUPADA X TR IDEAL (PALAVRA)

FREQUÊNCIA	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
MÉDIA SIMULAÇÕES TR PALAVRA (INTERVENÇÃO)	1,32	1,16	0,95	0,90	0,88	0,75
TR IDEAL PALAVRA (COSTA, 2003)	1,26	1,07	0,97	0,97	1,07	1,26
TR IDEAL (CARVALHO, 2006)	1,41	1,16	0,97	0,97	0,97	0,97

FONTE: O AUTOR

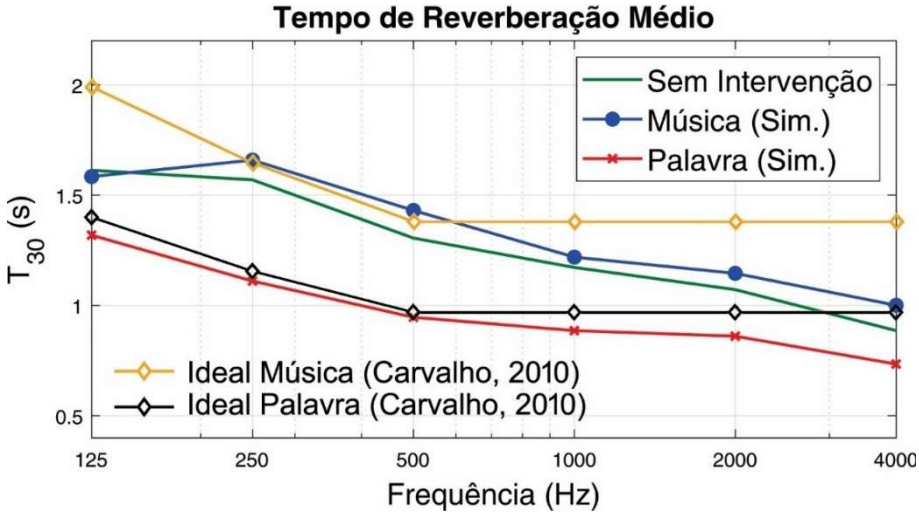
FIGURA 4.2 – MÉDIA DAS SIMULAÇÕES TR INTERVENÇÃO SALA OCUPADA X TR IDEAL (PALAVRA)



FONTE: O AUTOR

A Figura 4.3 apresenta a comparação entre o TR da sala existente ocupada (sem intervenção), os valores ideais para música e palavra (Carvalho, 2010), e as médias das simulações com os cenários para música e palavra.

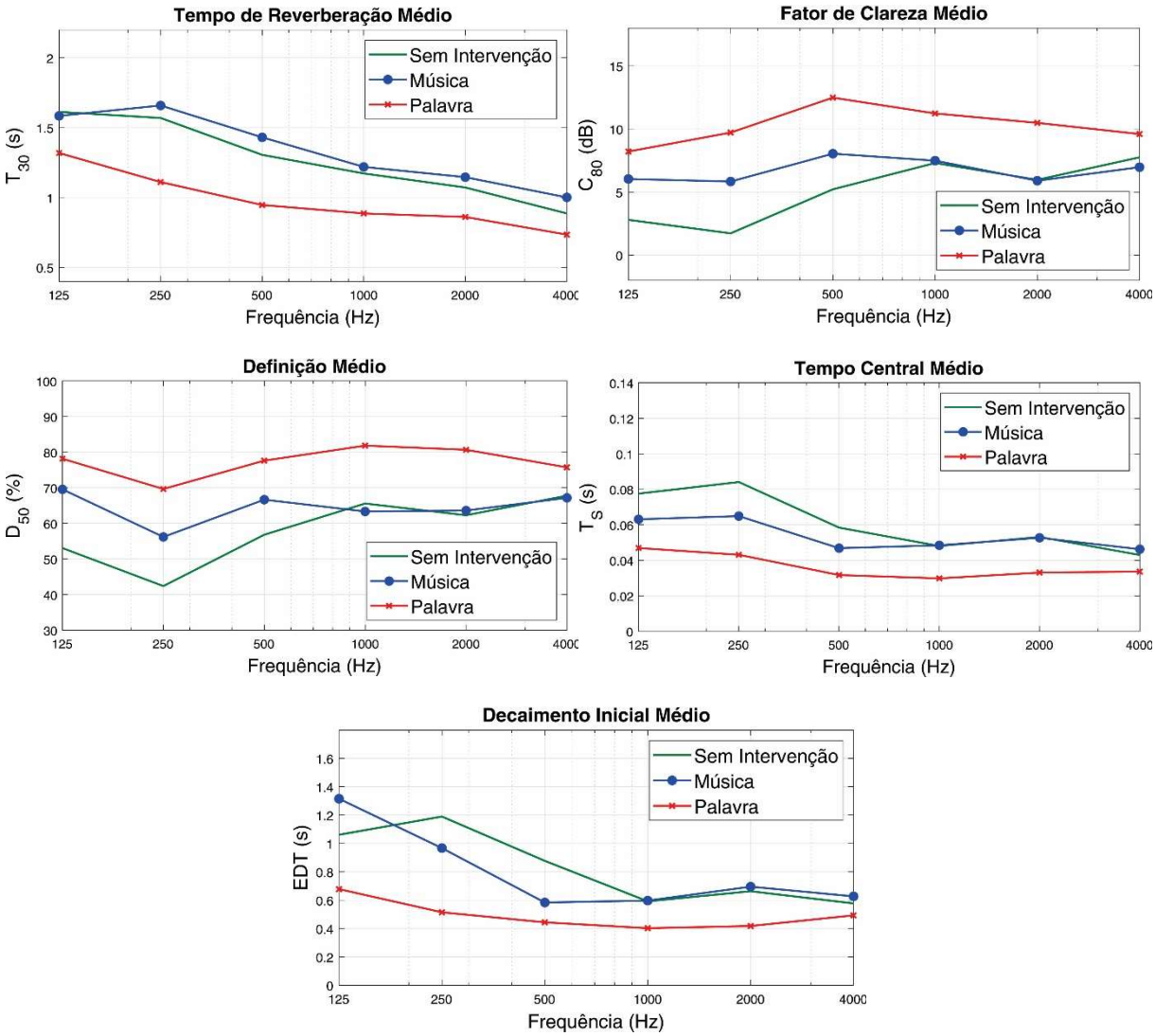
FIGURA 4.3 – TR DA SALA EXISTENTE X MÉDIA DO TR DAS SIMULAÇÕES PARA MÚSICA X MÉDIA DO TR DAS SIMULAÇÕES PARA PALAVRA X TR IDEAIS PARA MÚSICA E PALAVRA (CARVALHO, 2010)



FONTE: O AUTOR

A Figura 4.4 apresenta as médias das simulações da intervenção na sala com 2/3 de ocupação do auditório, nos cenários para música e palavra, em comparação com o estado existente.

FIGURA 4.4 – MÉDIAS DAS SIMULAÇÕES DA INTERVENÇÃO



FONTE: O AUTOR

Pode-se observar que o tempo de reverberação “da sala” foi pouco alterado para o caso da música, mas sofre uma redução considerável para a configuração para palavra. Apesar de não ter atingido alguns valores sugeridos pelos autores, é notável que houve um pequeno aumento da reverberação da sala para a música, aproximando os valores aos ideais de Carvalho (2010). Nas simulações para palavra, é evidente a diminuição do TR em todas as frequências, principalmente nas baixas e médias. O T_{30} atendeu os valores ideais para palavra até as médias frequências, e como a sala já tinha baixos valores nas altas frequências, estes valores ainda ficaram abaixo dos valores ideais, mesmo assim é possível notar que houve uma melhora satisfatória para o uso da palavra.

De maneira geral, a Clareza aumentou para todos os receptores nos dois cenários, principalmente para palavra, em que o TR ficou menor. O Fator de Clareza médio para música teve aumento nas baixas frequências e em 500 Hz, enquanto se manteve nas frequências de 1 kHz e 2 kHz, com pequeno decréscimo em 4 kHz. Os valores médios de C_{80} nas frequências médias ficaram superiores aos valores nas baixas frequências e altas frequências. Este parâmetro teve seus valores médios entre 6 e 8 dB, atendendo aos usos de instrumentos de cordas

dedilhadas, música pop, música religiosa mais moderna, jazz leve, estilos com notas mais rápidas, instrumentos de percussão, *rock n´roll* e música atual (do Valle, 2009).

A Clareza média para palavra teve um aumento significativo em todas as frequências, principalmente nas graves e 500Hz, ficando na faixa de 8 a 12 Db, provendo um grande aumento de inteligibilidade.

A Definição média para música, assim como a Clareza, teve um aumento nas baixas frequências e em 500Hz. Na sala no estado atual encontrava-se em entre 40% e 68%, e com a proposta de intervenção aumentaria para valores entre 55% e 70%. O D_{50} na frequência de 125Hz teve um aumento significativo, ficando a frequência com maior definição, devido à sua queda de TR.

O TC médio e o EDT médio diminuíram significativamente, devido à diminuição do TR, principalmente nas frequências de 25 Hz, 250 Hz e 500 Hz. O Tempo Central médio diminuiu nas baixas frequências e em 500Hz, mantendo-se em 1kHz e nas altas frequências. O EDT médio aumentou em 125Hz, reduziu em 250 Hz e 500Hz, e manteve-se igual em 1kHz, 2kHz e 4kHz.

4.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_{30})

- **Intervenção para Música**

A Figura 4.5 mostra o T_{30} simulado da sala ocupada no estado existente, o T_{30} simulado da sala ocupada com a intervenção para música, e o TR recomendado para música por Carvalho (2010), nos 6 receptores.

Nos Receptores 1, 3, 4 e 6 houve um aumento geral do TR para música, enquanto nos Receptores 2 e 5 houve uma diminuição nas baixas frequências. Nos receptores R1, R3, R4 e R6 os valores do T_{30} se aproximaram dos valores recomendados.

No R1, na proposta para música, o T_{30} teve um aumento de reverberação de aproximadamente 0,5 s, em relação à sala atual, tendendo ao TR recomendado, ficando abaixo apenas nas altas frequências.

No R2, nesse cenário, não houve mudança significativa, havendo pequeno aumento do TR na frequência de 4kHz e uma ligeira queda do TR na frequência de 250Hz.

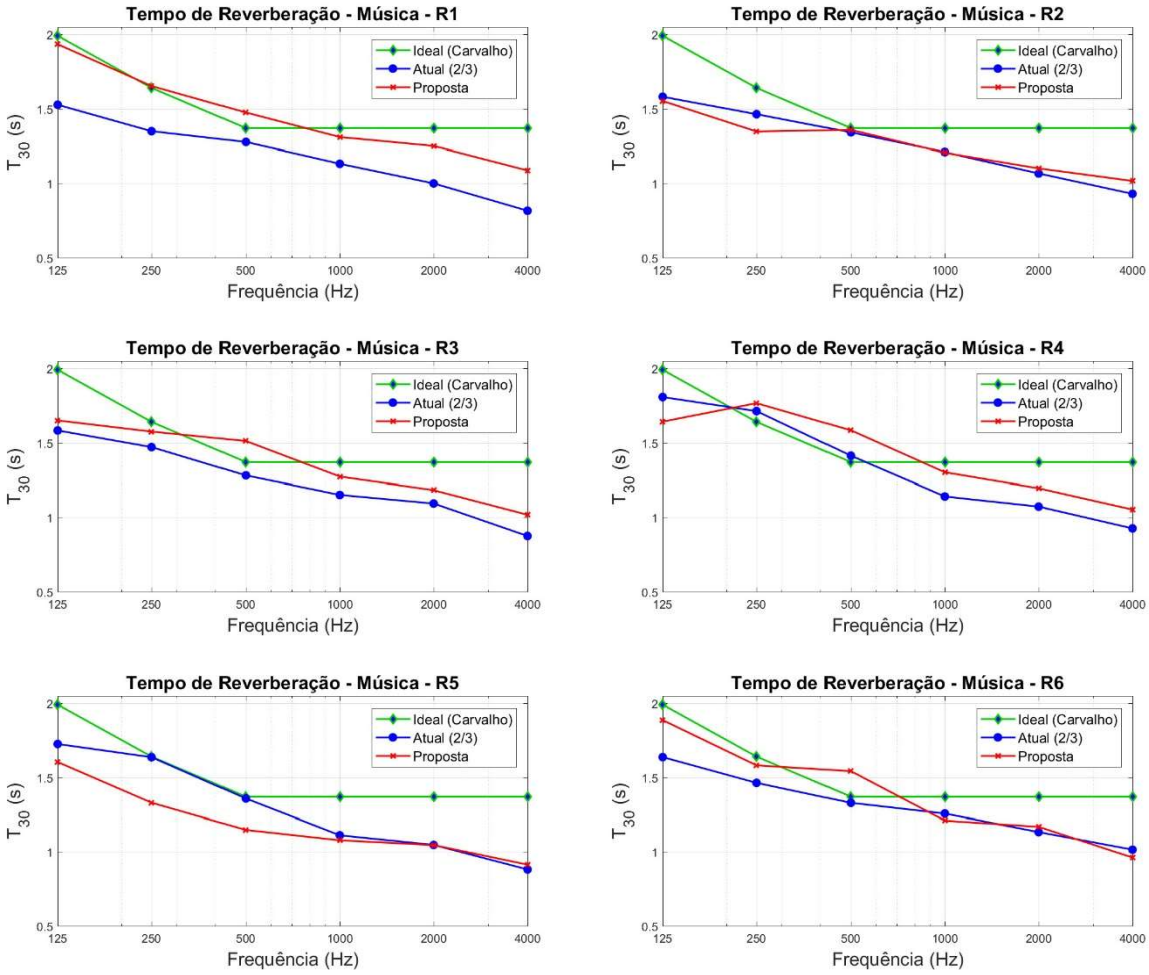
No R3 (Figura 17), na proposta para música, houve um aumento geral do T_{30}, aproximando os valores do TR recomendado, ficando as frequências médias mais próximas do ideal, e as frequências de 125, 2 e 4 kHz ainda abaixo do indicado.

No R4, na situação atual encontra-se com o T_{30} abaixo do ideal, exceto para as frequências de 250 e 500 Hz. A proposta para música aumentou o T_{30} de maneira geral, exceto na frequência de 125 Hz, e os valores de T_{30} ficaram mais próximos do recomendado nas médias frequências. Nas altas frequências os valores se aproximaram do indicado, apesar de ficarem ainda inferiores.

No R5, houve queda do TR nas baixas frequências e 500hz, enquanto se manteve nas altas frequências e 1kHz.

Já no R6, houve aumento do T_{30} nas baixas frequências e 500Hz, aproximando estes valores aos recomendados, enquanto nas altas frequências e 1kHz não houve alterações significativas.

FIGURA 4.5 – T_{30} SIMULADO DA SALA EXISTENTE OCUPADA, T_{30} DA SALA COM INTERVENÇÃO PARA MÚSICA, E TR RECOMENDADO PARA MÚSICA (CARVALHO, 2010), NOS 6 RECEPTORES



FONTE: O AUTOR

- **Intervenção para Palavra**

A Figura 4.6 mostra o T_{30} simulado da sala ocupada no estado existente, o T_{30} simulado da sala ocupada com a intervenção para palavra, e o TR recomendado para palavra por Carvalho (2010), nos 6 receptores.

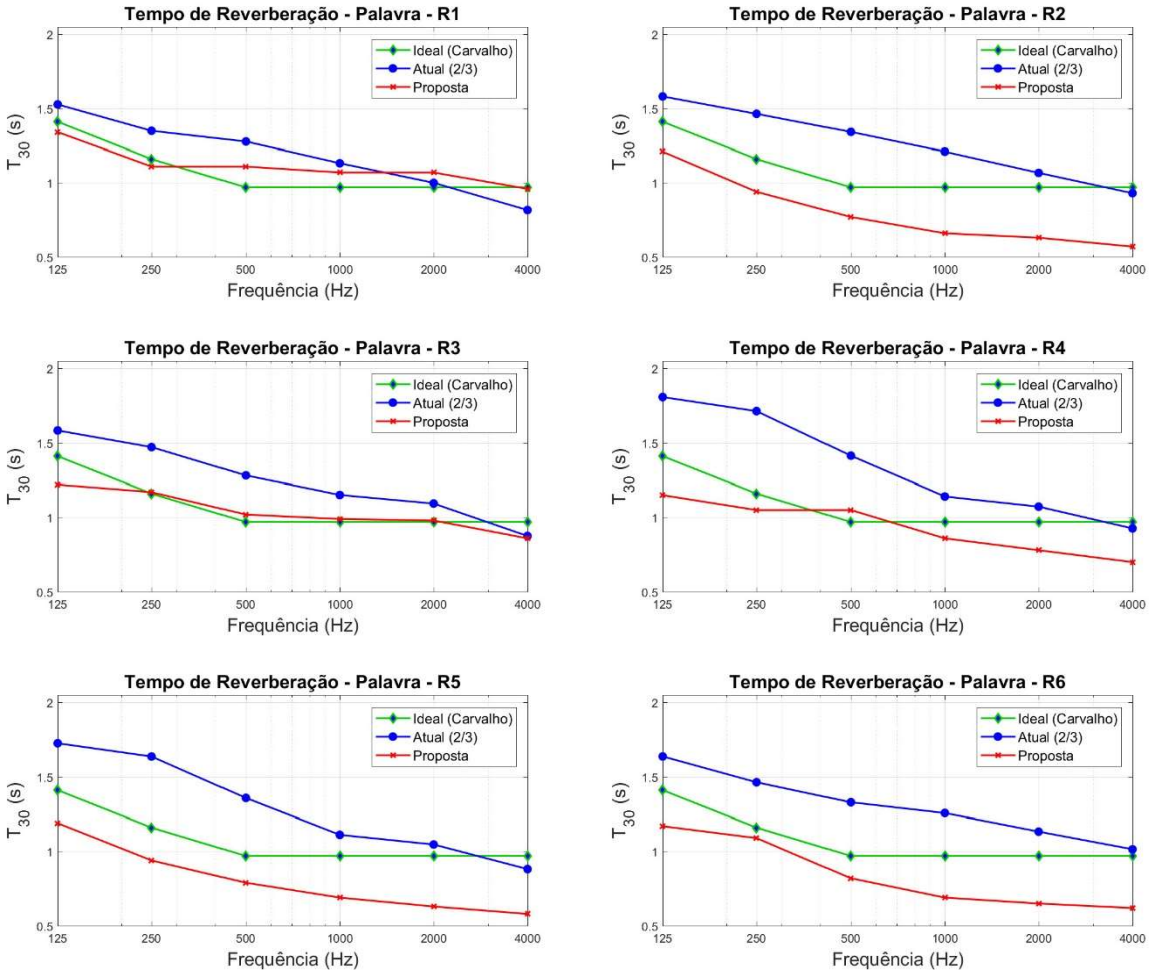
No R1, o T_{30} teve queda nas baixas e médias frequências, sofrendo aumento nas altas frequências, portanto aproximando-se muito do TR recomendado.

No R3, houve uma diminuição do T_{30} em todas as frequências, exceto 4 kHz, ficando todas muito próximas do recomendado, exceto 125 e 4 kHz, que ficaram ligeiramente abaixo.

Já no R4, no cenário para palavra, houve uma queda do T_{30} em todas as frequências, aproximando os valores das frequências médias dos valores recomendados, e tendo os valores das baixas e altas frequências ficando abaixo dos valores indicados. A queda das baixas frequências foi importante, pois estavam muito acima do recomendado.

As simulações nos receptores R2, R5, e R6 apresentaram queda em todas as frequências, ficando abaixo do recomendado. É notável que os receptores que ficam no eixo longitudinal do teatro, alinhado com o centro da fonte sonora (R1, R3 e R4 tiveram os resultados mais próximos do recomendado).

FIGURA 4.6 – T_{30} SIMULADO DA SALA EXISTENTE OCUPADA, T_{30} DA SALA COM INTERVENÇÃO PARA PALAVRA, E TR RECOMENDADO PARA PALAVRA (CARVALHO, 2010), NOS 6 RECEPTORES



FONTE: O AUTOR

4.3 CLAREZA (C_{80})

A Figura 4.7 mostra o descritor acústico Fator de Clareza C_{80} simulado da sala ocupada no estado existente, o C_{80} simulado da sala ocupada com a intervenção para música, e o C_{80} simulado da sala ocupada com a intervenção para palavra. Em geral, a Clareza melhorou para todos os receptores nos dois cenários, principalmente para palavra, onde o TR ficou menor. Os Receptores 1 e 2 tiveram os maiores valores de Clareza para palavra devido à proximidade com o palco e à maior intensidade de energia sonora nos primeiros 80 ms. Tanto para música como para palavra, as frequências médias e altas tiveram maior valor de C_{80}.

O R1, na proposta para música, teve todos os valores de C_{80} mantidos, exceto nas baixas frequências, nas quais houve ligeiro aumento. Para palavra, houve um significativo aumento deste parâmetro em todas as frequências.

No R2, na configuração para música, houve aumento nas frequências 125Hz, 250Hz e 500Hz, enquanto se manteve nas frequências 1kHz, 2kHz, 4kHz. Já na simulação para palavra, houve aumento geral em todas as frequências, de valores de aproximadamente 5dB.

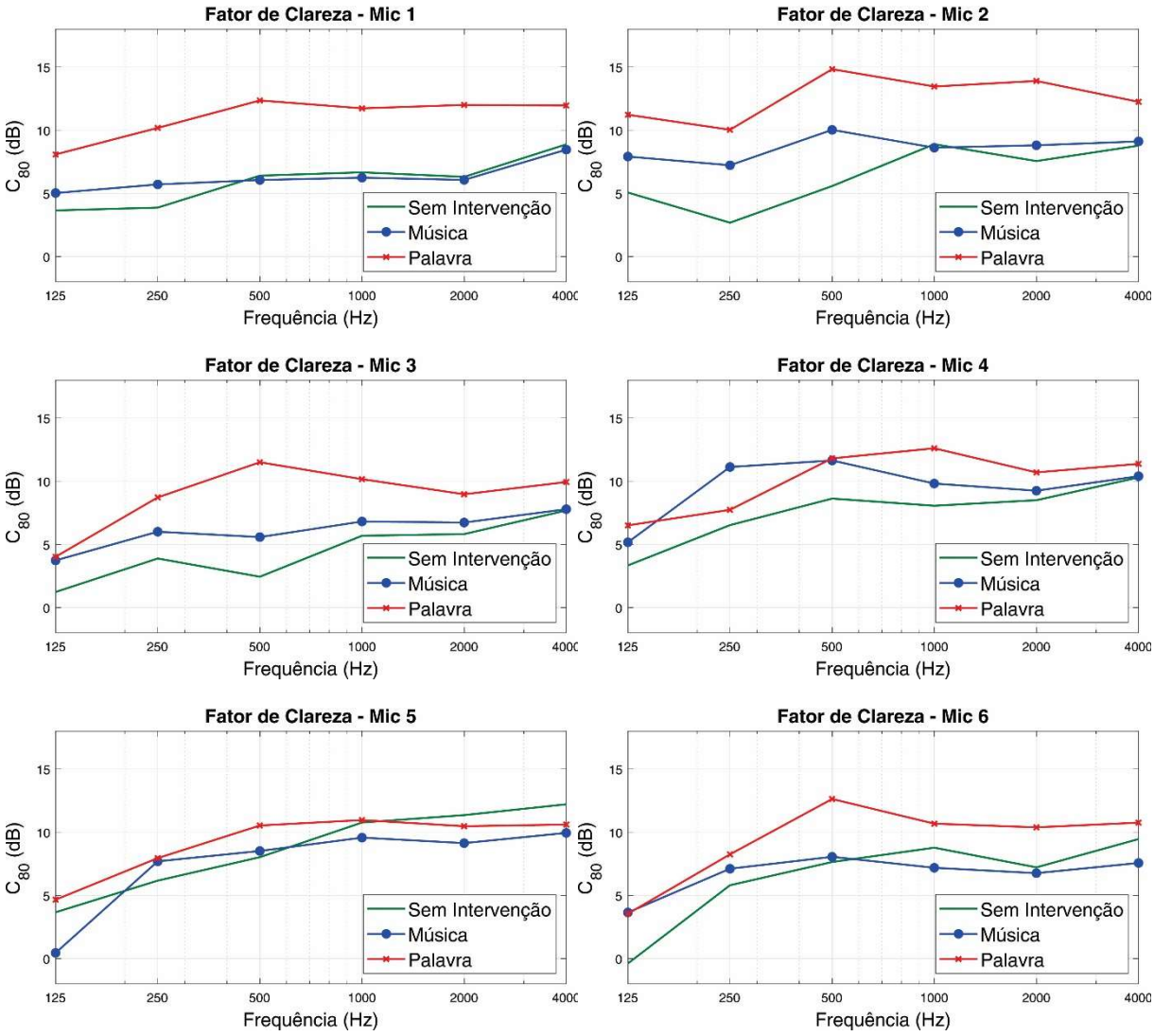
No R3, no cenário para música, houve aumento deste parâmetro em todas as frequências, exceto em 4 kHz, que se manteve igual ao da sala atual. Para palavra, houve aumento do Fator de Clareza em todas as frequências, sendo mais significativo em 500 Hz.

No R4, na configuração para música, o comportamento foi semelhante ao R3, havendo aumento em todas as frequências exceto 4 kHz, que se manteve. Na proposta para palavra houve aumento em todas as frequências, sendo mais expressivo em 1 kHz.

No R5, na proposta para música houve tênue queda da Clareza em todas as frequências exceto 250 e 500Hz, que tiveram ligeiro aumento. Na simulação para palavra, houve aumento em todas as frequências em relação à simulação para música.

O R6 apresentou, no cenário para música, aumento sutil nas baixas frequências e leve decréscimo nas altas frequências em relação à situação existente. No cenário para palavra, apresentou acréscimo em todas as frequências, em relação à situação existente.

FIGURA 4.7– C_{80} SIMULADO DA SALA EXISTENTE OCUPADA, C_{80} DA SALA COM INTERVENÇÃO PARA MÚSICA, E C_{80} COM INTERVENÇÃO PARA PALAVRA, NOS 6 RECEPTORES

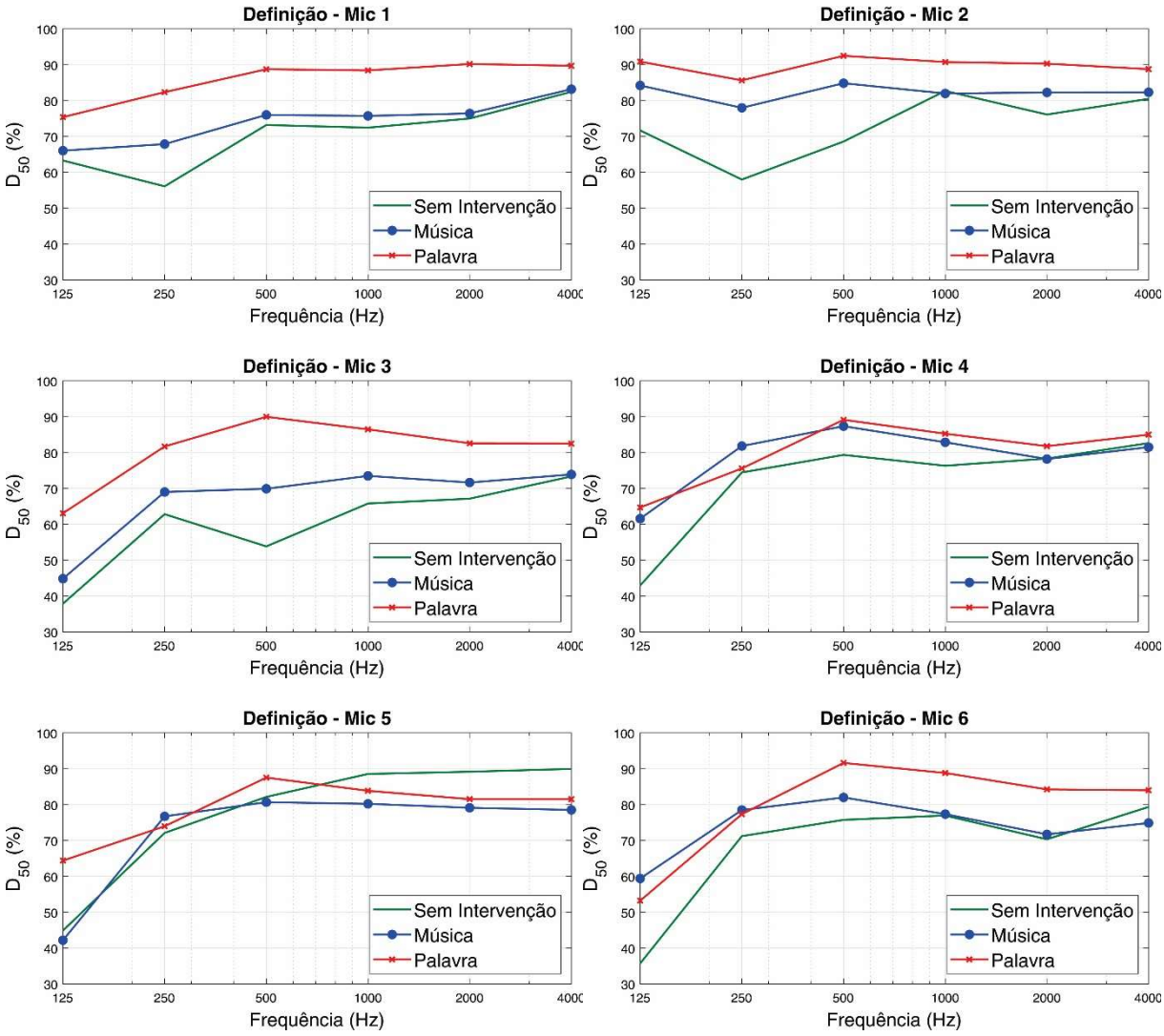


FONTE: O AUTOR

4.4 DEFINIÇÃO (D_{50})

A Figura 4.8 mostra o descritor acústico Definição D_{50} simulado da sala ocupada no estado existente, o D_{50} simulado da sala ocupada com a intervenção para música, e o D_{50} simulado da sala ocupada com a intervenção para palavra. A Definição aumentou em quase todos os Receptores, na maioria das frequências, tanto para música quanto para palavra.

FIGURA 4.8 – D_{50} SIMULADO DA SALA EXISTENTE OCUPADA, D_{50} DA SALA COM INTERVENÇÃO PARA MÚSICA, E D_{50} COM INTERVENÇÃO PARA PALAVRA, NOS 6 RECEPTORES



FONTE: O AUTOR

O R1 apresentou ligeiro aumento de Definição para música em relação à situação atual da sala, e um aumento considerável para palavra, chegando a 90% neste parâmetro, aumentando muito a inteligibilidade da fala neste local.

O R2 teve aumento do D_{50} para música nas baixas frequências, mantendo-se nas altas frequências, em relação à situação existente. Para palavra, este receptor teve aumento significativo deste descritor, chegando a 90%, aumentando a inteligibilidade da fala neste local.

Já o R3 apresentou aumento do D_{50}, tanto para música quanto para palavra, em relação à situação atual da sala. Na frequência de 500Hz este parâmetro chegou a 90% para a simulação no cenário para palavra.

No R4 houve sutil aumento da Definição nas duas situações, em comparação à situação existente.

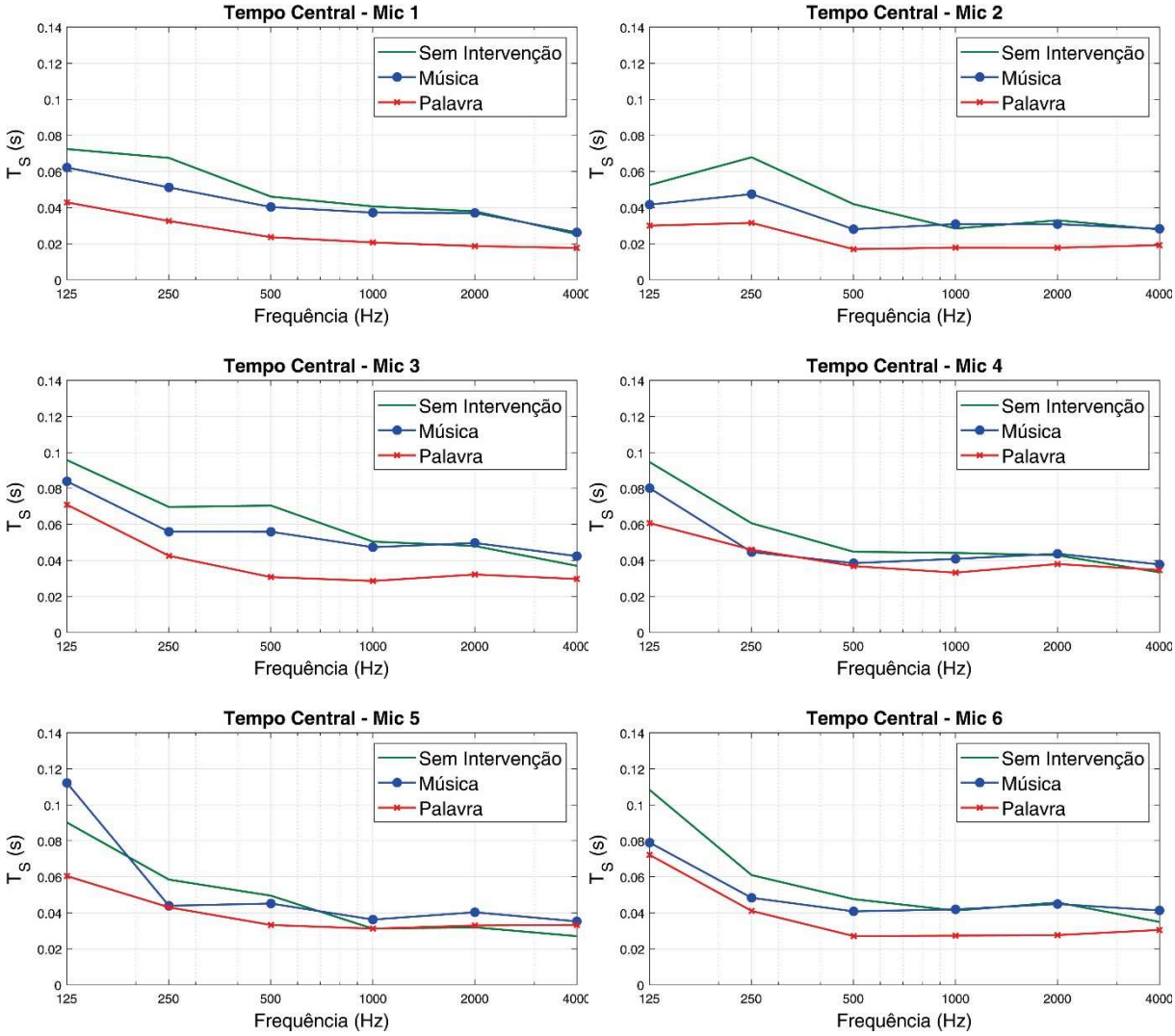
No R5, este descritor acústico se manteve nas baixas frequências para os dois cenários de simulação, havendo diminuição nas altas frequências, em relação à sala existente.

Já o R6 apresentou aumento do D_{50} nas baixas frequências, se mantendo nas altas frequências, no cenário para música, em relação à situação atual. Para palavra, houve aumento em todas as frequências, chegando a 90% nas médias frequências.

4.5 TEMPO CENTRAL (TC)

A Figura 4.9 mostra o descritor acústico Tempo Central simulado da sala ocupada no estado existente, o TC simulado da sala ocupada com a intervenção para música, e o TC simulado da sala ocupada com a intervenção para palavra.

FIGURA 4.9 – TC SIMULADO DA SALA EXISTENTE OCUPADA, TC DA SALA COM INTERVENÇÃO PARA MÚSICA, E TC COM INTERVENÇÃO PARA PALAVRA, NOS 6 RECEPTORES



FONTE: O AUTOR

Na maioria dos casos o TC diminuiu em relação ao existente. Da mesma forma que os valores de TR para palavra diminuíram em relação à música, isto também ocorre com o TC.

Os receptores R1, R2, R3, R4 e R6 tiveram comportamento semelhante quanto ao parâmetro Tempo Central: houve ligeira queda nas baixas e médias frequências na simulação da proposta para música, e para palavra, houve queda em todas as frequências em relação à situação atual, para ambos os receptores.

Já o R5 apresentou TC oscilante para música em relação à sala existente, enquanto para palavra teve ligeira diminuição nas baixas frequências e 500Hz, mantendo-se nas altas frequências.

4.6 TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT)

O parâmetro EDT foi o que teve maiores variações entre os receptores e entre os cenários (música e palavra), e em geral este parâmetro teve seus valores reduzidos em relação ao estado atual da sala. O Receptor 5 destoou, havendo aumento do EDT neste Receptor em quase todas as frequências na sala configurada para música.

No R1, na proposta para música, é possível concluir que o EDT apresentou queda nas frequências, 125 Hz, 500 Hz, 500 Hz e 2 kHz, e se manteve o mesmo em 1 kHz e 4 kHz. Nessa configuração, o maior valor desse parâmetro se manteve na frequência de 1 kHz, enquanto o menor valor passou a ser na frequência de 500 Hz. Para palavra, houve queda em todas as frequências no R1, ficando o maior valor na frequência de 125 Hz. As frequências médias e altas ficaram com valores semelhantes.

No receptor R2, na configuração para música, houve queda do EDT nas baixas frequências, em 500 Hz e 2kHz, enquanto o EDT se manteve nas frequências 1kHz e 4kHz, em relação à situação atual. Na configuração para palavra, houve queda em todas as frequências em relação à situação atual.

No R3, no cenário para música, é possível visualizar queda do EDT nas frequências 250, 500 e 1 kHz, aumento na frequência de 125 Hz, enquanto os valores permaneceram os mesmos nas altas frequências. Na configuração para palavra, observa-se diminuição deste parâmetro em todas as frequências, havendo maior diminuição em 250, 500 e 1 kHz.

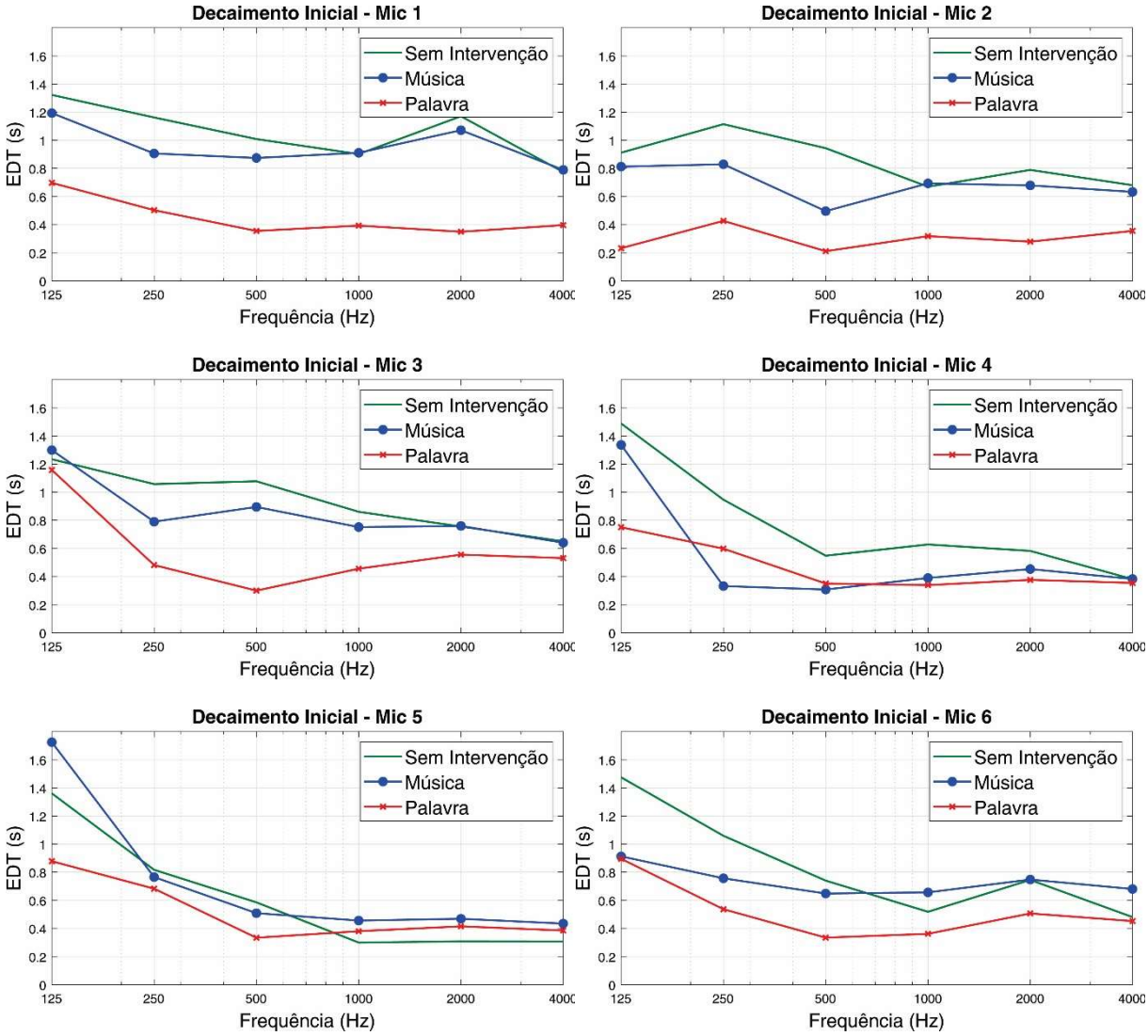
Para o R4, na proposta para música, houve diminuição do EDT em todas as frequências exceto 4 kHz, que se manteve. A maior queda deste parâmetro nesta configuração foi na frequência de 250 Hz. Na configuração para palavra o EDT sofreu queda nas mesmas frequências que no cenário para música, sendo o maior decréscimo na frequência de 125 Hz. Na frequência de 4 kHz o EDT se manteve igual ao da sala atual sem intervenção.

O R5 teve aumento do EDT na configuração para música nas frequências 125Hz, 1kHz, 2kHz e 4kHz, e ligeira queda em 250Hz e 500Hz, em relação à situação existente. Para palavra, ocorreu queda nas baixas frequências e 500Hz, e tênue aumento nas altas frequências e 1kHz.

O R6 apresentou EDT no cenário para música com queda nas baixas frequências, igual em 2kHz, e ligeiro aumento em 1kHz e 4kHz, em relação à situação atual. Para palavra, o EDT diminuiu em todas as frequências nesse receptor em relação à situação atual, exceto em 4kHz, que se manteve.

A Figura 4.10 apresenta o parâmetro acústico Tempo de Decaimento Inicial (EDT) simulado da sala ocupada no estado existente, o EDT simulado da sala ocupada com a intervenção para música, e o EDT simulado da sala ocupada com a intervenção para palavra.

FIGURA 4.10 – EDT SIMULADO DA SALA EXISTENTE OCUPADA, EDT DA SALA COM INTERVENÇÃO PARA MÚSICA, E EDT COM INTERVENÇÃO PARA PALAVRA, NOS 6 RECEPTORES



FONTE: O AUTOR

4.7 CALOR OU RAZÃO DE GRAVES (BR - *BASS RATIO*)

- **Música**

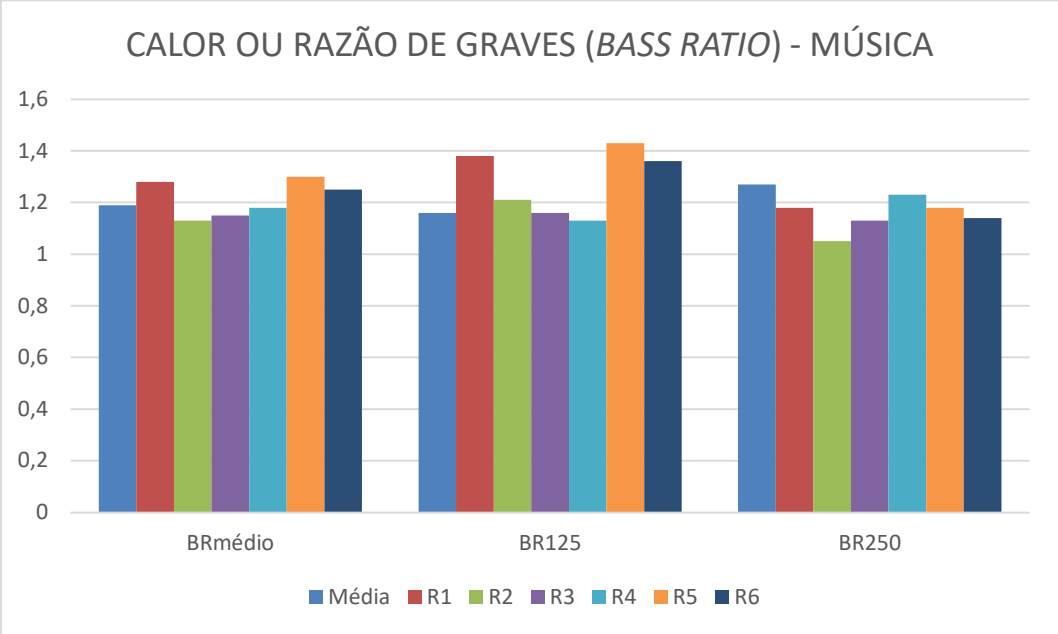
Na intervenção para música, os resultados obtidos do parâmetro Calor são apresentados na Tabela 4.3, de acordo com os critérios de classificação descritos no Capítulo 2. A Figura 4.11 apresenta o gráfico comparativo do Calor para música, por receptor e por frequência.

TABELA 4.3 – CALOR NA INTERVENÇÃO PARA MÚSICA

Receptores	Média	R1	R2	R3	R4	R5	R6
$BR_{médio}$	1,19	1,28	1,13	1,15	1,18	1,30	1,25
Classificação	Excelente	Excelente	Bom	Bom	Bom	Excelente	Excelente
BR_{125}	1,16	1,38	1,21	1,16	1,13	1,43	1,36
Classificação	Bom	Excelente	Bom	Bom	Bom	Excelente	Excelente
BR_{250}	1,27	1,18	1,05	1,13	1,23	1,18	1,14
Classificação	Excelente	Bom	Regular	Bom	Excelente	Excelente	Excelente

FONTE: O AUTOR

FIGURA 4.11 – GRÁFICO CALOR NA INTERVENÇÃO PARA MÚSICA



FONTE: O AUTOR

Os receptores com os melhores resultados do parâmetro Calor, na configuração para música, são R5 e R6, com todos os valores “excelentes”; em seguida R1, R4, R3 e R2. O resultado menos favorável foi para o R2, que teve

a única classificação “regular”, para o BR_{125}. A média teve um resultado muito favorável, com duas classificações de Calor “excelente” e uma classificação de calor “bom”.

- **Palavra**

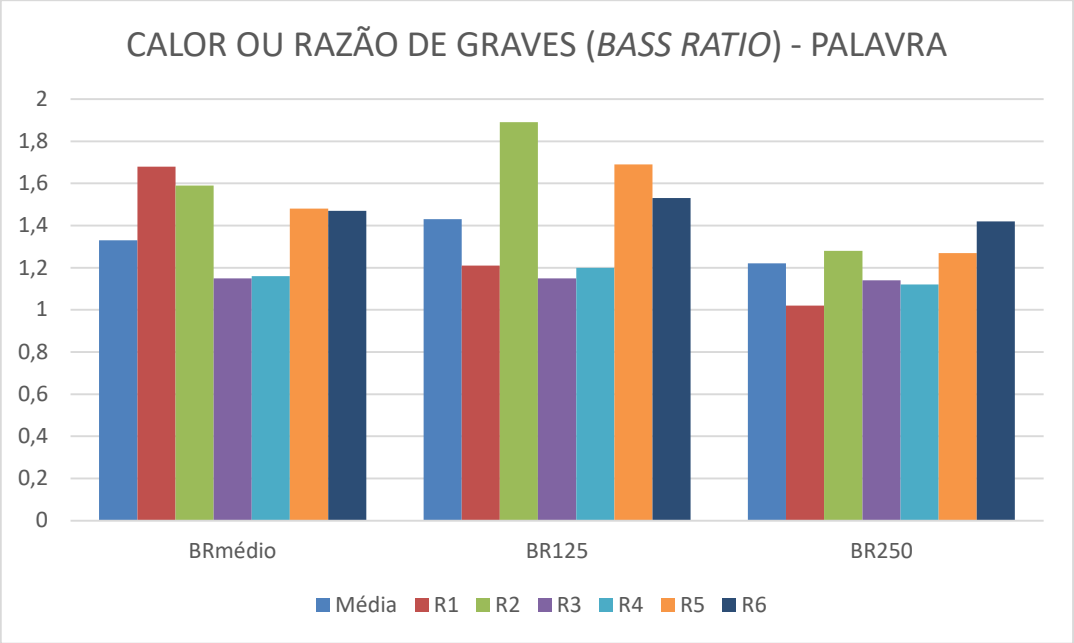
Na intervenção para palavra, os resultados obtidos do parâmetro Calor são apresentados na Tabela 4.4, de acordo com os critérios de classificação descritos no Capítulo 2. A Figura 4.12 apresenta o gráfico comparativo do Calor para palavra, por receptor e por frequência.

TABELA 4.4 – CALOR NA INTERVENÇÃO PARA PALAVRA

Receptores	Média	R1	R2	R3	R4	R5	R6
$BR_{médio}$	1,33	1,68	1,59	1,15	1,16	1,48	1,47
Classificação	Excelente	Excelente	Excelente	Bom	Bom	Excelente	Excelente
BR_{125}	1,43	1,21	1,89	1,15	1,20	1,69	1,53
Classificação	Excelente	Bom	Excelente	Bom	Bom	Excelente	Excelente
BR_{250}	1,22	1,02	1,28	1,14	1,12	1,27	1,42
Classificação	Excelente	Regular	Excelente	Excelente	Bom	Excelente	Excelente

FONTE: O AUTOR

FIGURA 4.12 – GRÁFICO CALOR NA INTERVENÇÃO PARA PALAVRA



FONTE: O AUTOR

Os receptores com os melhores resultados para Calor na configuração para palavra são R2, R5 e R6, todos com classificação “excelente” nos três valores. A média também teve classificação dos três valores como “excelente”. O resultado menos favorável foi no R1, que teve classificação “regular” no BR_{250}.

4.8 BRILHO OU RAZÃO DE AGUDOS (*TR – TREBLE RATIO*)

- **Música**

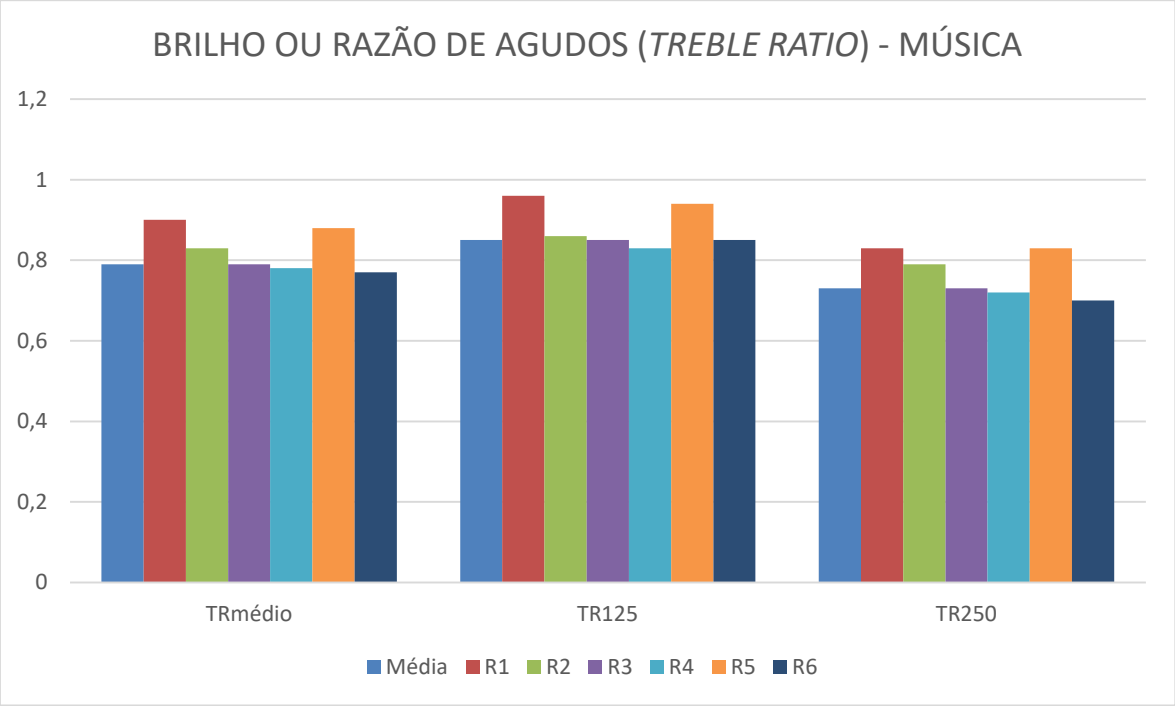
Na intervenção para música, os resultados obtidos do parâmetro Brilho são apresentados na Tabela 4.5. A Figura 4.13 apresenta o gráfico comparativo do Brilho para música, por receptor e por frequência.

TABELA 4.5 – BRILHO NA INTERVENÇÃO PARA MÚSICA

Receptores	Média	R1	R2	R3	R4	R5	R6
$TR_{médio}$	0,79	0,90	0,83	0,79	0,78	0,88	0,77
TR_{125}	0,85	0,96	0,86	0,85	0,83	0,94	0,85
TR_{250}	0,73	0,83	0,79	0,73	0,72	0,83	0,70

FONTE: O AUTOR

FIGURA 4.13 – GRÁFICO BRILHO NA INTERVENÇÃO PARA MÚSICA



FONTE: O AUTOR

Os valores médios de Brilho para música em todos os receptores foram 0,85 em 125Hz, 0,73 em 250Hz, e 0,79 na média. O Receptor 1 obteve o maior valor médio de *Treble Ratio* (0,90), enquanto o Receptor 6 obteve o menor valor médio deste parâmetro (0,77). Na frequência de 125 Hz, o maior valor foi do R1 (0,96), e na frequência de 250Hz o maior valor foi dos Receptores 1 e 5 (0,83). O menor valor de Brilho na frequência de 125Hz foi do R4 (0,83), na frequência de 250Hz foi do R6 (0,70).

- **Palavra**

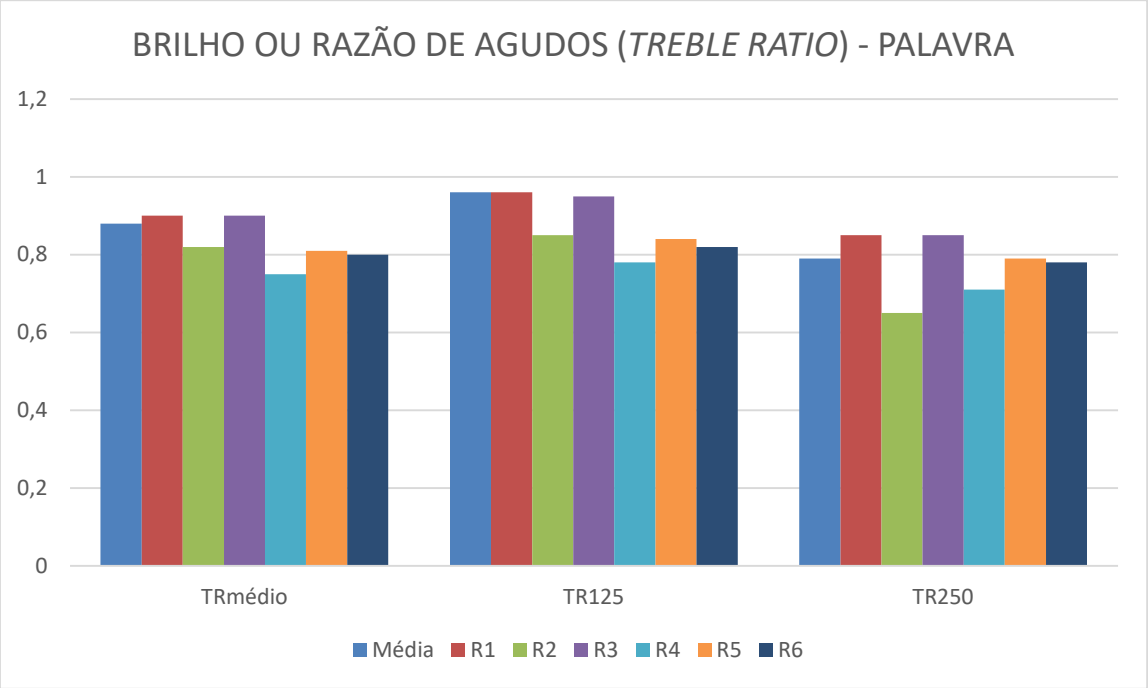
Na intervenção para palavra, os resultados obtidos do parâmetro Brilho são apresentados na Tabela 4.6. A Figura 4.14 apresenta o gráfico comparativo do Brilho para palavra, por receptor e por frequência.

TABELA 4.6 – BRILHO NA INTERVENÇÃO PARA PALAVRA

Receptores	Média	R1	R2	R3	R4	R5	R6
$TR_{médio}$	0,88	0,90	0,82	0,90	0,75	0,81	0,80
TR_{125}	0,96	0,96	0,85	0,95	0,78	0,84	0,82
TR_{250}	0,79	0,85	0,65	0,85	0,71	0,79	0,78

FONTE: O AUTOR

FIGURA 4.14 – GRÁFICO BRILHO NA INTERVENÇÃO PARA PALAVRA



FONTE: O AUTOR

Os valores médios de Brilho para palavra em todos os receptores foram 0,96 em 125Hz, 0,79 em 250Hz, e 0,88 na média. O Receptor 1 e o Receptor 3 obtiveram o maior valor médio de *Treble Ratio* (0,90), enquanto o Receptor 4 obteve o menor valor médio deste parâmetro (0,75). Na frequência de 125 Hz, o maior valor foi do R1 (0,96), e na frequência de 250Hz o maior valor foi dos Receptores 1 e 3 (0,85). O menor valor de Brilho na frequência de 125Hz foi do R4 (0,78), na frequência de 250Hz foi do R2 (0,65).

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentado método de medições e simulações acústicas, para avaliação e adequação acústica de salas de espetáculo, com aplicação no Teatro Armando Gonzaga, Rio de Janeiro. A sala foi simulada com o *software* BRASS (*Brazilian Room Acoustic Simulator*), de forma a mostrar duas configurações com elementos arquitetônicos ajustáveis, uma para o uso da palavra, e outra para uso da música acústica. Os resultados apresentam parâmetros acústicos e gráficos, caracterizando a acústica da sala existente e das duas novas configurações possíveis simuladas. A sala no estado atual encontra-se mais adequada para uso da música acústica, portanto as simulações de intervenções arquitetônicas foram mais significativas para o uso da palavra, que requer menor tempo de reverberação.

Considerando o estado da arte da pesquisa acústica, a simulação acústica deve ser conceituada como ferramenta essencial para o projeto de auditórios, teatros e salas de espetáculos. Esses programas permitem integrar a avaliação de desempenho ao processo de concepção e desenvolvimento de projetos tanto para modelagem da forma quanto para especificação e detalhamento de elementos de controle da distribuição sonora (reflexão, difusão e absorção). Tais benefícios aumentam nos países em desenvolvimento devido às restrições de custo. É essencial a atuação do projetista de acústica, principalmente em projetos especiais com grandes exigências de qualidade sonora, desde o início do processo do projeto, durante a determinação de implantação e na localização dos ambientes, assim como na escolha da forma e dos materiais.

No entanto, é essencial que a disciplina de acústica seja considerada desde o início do processo, enquanto o universo de soluções projetuais ainda está em aberto. Decisões relativas à implantação, setorização e volumetria de salas de espetáculo e espaços de apoio devem ser discutidas com o projetista, evitando a criação de problemas complexos de correção ou de custo elevado.

Em bens de valor patrimonial, histórico ou arquitetônico, a metodologia utilizada nesta dissertação é fundamental porque possibilita a experimentação com diferentes materiais e suas disposições, podendo apresentar um bom desempenho acústico associado a formas adequadas, que respeitem as características originais do edifício e as restrições morfológicas e construtivas impostas pelos órgãos de tutela.

O BRASS é uma ferramenta em desenvolvimento que revelou grande potencial para aplicação em projetos de arquitetura e pode ser um instrumento muito favorável para simulações acústicas, apresentando parâmetros acústicos diversificados, bem como arquivos de áudio que descrevem o “som” da sala muito próximo da realidade. Como os arquivos gerados pelo BRASS são todos em formato texto, com formatação e organização de dados simples, a utilização de programas, como o Matlab, ou outras ferramentas, permite elaborar gráficos de análise comparativa dos resultados das medições e das simulações das intervenções para diferentes configurações da sala.

No Teatro Armando Gonzaga, os objetivos deste trabalho foram: Geral: avaliar e propor adequações acústicas no Teatro Armando Gonzaga através de simulação computacional; Específicos: 1) diagnosticar os principais fatores que influenciam na qualidade acústica do espaço interno do Teatro; 2) utilizar um método de análise de parâmetros acústicos do Teatro com o uso do simulador acústico BRASS; 3) apresentar soluções ajustáveis para a correção

dos parâmetros acústicos do Teatro, utilizando o BRASS – foram atingidos, de modo a viabilizar um cenário para uso da música acústica e outro para palavra, através de medições da situação atual e simulações acústicas com a utilização de painéis e tecidos móveis, com o intuito de alterar o tempo de reverberação da sala e os demais parâmetros acústicos de acordo com a necessidade. As propostas de intervenções ajustáveis alcançaram resultados mais adequados para os dois cenários (música acústica e palavra), em relação à situação existente da sala.

Nesse contexto, a metodologia aplicada ao Teatro Armando Gonzaga pode ser aplicada a teatros de pequeno ou médio porte, onde seja necessário obter um compromisso satisfatório para o desempenho de música e fala.

• PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, é sugerida a utilização de programas BIM (*Building Information Model*), como Revit e Archicad. Na interação entre os programas BIM com o BRASS as informações acústicas dos materiais, fontes e receptores poderiam ser diretamente associadas ao modelo geométrico, assim como as demais informações já são feitas neste tipo de *software* (custo, tempo de execução etc.).

Outra sugestão seria trabalhar mais parâmetros acústicos não trabalhados nesta dissertação, incluindo parâmetros relacionados à espacialidade, à performance dos músicos, e à inteligibilidade da fala, bem como o isolamento sonoro do teatro, que não foi aprofundado.

Também seria pertinente aplicação de pesquisas dos parâmetros acústicos subjetivos para músicos e não músicos, de maneira a avaliar a qualidade do espaço musical, aliadas às simulações com os parâmetros acústicos objetivos. Ao invés de microfones monofônicos, poderiam ser utilizadas cabeças artificiais nas medições, que proporcionam percepção binaural do espaço sonoro.

BIBLIOGRAFIA

ASPÖCK, Lukas; PELZER, Sönke; WEFERS, Frank; VORLÄNDER, Michael. **A Real-Time Auralization Plugin for Architectural Design and Education**. In: EAA Joint Symposium on Auralization and Ambisonics. Berlin, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.152: Acústica – Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 12.179: Tratamento acústico em recintos fechados – procedimento**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.313: Acústica – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 3382-1: Acústica – Medição de parâmetros de acústica de salas. Parte 1 – Salas de espetáculos**. Rio de Janeiro, 2017.

BERANEK, Leo. **The Acoustic Design of Concert Halls**. Cambridge, 1994.

_____. **Concert and Opera Hall: How They Sound**. In: Acoustical Society of America: Woodburry, 1996.

BERZBORN, Marco; BOMHARDT, Ramona; KLEIN, Johannes; RICHTER, JanGerrit; VORLÄNDER, Michael. **The ITAToolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing**. In: 43RD ANNUAL GERMAN CONGRESS ON ACOUSTICS. KIEL, 2017. Disponível em: http://publications.rwth-aachen. de/record/687308.

BONDUKI, N. (Org.). **Affonso Eduardo Reidy**. Editorial Blau: Lisboa, 1999.

BRANDÃO, Eric. **Acústica de salas – projeto e modelagem**. Editora Blucher: São Paulo, 2016.

BRUAND, Yves. **Arquitetura contemporânea no Brasil**. Editora Perspectiva: São Paulo. 2010.

CARVALHO, Benjamin. **Acústica aplicada à arquitetura**. Livraria Freitas Bastos: Rio de Janeiro, 1967.

CARVALHO, Régio Paniago. **Acústica Arquitetônica**. Editora Thesaurus: Brasília, 2010.

CARVALHO, Renato S. Thiago. **Modelo físico de Huygens na solução discretizada de campos acústicos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

CAVALCANTI, Lauro. **Quando o Brasil era moderno. Guia de Arquitetura 1928-1960**. Editora Aeroplano: Rio de Janeiro, 2001.

COSTA, Ennio Cruz. **Acústica técnica**. Editora Blucher: São Paulo, 2003.

DO VALLE, Solon. **Manual prático de acústica**. Editora Música e Tecnologia: Rio de Janeiro, 2009

EVEREST, F. Alton. **The master handbook of acoustics**. Tab Books: EUA, 1989.

INSTITUTO ESTADUAL DO PATRIMÔNIO CULTURAL (INEPAC). Ofício Nº 1171. **Registro de imóveis referente ao tombamento do Teatro Armando Gonzaga**. Rio de Janeiro, 12 de julho de 1989.

FIGUEIREDO, Fábio Leão; MASIERO, Bruno; IAZZETTA, Fernando. **Análise de parâmetros acústicos subjetivos: critérios para avaliação da qualidade acústica de salas de música**. In: 4ta. Reunion anual de la

sociedad argentina para las ciencias cognitivas de la música. Universidad Nacional de Tucuman. Instituto Superior de Música, 2004.

_____. **Parâmetros acústicos subjetivos: critérios para avaliação da qualidade acústica de salas de música**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, 2005.

HAK, R. H. C.; WENMAEKERS, L. C. J.; VAN LUXEMBURG C. C. J. M. **Measuring Room Impulse Responses: Impact of the Decay Range on Derived Room Acoustic Parameters**. In: Acta Acustica united with Acustica, vol. 98, nº 6, pp. 907–15, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.3813/ AAA.918574.

HARRIS, Cyril M. **Absortion of Sound in Air versus Umidity and Temperature**. In: National Aeronautics and Space Administration. Washington, 1967.

JORNAL O GLOBO. **Cenário dramático**. In: Segundo Caderno. Rio de Janeiro, 25 de maio de 1998.

LIMA, Álvaro José Rodrigues. **A arquitetura social de Affonso Eduardo Reidy: O Teatro Armando Gonzaga em Marechal Hermes**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.

NEPOMUCENO, José Augusto. **O projeto acústico.** Site Sala São Paulo. Sem data. Acesso em abril/2019. Disponível em: < http://www.salasaopaulo.art.br/paginadinamica.aspx?pagina=acustica>

NIEMEYER, Maria Lygia. **Ruído urbano e arquitetura em clima tropical-úmido**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro,1998.

_____. **Conforto acústico e térmico, em situação de verão, em ambiente urbano: uma proposta metodológica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

INSTITUTE OF TECHNICAL ACOUSTICS, RWTH AACHEN UNIVERSITY, GERMANY. **Site omnidaff.org**. Acesso em fevereiro/2020. Disponível em http://www.opendaff.org/share/doc/html/index.html

KARJALAINEN M.; ANTSALO, P.; MÄRKIVIRTA, A.; PELTONEN, T.; V., VÄLIMÄKI. **Estimation of Modal Decay Parameters from Noisy Response Measurements**. IN: Journal of Audio Eng. Soc., vol. 50, nº 11, pp. 867–78, 2002. Disponível em: http://www.aes.org/journal/sample_issue/ JAES_V50_11_PG867.pdf.

OWA Brasil Prod. Acust. Ind. Imp. Exp. Ltda. **Catálogo de produtos OWA Nexacustic Wood Design**. Diadema, 2019.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. **Ofício nº 27: Tombamento definitivo do painel em mosaicos cerâmicos de autoria do artista Paulo Werneck no Teatro Popular Armando Gonzaga**. Rio de Janeiro: 2015.

REIS, Thalles Costa. **Articulação de ferramentas computacionais para avaliação acústica: a Igreja Batista Itacuruçá**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

SCHMID, Aloísio L. **Adequação acústica dos espaços para a música. Seleção de exemplos históricos de música e arquitetura como apoio à aprendizagem**. In: Arquitextos, ano 12, vol. 135, nº 04. Vitruvius: São Paulo 2011.

SILVA, Pérides. **Acústica arquitetônica e condicionamento de ar**. Empresa Termo Acústica LTDA: Belo Horizonte, 2011.

TENENBAUM, Roberto Aizik; CAMILO, Thiago Schaaf. **Método híbrido para simulação numérica de acústica de salas: teoria, implantação computacional e validação experimental**. I Seminário Música Ciência Tecnologia: Acústica Musical. Instituto Militar de Engenharia e Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

_____; VASCONCELLOS, Lenine. **Sobre a influência do teto móvel na qualidade acústica da Sala São Paulo**. I Seminário Música Ciência Tecnologia: Acústica Musical. Instituto Militar de Engenharia e Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

_____, CAMILO TS, TORRES JCB, Gerges SNY. **Hybrid Method for Numerical Simulation of Room Acoustics with Auralization: Part 2 - Validation of the Computational Code Raios 3**. In: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 29, pp. 222–31, 2007.

TISSEYRE, Alain. **Concert Halls and Opera Houses – Acoustic Design**. Escourbiac: 2009.

TORRES, J. C. B. **BRASS - Brazilian Room Acoustic Simulator**. XXVIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. Porto Alegre, 2018.

VENTURI, Andrea; FARINA, Angelo; TRONCHIN, Lamberto. **On the Effects of Pre-Processing of Impulse Responses in the Evaluation of Acoustic Parameters on Room Acoustics**. In: International Congress on Acoustics, (ICA). Montréal, 2013.

VESCOM B. V. **Marmara 8025. Test Report no. 207872.1.R. Int. Nr. 617.5753, EMPA**. Alemanha, 2011.

VORLÄNDER, Michael. **Performance of Computer Simulations for Architectural Acoustics**. In: Proceedings of 20th International Congress on Acoustics. Sydney, ICA 2010.

_____; SCHRÖDER, Dirk; PELZER, Sönke; WEFERS, Frank. **Virtual Reality for Architectural Acoustics**. Journal of Building Performance Simulation. Londres, 2014.

VORLÄNDER, Michael. **Die genauigkeit von berechnungen mit dem raumakusti-schen schallteilchenmodell und ihre abhängigkeit von der rechenzeit"("the accuracy of calculations using the room acoustical ray-tracing-model and its dependence on the calculation time")**. In: International Journal on Acoustics, vol. 66, nº 2, pp. 90–6, 1988.

VORLÄNDER, Michael. **Acústica virtual – tecnologia e aplicações**. XXV Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. Campinas, 2014.

VORLÄNDER, Michael. **Models and Algorithms for Computer Simulations in Room Acoustics**. In: International Seminar on Virtual Acoustics. Valencia, 2011.

WEGST, Ulrike G. K. **Wood for Sound**. In: American Journal of Botany, vol. 93, nº 10, pp. 1439–48. EUA, 2006.

ANEXO I – MATÉRIA DO JORNAL “O GLOBO”, 25/05/2018

CENÁRIO DRAMÁTICO

FOTOS DE MARCOS DE PAULA

TEATRO ARMANDO GONZAGA

PROBLEMAS: Sala de espetáculos sofre efeitos de um alagamento no ano passado. **PROMESSAS:** Conserto das bombas e instalação de tubulação, diz Nelson Freitas, da fundação estadual que administra os teatros.

MARCOS RAMOS

TEATRO VILLA-LOBOS

PROBLEMA: A situação mais grave, e o único teatro fechado. Destruído por um incêndio em 2011, virou depósito de lixo e abrigo para moradores de rua. **PROMESSA:** Estado lançará edital de 'naming rights', chamando as empresas interessadas em associar seu nome ao equipamento, com o compromisso de reconstruí-lo, com auxílio de leis de incentivo fiscal. A cessão seria por dez anos, renováveis.

Teatros municipais e estaduais do Rio sofrem com falta de manutenção. Seis dos 19 enfrentam dificuldades graves, como vazamentos, inundações e problemas elétricos

Paula Autran
paula.autran@oglobo.com.br

Independentemente do que possa estar em cartaz, o cenário é mais ou menos o mesmo em seis dos 19 teatros públicos da cidade do Rio. Vazamentos, infiltrações, ferragens à mostra, problemas elétricos e cheiro de mofo. Dos seis, cinco estão entre os oito da rede estadual, sendo que um deles, o Villa-Lobos, nem poderia mais ser considerado como tal, embora continue aparecendo no site da Secretaria estadual de Cultura como "de grande porte, com confortável plateia". Ali consta que o imóvel vem sendo restaurado desde 2014, mas o que se vê atrás dos tapumes não passa de um monte de escombros, desde um incêndio, em 2011. Fora este, todos estão abertos. Na rede municipal, os problemas são menos graves, mas também incomodam. Em comum na grande maioria, manutenção inadequada, instalações ultrapassadas e falta de equipamentos.

Os piores problemas estão nos teatros mais afastados do circuito Zona Sul-Centro. Em Marechal Hermes, na Zona Norte, o Armando Gonzaga teve situação agravada no segundo semestre de 2017, por causa de um temporal que inundou a sala de espetáculos. Foi preciso abrir um buraco no chão para escoar o aguaceiro, mas o cheiro de mofo não saiu. Fora isso, um camarim está interditado há quase quatro meses por causa de uma infiltração. Tudo isso num prédio tombado, com projeto de Affonso Eduardo Reidy e jardins de Burle Marx.

— Está virando um caso de defesa civil — diz uma fonte ligada ao teatro, sem se identificar.

Em Campo Grande, na Zona Oeste, o Arthur Azevedo também sofre efeitos de uma chuva forte, que provocou transbordamento no interior do prédio. As telhas estão quebradas e remendadas com lona. Já o Mário Lago, na Vila Kennedy, também na Zona Oeste, chegou a ser fechado por não se enquadrar nas regras de segurança contra incêndio, depois da tragédia na Boate Kiss, em Santa Maria (RS), em fevereiro de 2013, e sofre com problemas de segurança por estar em uma zona considerada de risco. Hoje precisa de reformas emergenciais, incluindo adição de forro ao telhado, para que o ar condicionado possa dar vazão.

ESPAÇO PERDE 500 LUGARES

Mesmo no João Caetano — o mais antigo teatro da cidade, aberto em 1813, no Centro — as coisas estão longe do ideal. Como comprovou a atriz Camila Mota, que esteve no local quando o Oficina planejava reestrear ali a histórica "O rei da vela", que acabou na Cidade das Artes.

— A gente gostaria muito que tivesse sido no João Caetano, como há 50 anos. Só que o sistema de luz deles é muito básico. Teríamos que pagar muitos equipamentos, o que é inviável para quem não tem patrocínio. Seria preciso ter muita plateia — explica ela, lembrando que, dos cerca de 1.200 lugares do teatro, aproximadamente 500 não podem ser usados porque os balcões estão fechados, também por não atender exigências do Corpo de Bombeiros, já que o guarda-corpo é muito baixo.

— Fizemos um estudo técnico, com soluções que possam atender às exigências sem tirar a visão do público. O processo já está em andamento no Corpo de Bombeiros — diz Nelson Freitas, presidente da Fundação Anita Mantuano de Artes do Estado do Rio de Janeiro/Funarj, responsável pela administração dos teatros.

Segundo ele, também estão previstos reparos emergenciais nos demais teatros. Entre eles, a instalação de uma tubulação paralela à das bombas de sucção do Armando Gonzaga, para ajudar a escoar a água; e troca das calhas do Arthur Azevedo por outras, de maior diâmetro.

— É preciso recuperar a dignidade dos teatros. É tudo urgente, mas há limitações — diz Freitas, que trabalha com orçamento de R$ 3,5 milhões, dos quais R$ 2 milhões estão contingenciados. — É até constrangedor para mim, como gestor público, falar do orçamento. O valor é ridículo.

O secretário estadual de Cultura, Leandro Monteiro, promete liberar mais R$ 1,5 milhão em edital de licitação a ser lançado no próximo dia 28, para reformas e compra de equipamentos dos três teatros em situação mais crítica, como anunciou em entrevista à coluna da Marina Caruso nesta semana.

Um caso à parte é o Villa-Lobos. Segundo Monteiro, o valor do seguro contra incêndio do imóvel foi recebido à época, antes de sua gestão, mas os R$ 6,7 milhões foram para o caixa único do estado, em vez de investidos nas obras de recuperação. Pelo orçamento inicial, elas ficariam em R$ 61,1 milhões.

— Quando cheguei ao posto, encomendei novo projeto, com teatro multiuso e sala de ensaios. O orçamento baixou para R$ 21,1 milhões — diz o secretário, que pretende reinaugurar o espaço em junho de 2019.

O projeto do secretário serve como base para a licitação que será feita em breve. A ideia é que obra e administração do teatro fiquem a cargo do grupo vencedor pelo prazo de dez anos.

Na rede municipal, a crise não é tão grave. Mas no tradicional Carlos Gomes, cujo prédio é de 1888, uma situação recente mostra como a falta de manutenção de equipamentos pode ser prejudicial. A estreia de "Suassuna — O auto do Reino do Sol", em março, teve que ser adiada para o dia seguinte, em cima da hora.

— Todas as produções têm que trazer equipamentos para que o sistema funcione bem. Mesmo com o material que alugamos, ele apresentou problemas — relembra Raphael Baeta, produtor da peça. — O elenco foi para a porta para explicar ao público o que aconteceu.

Segundo a secretária municipal de Cultura, Nilcemar Nogueira, foi criado um grupo de trabalho para analisar os contratos de prestação de serviços em vigor nos teatros da rede:

— Temos um contrato de conservação dos equipamentos, e precisamos criar esta rotina, que não existe. Nossa preocupação é que o trabalho não seja só corretivo, mas permanente. As obras e a aquisição de equipamentos entrarão no orçamento do ano que vem. ●

Leia amanhã: as experiências que estão dando certo

PROBLEMAS: Balcões interditados porque guarda-corpo é baixo. E com tela no teto porque placas estavam se descolando e ameaçavam cair.
PROMESSA: Projeto de adoquação foi enviado pelo estado e está em análise pelos Bombeiros.

CARLOS IVAN/9-4-2013

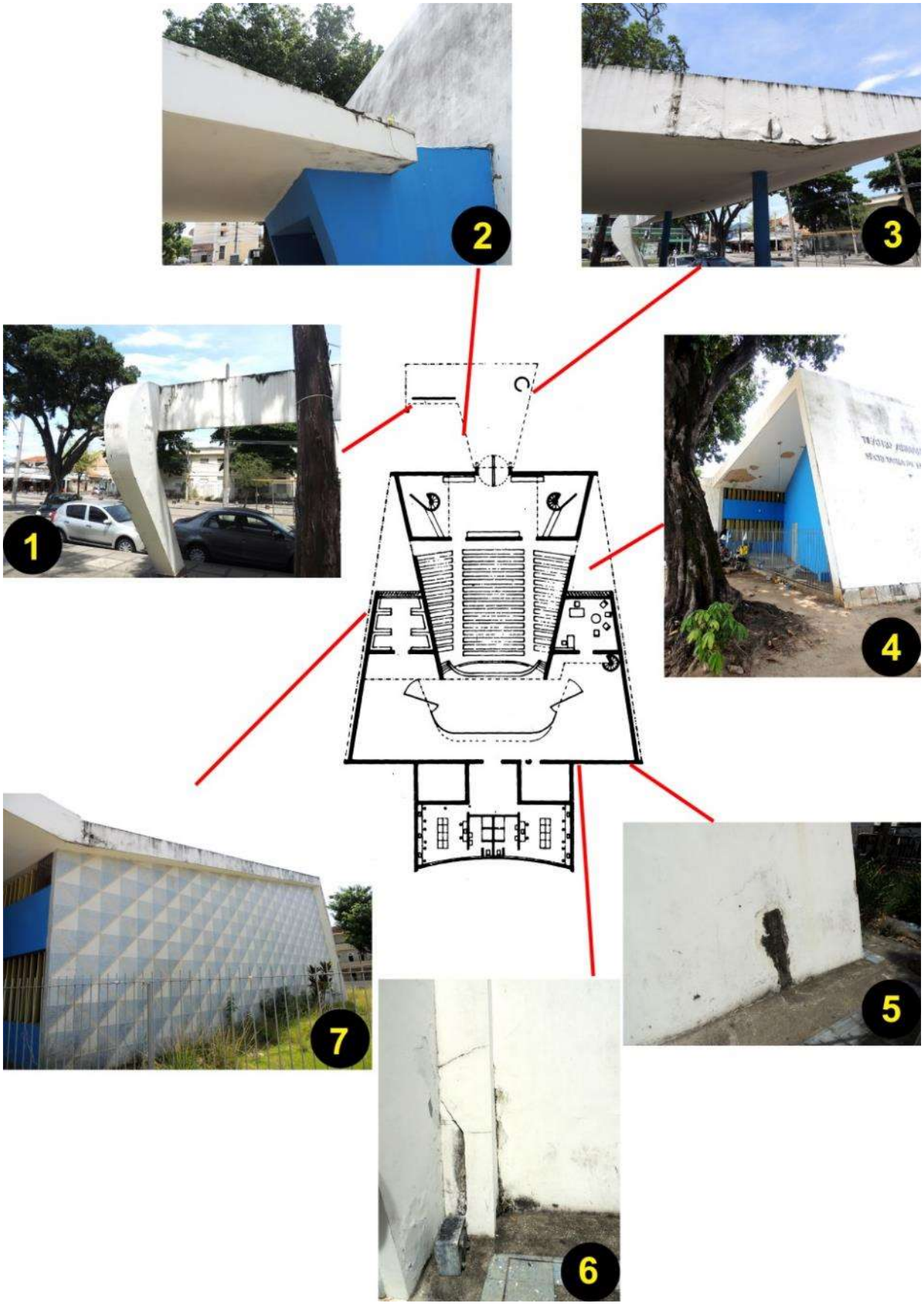
PROBLEMAS: Telhado sem telhas termo-acústicas e forro para minimizar o calor. Precisa de reparos e pintura.
PROMESSAS: Estão sendo orçadas pelo estado a revitalização da pintura e do paisagismo, além da colocação de forro.

PROBLEMAS: Calhas obstruídas e telhas quebradas, remendadas com lona para evitar goteiras.
PROMESSAS: Telhas e calhas serão trocadas para aumentar o fluxo de descida da água em caso de temporais, diz Nelson Freitas.

PROBLEMAS: Tem sistema elétrico de linha, o que aumenta a chance de descarga. E a fiação é exposta.
PROMESSA: Obras e equipamentos necessários entrarão no orçamento do município em 2019, diz a secretária Nilcemar Nogueira.

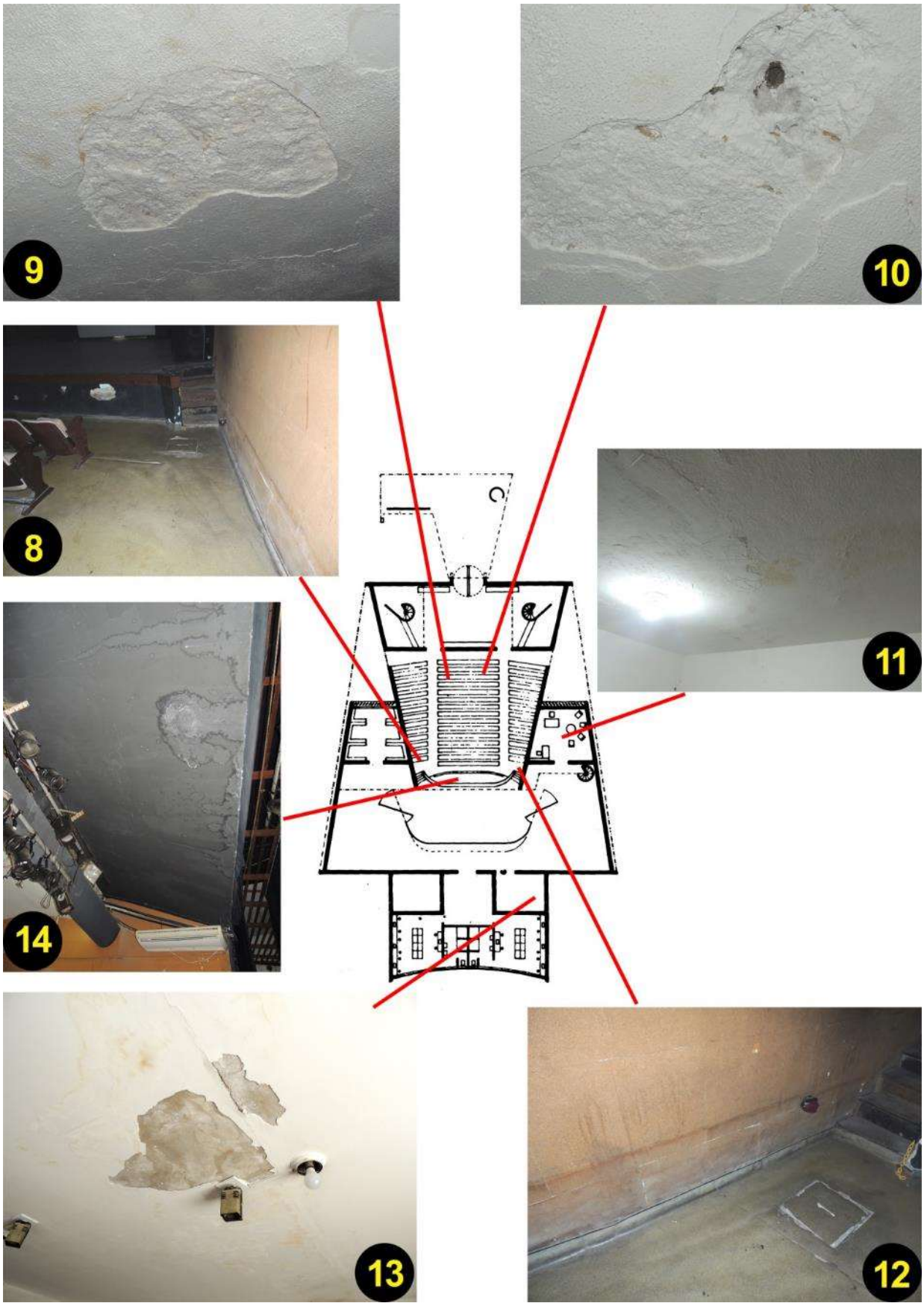
ANEXO II – MAPEAMENTO DE PATOLOGIAS CONSTRUTIVAS

PATOLOGIAS CONSTRUTIVAS EXTERNAS DO TEATRO ARMANDO GONZAGA

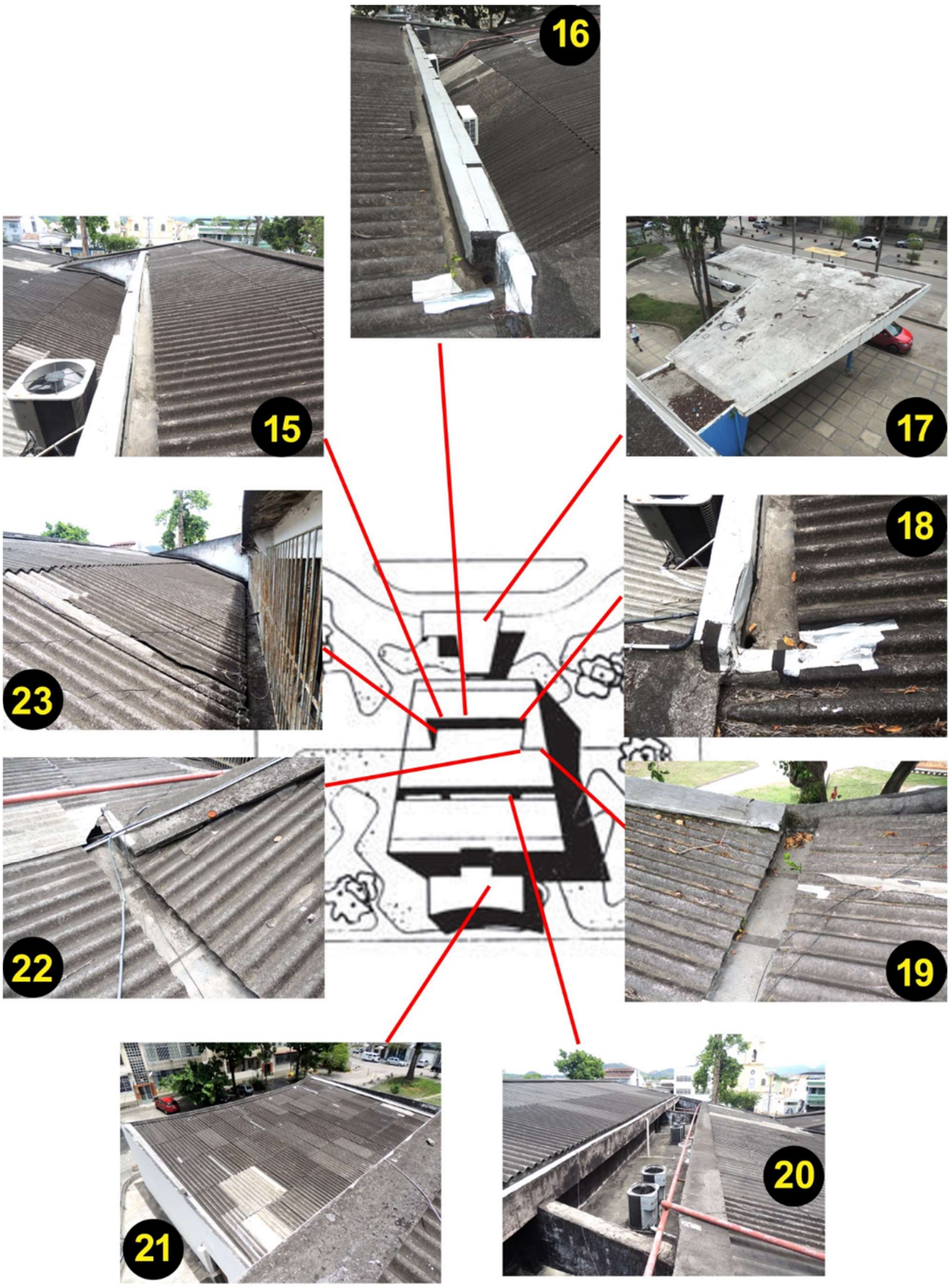


FONTE: O AUTOR

PATOLOGIAS CONSTRUTIVAS INTERNAS DO TEATRO ARMANDO GONZAGA



FONTE: O AUTOR



FONTE: O AUTOR

ANEXO III – MEDIÇÕES DE TEMPO DE REVERBERAÇÃO NA SALA

MEDIÇÕES DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS - SITUAÇÃO ATUAL DA SALA, FONTE - MICROFONE 1

FREQ (Hz)	EDT (s)	T_{20} (s)	T_{30} (s)	C_{80} (dB)	D_{50} (%)	TC (s)
63	2,741	2,777	2,940	3,520	65,700	0,207
125	1,356	3,194	2,695	2,640	64,300	0,113
250	0,887	1,132	1,402	6,630	79,200	0,040
500	1,279	1,080	1,277	5,460	72,100	0,037
1.000	1,043	1,117	1,263	6,880	82,200	0,024
2.000	1,209	1,297	1,334	7,650	82,100	0,026
4.000	1,584	1,108	1,133	9,820	88,400	0,020
8.000	0,100	0,742	0,761	14,140	94,700	0,008

FONTE: O AUTOR

MEDIÇÕES DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS - SITUAÇÃO ATUAL DA SALA, FONTE - MICROFONE 2

FREQ (Hz)	EDT (s)	T_{20} (s)	T_{30} (s)	C_{80} (dB)	D_{50} (%)	TC (s)
63	2,086	3,483	3,923	1,930	51,200	0,190
125	1,364	2,442	2,464	-2,520	27,200	0,141
250	0,551	1,382	1,522	8,850	84,000	0,043
500	1,189	1,260	1,406	4,610	65,500	0,058
1.000	1,214	1,310	1,414	2,790	49,300	0,074
2.000	1,083	1,341	1,345	3,020	34,100	0,082
4.000	1,205	1,107	1,131	3,880	53,300	0,066
8.000	0,784	0,793	0,811	5,390	43,800	0,055

FONTE: O AUTOR

MEDIÇÕES DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS - SITUAÇÃO ATUAL DA SALA, FONTE - MICROFONE 3

FREQ (Hz)	EDT (s)	T_{20} (s)	T_{30} (s)	C_{80} (dB)	D_{50} (%)	TC (s)
63	6,506	2,576	2,470	-4,490	23,300	0,404
125	2,151	2,530	2,330	-2,520	25,700	0,178
250	1,194	1,348	1,528	0,730	41,800	0,106
500	1,358	1,299	1,335	1,020	42,900	0,085
1.000	1,128	1,338	1,354	4,370	61,700	0,057
2.000	1,250	1,371	1,345	2,200	46,400	0,092
4.000	1,176	1,166	1,184	5,800	64,700	0,049
8.000	0,866	0,802	0,820	7,910	74,500	0,032

FONTE: O AUTOR

MEDIÇÕES DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS - SITUAÇÃO ATUAL DA SALA, FONTE - MICROFONE 4

FREQ (Hz)	EDT (s)	T_{20} (s)	T_{30} (s)	C_{80} (dB)	D_{50} (%)	TC (s)
63	2,949	3,777	3,731	-5,030	29,300	0,314
125	1,341	2,262	2,491	0,460	24,700	0,145
250	1,624	1,536	1,695	1,830	54,800	0,104
500	1,122	1,396	1,485	2,450	51,400	0,081
1.000	0,993	1,413	1,386	6,230	71,900	0,055
2.000	1,102	1,299	1,340	4,070	61,700	0,068
4.000	0,976	1,113	1,195	6,260	72,200	0,047
8.000	0,557	0,841	0,844	9,370	83,300	0,030

FONTE: O AUTOR

MEDIÇÕES DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS - SITUAÇÃO ATUAL DA SALA, FONTE - MICROFONE 5

FREQ (Hz)	EDT (s)	T_{20} (s)	T_{30} (s)	C_{80} (dB)	D_{50} (%)	TC (s)
63	3,685	3,765	3,336	-5,170	31,500	0,302
125	2,067	2,959	2,457	-3,780	21,400	0,202
250	0,862	1,392	1,577	5,830	66,100	0,067
500	1,212	1,253	1,418	4,570	61,000	0,074
1.000	1,202	1,275	1,420	4,660	62,500	0,068
2.000	1,205	1,242	1,334	3,760	63,200	0,071
4.000	1,030	1,133	1,157	5,770	73,500	0,051
8.000	0,754	0,855	0,847	6,870	72,100	0,043

FONTE: O AUTOR

MEDIÇÕES DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS - SITUAÇÃO ATUAL DA SALA, FONTE - MICROFONE 6

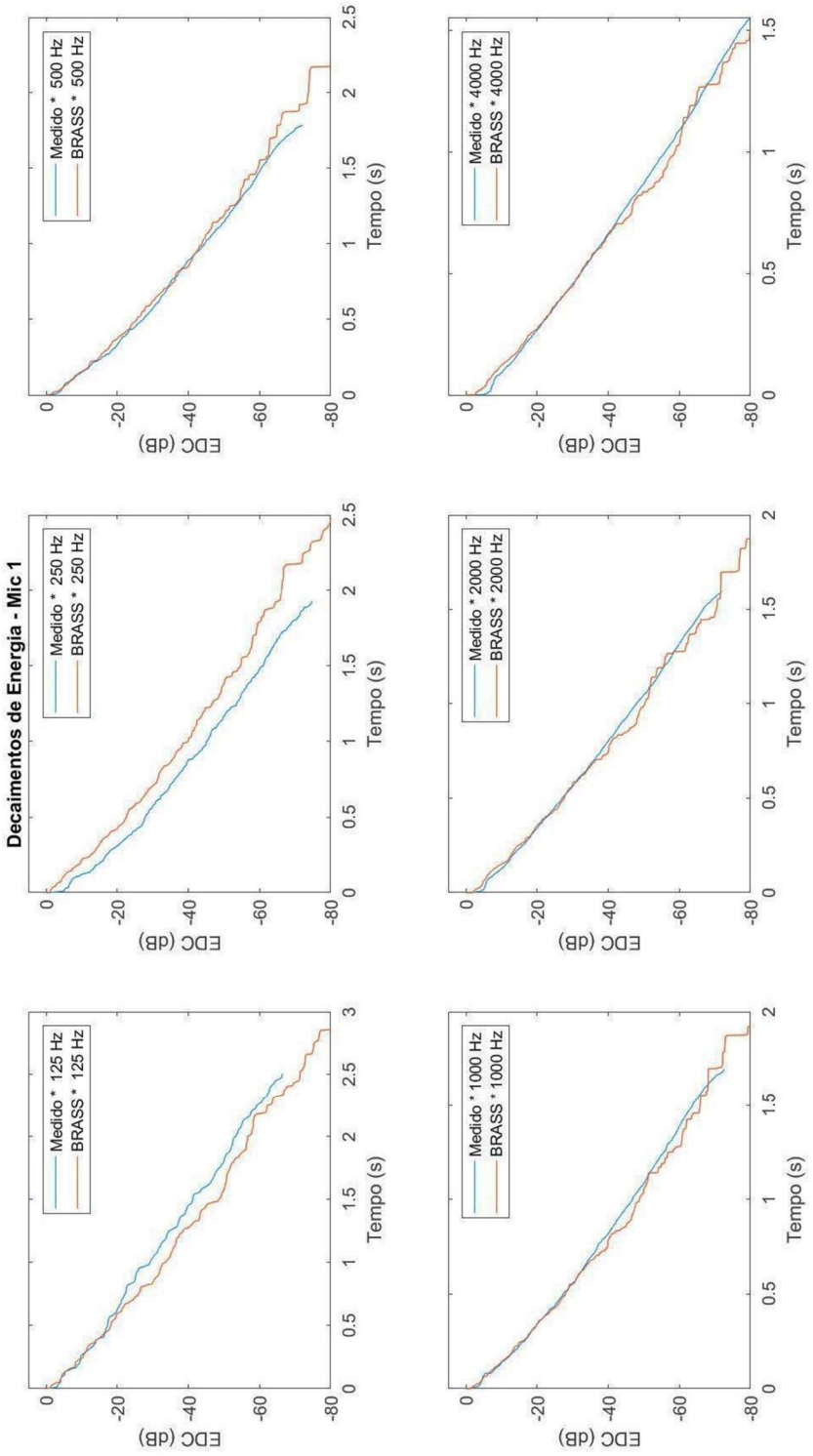
FREQ (Hz)	EDT (s)	T_{20} (s)	T_{30} (s)	C_{80} (dB)	D_{50} (%)	TC (s)
63	2,089	2,989	3,193	-2,840	27,500	0,189
125	2,748	2,739	2,713	-6,760	11,000	0,248
250	1,279	1,529	1,528	3,560	59,400	0,090
500	1,299	1,490	1,461	1,010	42,600	0,098
1.000	0,889	1,340	1,404	4,120	60,400	0,071
2.000	1,191	1,275	1,376	1,920	49,300	0,085
4.000	1,112	1,126	1,164	3,250	49,100	0,074
8.000	0,910	0,832	0,840	4,470	52,300	0,059

FONTE: O AUTOR

ANEXO IV – GRÁFICOS DE DECAIMENTO DE ENERGIA DAS MEDIÇÕES

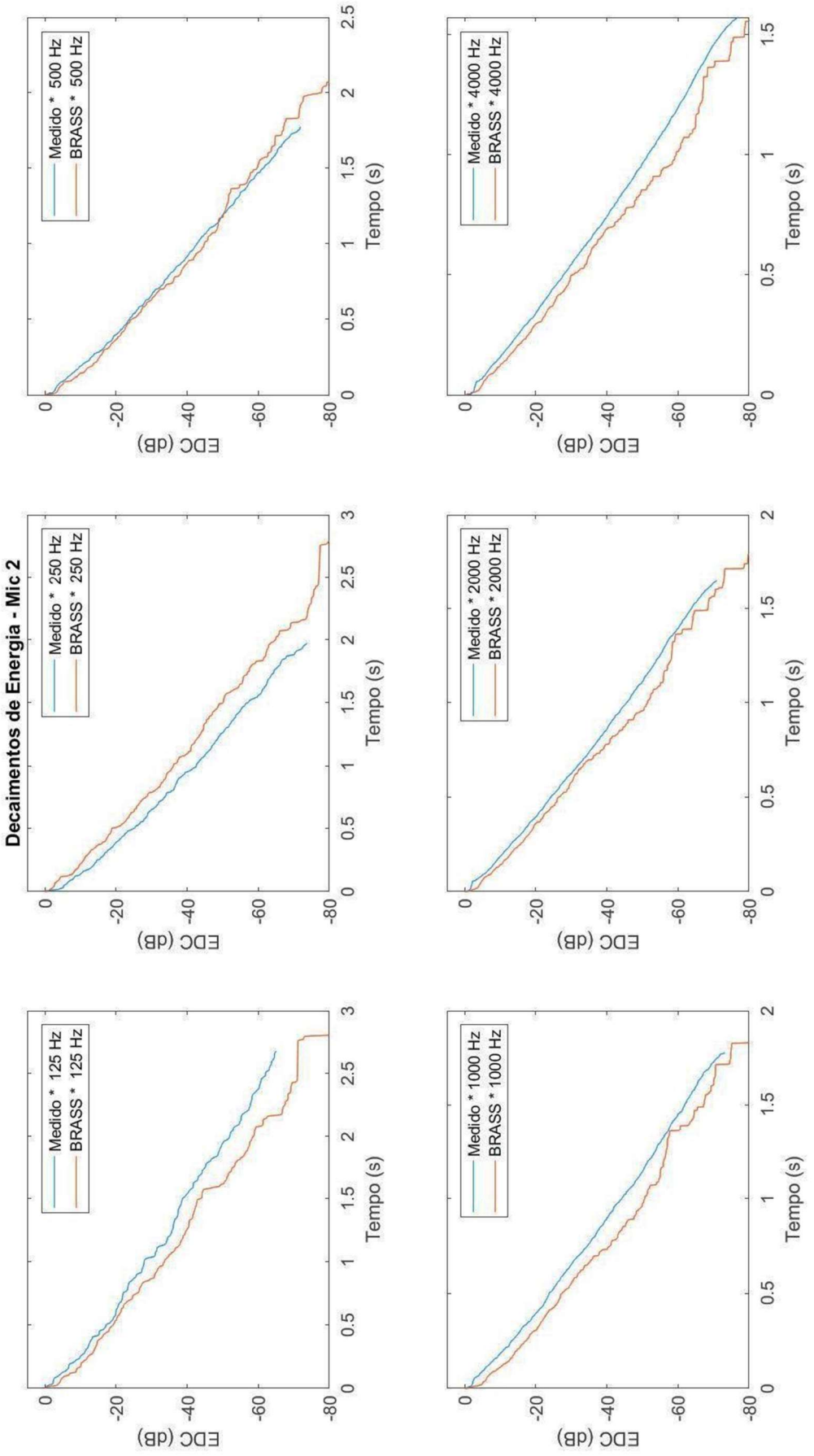
Nos gráficos de decaimento de energia pode-se verificar que, em geral, na faixa de 125 hz o decaimento simulado é menor que o medido, e o decaimento simulado é maior que o medido na faixa de 250 hz. Nas demais faixas de frequência a variação foi menor. No receptor 5 pode ser observada uma variação no decaimento, logo antes dos 2s, nas frequências de 250, 500 e 1khz.

GRÁFICO DE DECAIMENTO DE ENERGIA – MICROFONE 1



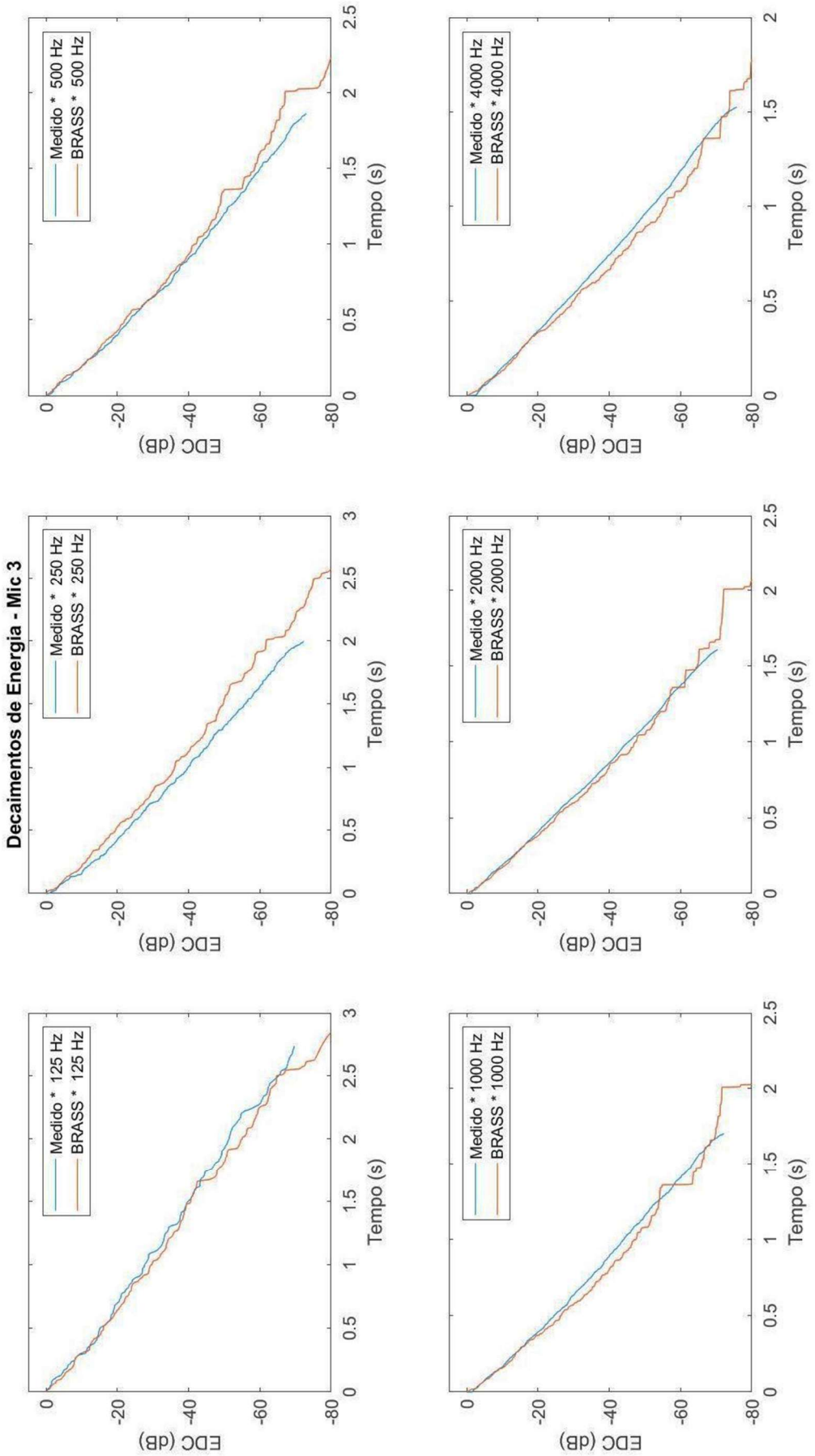
FONTE: O AUTOR

GRÁFICO DE DECAIMENTO DE ENERGIA – MICROFONE 2



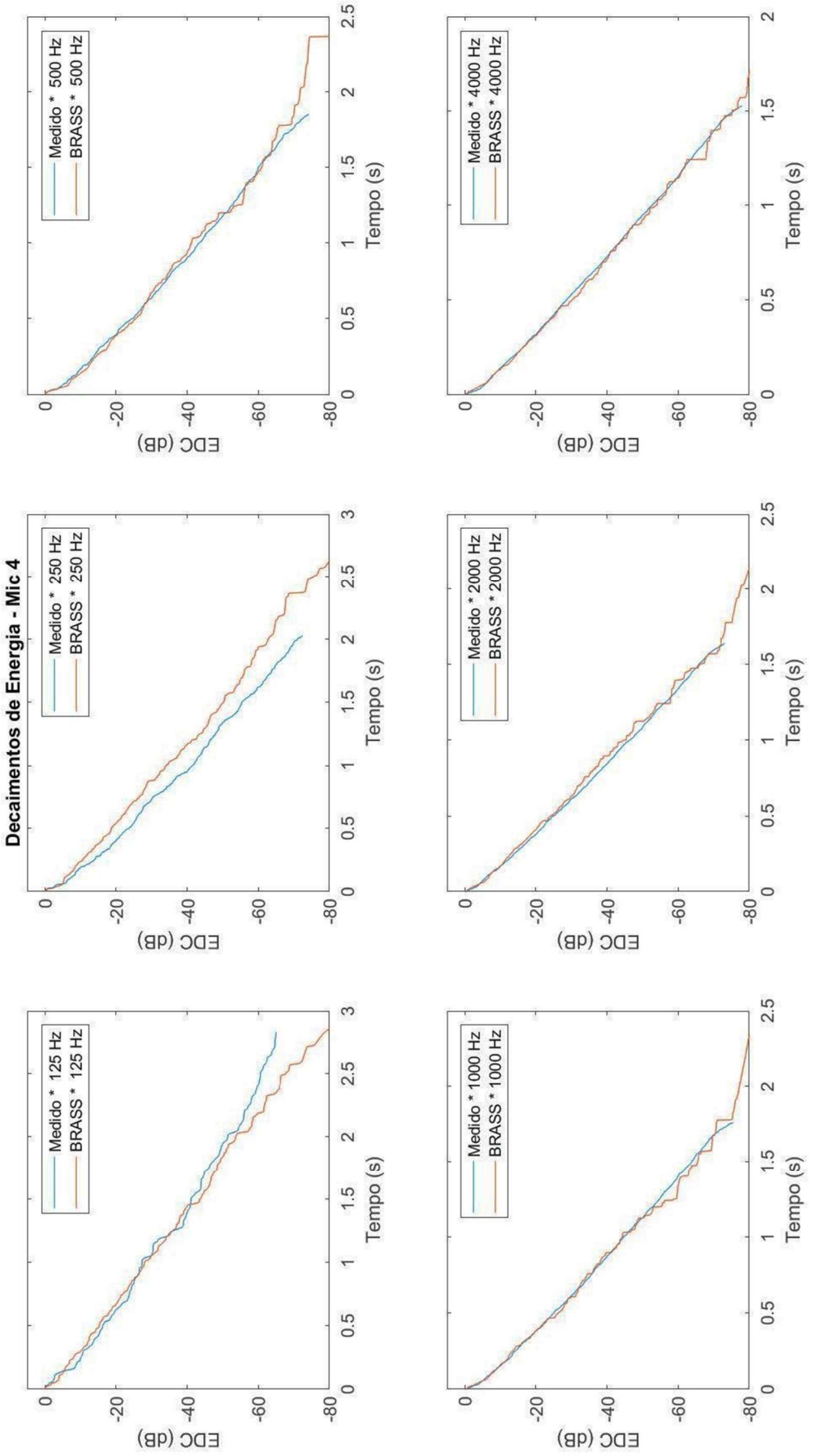
FONTE: O AUTOR

GRÁFICO DE DECAIMENTO DE ENERGIA – MICROFONE 3



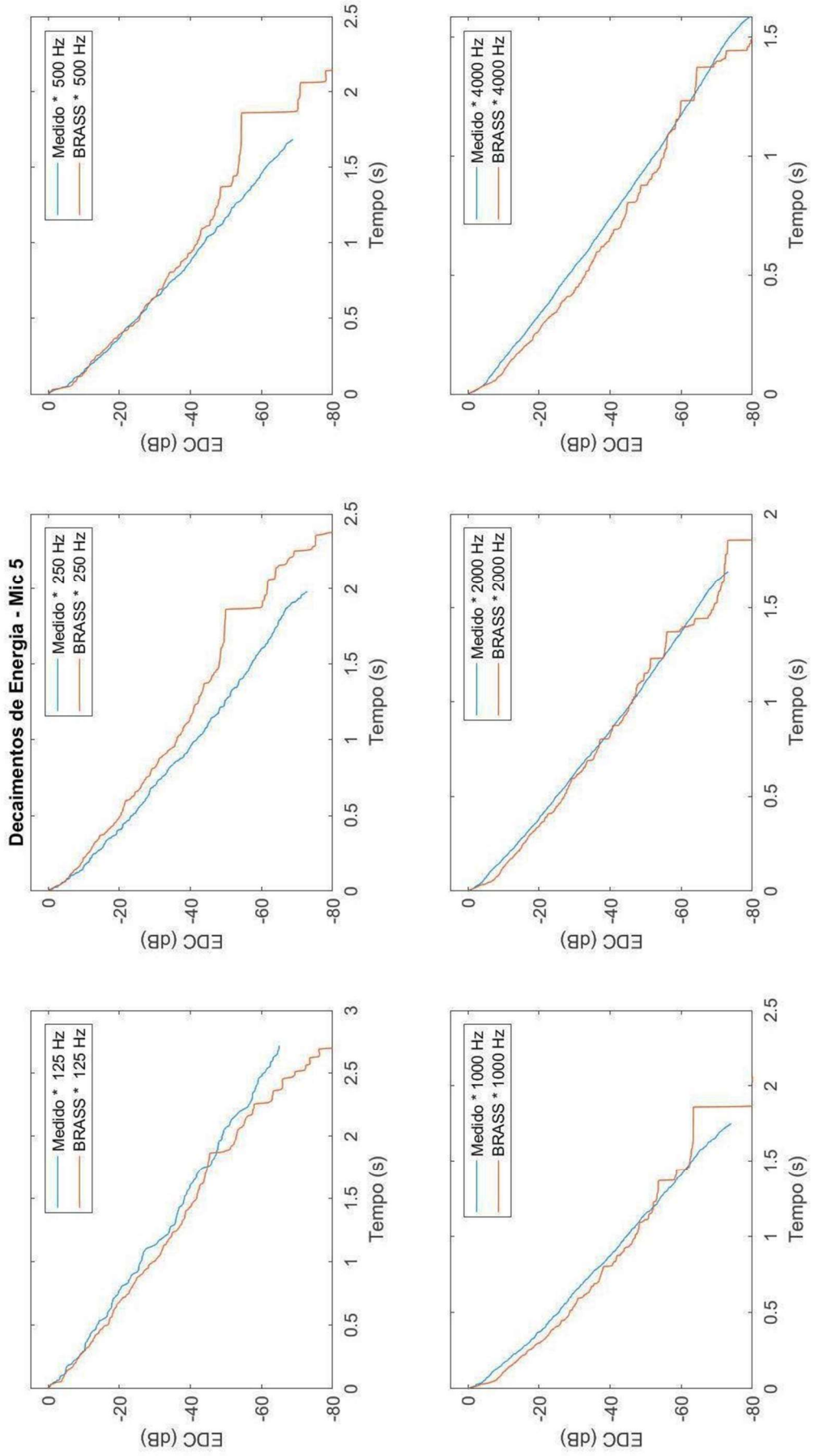
FONTE: O AUTOR

GRÁFICO DE DECAIMENTO DE ENERGIA – MICROFONE 4



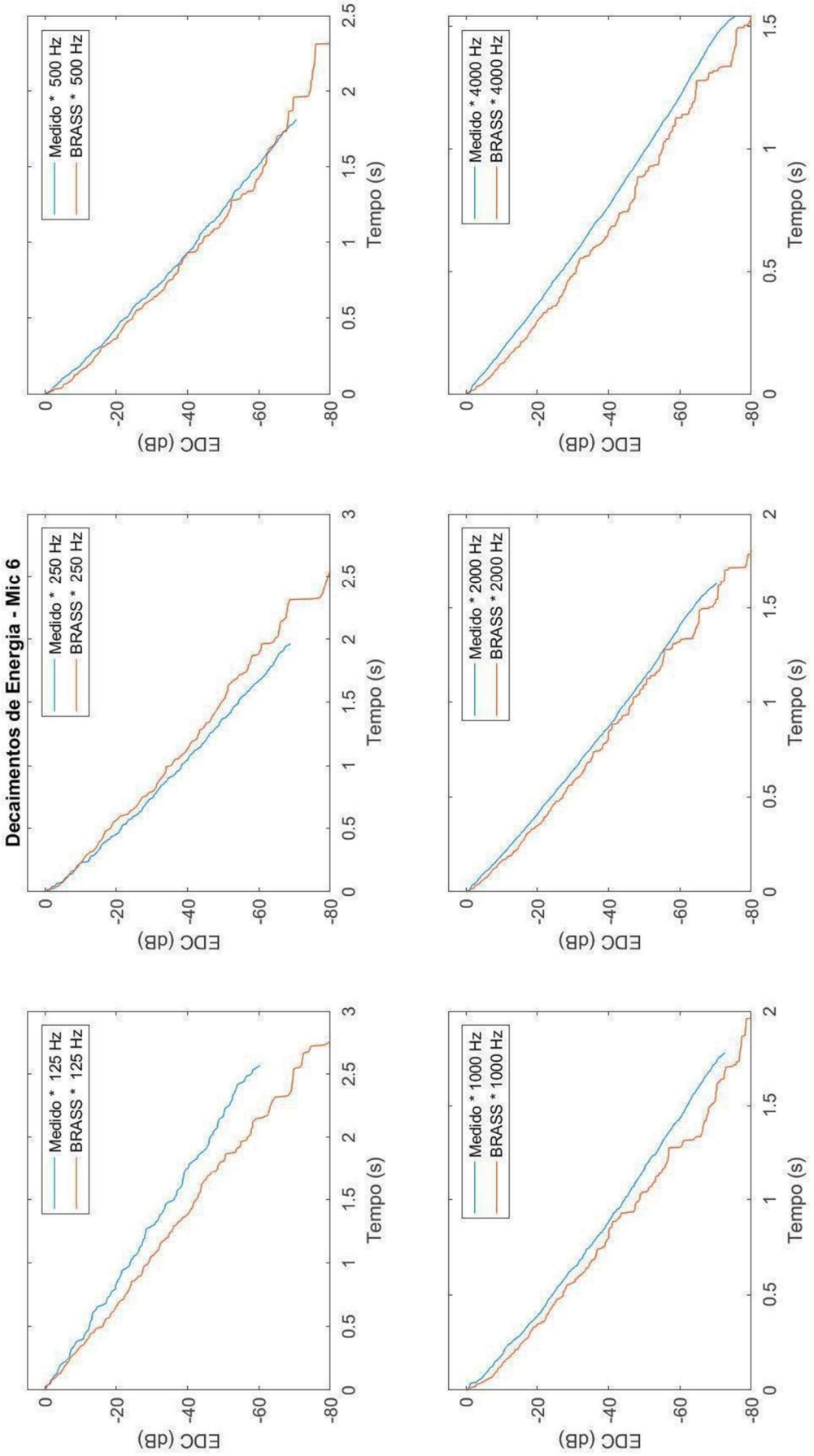
FONTE: O AUTOR

GRÁFICO DE DECAIMENTO DE ENERGIA – MICROFONE 5



FONTE: O AUTOR

GRÁFICO DE DECAIMENTO DE ENERGIA – MICROFONE 6



FONTE: O AUTOR