



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGEM**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE  
ACÚSTICA DO AUDITÓRIO DA ESCOLA DE MÚSICA DA UFRN**

**JAIR DA SILVA ALVES**

**Natal – RN**  
**2017**

**JAIR DA SILVA ALVES**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE  
ACÚSTICA DO AUDITÓRIO DA ESCOLA DE MÚSICA DA UFRN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Efrain Pantaleón Matamoros

Coorientador(a): Prof. Dra. Bianca Carla Dantas de Araújo

Coorientador: Prof. Dr. Joao Bosco da Silva

**Natal – RN  
2017**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Alves, Jair da Silva.

Simulação computacional para avaliação da qualidade acústica do auditório da escola de música da UFRN / Jair da Silva Alves.  
- 2017.

110 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Natal, RN, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Efraim Pantaleón Matamoros.

Coorientadora: Profa. Dra. Bianca Carla Dantas de Araújo.

Coorientador: Prof. Dr. Joao Bosco da Silva.

1. Acústica arquitetônica - Dissertação. 2. Simulação computacional - Dissertação. 3. Acústica musical - Dissertação. 4. Medição acústica - Dissertação. 5. Salas de concerto - Dissertação. I. Matamoros, Efraim Pantaleón. II. Araújo, Bianca Carla Dantas de. III. Silva, Joao Bosco da. IV. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 534.84:004

**JAIR DA SILVA ALVES**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE  
ACÚSTICA DO AUDITÓRIO DA ESCOLA DE MÚSICA DA UFRN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Efrain Pantaleón Matamoros** (*Presidente*)  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

---

**Prof. Dra. Bianca Carla Dantas de Araújo**  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

---

**Prof. Dr. Joao Bosco da Silva**  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

---

**Prof. Dr. Alexandre Bezerra Viana**  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

---

**Prof. Dra. Maria Lucia Gondim da Rosa Oiticica**  
Universidade Federal de Alagoas - UFAL

**Natal, 01 de Dezembro de 2017.**



*Dedico este trabalho a toda minha família, em especial a minha esposa, com amor e gratidão por sua compreensão, carinho, e incansável apoio ao longo do período de elaboração deste trabalho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu Deus que me concedeu o dom da vida. Sem Ele ao longo dessa caminhada, nada disso seria possível. Toda honra e glória seja dada à Ele.

Aos meus pais, José Alves Bilé e Maria Berto da Silva Alves, por me ensinarem o caminho que eu deveria andar e estarem sempre ao meu lado.

A minha esposa, Aline da Silva S. Alves, por ter sempre uma palavra de carinho, por ter me ensinado a permanecer firme nesse propósito e sempre acreditar no meu potencial. Agradeço por toda paciência e amor.

Ao meu orientador, Professor Dr. Efrain Pantaleón Matamoros, e aos meus coorientadores, Professora Dra. Bianca Carla Dantas de Araújo e Professor Dr. Joao Bosco da Silva, por toda atenção e dedicação na orientação desse trabalho.

À Professora Dra. Maria Lucia Gondim da Rosa Oiticica e ao Professor Dr. Alexandre Bezerra Viana por aceitarem gentilmente em fazer parte da banca examinadora.

À AFMG, representado por Pedro Lima, por ceder as licenças do software EASE e demais módulos fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Direção da Escola de Música da UFRN por ceder o acesso ao Auditório Onofre Lopes para realização das medições que constituem parte integrante deste trabalho.

Às arquitetas Luciana Alves e Andréa Melo e ao Yago Marques por cederem uma parte de seu tempo para contribuir com o desenvolvimento desse trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a minha formação.

“A persistência é o menor caminho do êxito.”  
*Charles Chaplin*

## RESUMO

Em um ambiente utilizado principalmente para apresentações musicais, o grau de inteligibilidade das informações musicais e de outros aspectos acústicos é o que possibilita a análise da qualidade dos sons que são recebidos pelos ouvintes e, consequentemente, permite uma avaliação das características acústicas da sala. Essa análise é realizada por meio da avaliação de parâmetros objetivos, os quais podem ser obtidos através de técnicas de medição e de simulação computacional. Com o avanço da tecnologia e o desenvolvimento de pesquisas referentes à acústica arquitetônica ao longo dos anos, vários *softwares* de avaliação da qualidade acústica de salas foram desenvolvidos, tornando-os ferramentas essenciais para a previsão do comportamento do som em diversos tipos de ambientes. Este estudo tem por objetivo avaliar, por meio de medição e simulação computacional, parâmetros que são capazes de representar o comportamento acústico do Auditório Onofre Lopes (AOL) da Escola de Música da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (EMUFRN), no intuito de propor diretrizes gerais de projeto para otimização das características acústicas desse ambiente. Os parâmetros acústicos foram obtidos, primeiramente, a partir da medição da resposta impulsiva da sala. Através da construção de um modelo digital tridimensional do auditório, as características acústicas dos materiais que revestem as superfícies internas da sala, bem como as características eletroacústicas das fontes sonoras presentes no ambiente foram modeladas com o auxílio de um *software* de simulação computacional. Após a validação do modelo, realizada através da comparação dos resultados de Tempo de Reverberação (RT) obtidos nas medições e nas simulações, os parâmetros acústicos *Early Decay Time* (EDT), Clareza (C80), Definição (D50), Tempo Central (Ts) e *Speech Transmission Index* (STI) foram simulados e avaliados de acordo os valores recomendados na literatura. Como resultado da pesquisa, os valores coletados nas medições e simulações apontaram que o AOL é um espaço que possui características acústicas inadequadas à fala e pouco eficientes quando utilizado para música. Dessa forma, algumas diretrizes de condicionamento acústico foram simuladas, com o objetivo de aperfeiçoar a resposta temporal acústica para a utilização do auditório como um espaço destinado a múltiplos usos.

**Palavras-chave:** *Acústica arquitetônica. Acústica musical. Simulação computacional. Medição acústica. Salas de concerto.*

## ABSTRACT

In a room used mainly for musical presentations, the intelligibility levels of musical information and other acoustic aspects allow the analysis of the quality of the sounds received by the listeners and, consequently, allows an evaluation of room's acoustic characteristics. This analysis is performed by the evaluation of objective parameters, which can be obtained by measurement and computational simulation techniques. With the advancement of technology and the development of research related to architectural acoustics over the years, several software for evaluating acoustic room quality were developed, making them essential tools for predicting the behavior of sound in different types of halls. The aim of this study is to evaluate, through computer measurement and simulation, parameters that are able to represent the acoustic behavior of the Onofre Lopes Auditorium (AOL) of the School of Music of the Federal University of Rio Grande do Norte (EMUFRN), in order to propose general guidelines to optimize its acoustic characteristics. These room's acoustic parameters were obtained by measuring its impulse response. Through the construction of a three-dimensional digital model of the auditorium, the acoustic characteristics of the materials that covers its internal surfaces, as well electroacoustic characteristics of the sound sources present in this space were modeled with the aid of computer simulation software. After the validation of the model, by comparing Reverberation Time (RT) results obtained in the measurements and simulations, the acoustic parameters Early Decay Time (EDT), Clarity (C80), Definition (D50), Center Time (Ts) and Speech Transmission Index (STI) were simulated and evaluated according to the values recommended in the literature. As a result of this research, the values collected in the measurements and simulations pointed out that the AOL is a space that has inadequate acoustic characteristics to speech and may be considered inefficient when used for music. Thus, some acoustic conditioning guidelines were simulated to improve the acoustic temporal response to the use of the auditorium as a multipurpose hall.

**Keywords:** *Architectural acoustics. Musical acoustics. Computational simulation. Acoustic measurement. Concert halls.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de uma onda sonora simples indicando áreas alternadas de compressão e rarefação.....	22
Figura 2 – Representação do espectro sonoro.....	23
Figura 3 – Representação de uma onda senoidal $y(t)$ .....	25
Figura 4 – Diminuição da intensidade do som com aumento da distância.....	26
Figura 5 – Ilustração da recepção do som direto e indireto pelo ouvinte.....	27
Figura 6 – Esquema do diagrama de reflexão.....	28
Figura 7 – Representação geométrica de uma reflexão de onda plana.....	28
Figura 8 – Densidade de energia <i>versus</i> tempo.....	32
Figura 9 – Modelo acústico em escala da Sala de Concerto <i>Barbican</i> , em Londres.....	34
Figura 10 – Modelo de acrílico de uma sala de concertos (Centro Cultural <i>Ataturk</i> em Ancara), escala 1:20.....	35
Figura 11 – Rastreamento de um raio da fonte ao detector.....	36
Figura 12 – Representação gráfica de um histograma.....	37
Figura 13 – Resposta ao impulso para várias bandas de frequência utilizando <i>ray tracing</i> ... ..	37
Figura 14 – Trajetória entre uma fonte e um receptor de imagem de terceira ordem.....	38
Figura 15 – Exemplo da fonte de imagem não sendo visível nas posições do receptor R.....	39
Figura 16 – Rastreamento de cone (esquerda) e pirâmide (direita).....	40
Figura 17 – Diagrama entrada e saída de um Sistema Linear e Invariante no Tempo – SLIT.....	42
Figura 18 – Gráficos das relações entre os Tempos de Decaimento Inicial (para frequências baixas, médias e altas) nas salas ocupadas <i>versus</i> salas desocupadas.....	48
Figura 19 – Tempo de reverberação (500 e 1000 Hz) ótimo para diversos tipos de ambiente.....	54
Figura 20 – Razão do Tempo de Reverberação de graves e médias frequências.....	55
Figura 21 – Formas mais comuns encontrada em auditórios (configuração normal e surround).....	56
Figura 22 – Curvas de classificação de ruído relevantes para auditórios e o espectro de ruído do público (linha pontilhada).....	57
Figura 23 – <i>Dronningesalen Hall</i> , na Biblioteca Real de <i>Copenhagen</i> .....	60
Figura 24 – Curvas de tempo de reverberação da <i>Dronningesalen Hall</i> , utilizando absorção variável.....	60
Figura 25 – Planta de localização do Auditório Onofre Lopes da UFRN.....	62
Figura 26 – Construção do Auditório Onofre Lopes na sede da Escola de Música da UFRN.....	62
Figura 27 – Planta baixa do Auditório Onofre Lopes da UFRN.....	63
Figura 28 – Corte lateral do Auditório Onofre Lopes da UFRN.....	63
Figura 29 – Plano aberto mostrando a geometria em forma de leque do Auditório da Escola de Música da UFRN.....	64
Figura 30 – Paredes internas do Auditório da EMUFRN, com formato curvilíneo, construídas em lambri e fixadas em estrutura rígida de madeira.....	64
Figura 31 – Teto multifacetado do Auditório da EMUFRN construído em madeira.....	65
Figura 32 – Palco do Auditório da EMUFRN construído com lâminas de madeira maciça... ..	66
Figura 33 – Diagrama da cadeia de medição.....	67
Figura 34 – Resposta de frequência da fonte sonora <i>OmniPower 4292-L</i> da Brüel & Kjær... ..	69
Figura 35 – Fonte sonora dodecaedro <i>OmniPower 4292-L</i> da Brüel & Kjær posicionada no palco.....	69
Figura 36 – Resposta de frequência da Interface de áudio USB ZE 0948 da Brüel & Kjær... ..	69
Figura 37 – Pré-amplificador de microfone e analisador 2270 <i>Analyzer</i> da Brüel & Kjær.....	70
Figura 38 – Módulo de geração de sinais do <i>software</i> DIRAC da Brüel & Kjær.....	70

Figura 39 – Módulo de pós-processamento de sinais do <i>software</i> DIRAC da Brüel & Kjær.	71
Figura 40 – Visualização de resultados no módulo de pós-processamento de sinais do DIRAC da Brüel & Kjær.	71
Figura 41 – Posições da sala utilizadas nas medições acústicas, considerando a ISO 3382-1 (2009).	72
Figura 42 – Posições da sala utilizadas nas simulações computacionais, considerando a ISO 3382-1 (2009).	74
Figura 43 – Visualização do parâmetro EDT utilizando o mapeamento de área ( <i>Area Mapping</i> ).	74
Figura 44 – Visualização do módulo <i>Edit Project</i> do <i>software</i> EASE da AFMG.	75
Figura 45 – Configuração das <i>audience areas</i> e dos <i>listeners seats</i> no <i>software</i> EASE da AFMG.	76
Figura 46 – Visualização dos resultados na forma de gráfico no domínio da frequência.	76
Figura 47 – Visualização dos resultados na forma de gráfico de distribuição percentual dos valores.	76
Figura 48 – Passo-a-passo da construção do modelo em 3D no programa <i>Sketchup Pro</i> .	77
Figura 49 – Modelo do AOL importado para o <i>software</i> EASE.	78
Figura 50 – Modelagem das características dos materiais.	79
Figura 51 – Modelagem das características eletroacústicas dos alto-falantes.	80
Figura 52 – Distribuição espacial de EDT obtida através de simulação, considerando a situação atual.	90
Figura 53 – Distribuição espacial de Clareza (C80) obtida através de simulação, considerando a situação atual.	91
Figura 54 – Distribuição espacial de Definição (D50) obtida através de simulação, considerando a situação atual.	92
Figura 55 – Distribuição espacial de Tempo Central (Ts) obtida através de simulação, considerando a situação atual.	93
Figura 56 – Assentos construídos com características de absorção acústica similares as do público.	94
Figura 57 – Dispositivos instalados no auditório para adequação do tempo de reverberação, considerando o uso da sala para fala.	97
Figura 58 – <i>Banners</i> acústicos instalados em auditório multiuso.	98
Figura 59 – Distribuição espacial de RT obtida através de simulação, considerando o uso da sala para fala.	99
Figura 60 – Corte lateral da sala com a identificação do sistema eletroacústico da série VRX da JBL.	100
Figura 61 – Distribuição espacial de STI obtida na simulação da situação atual (à esquerda) e após aplicadas as medidas de condicionamento e com a utilização de sistema eletroacústico (à direita).	101
Figura 62 – Distribuição espacial de RT obtido através de simulação computacional, considerando o uso da sala para música.	104
Figura 63 – Distribuição espacial de Clareza (C80) obtida através de simulação, considerando o uso da sala para música.	105
Figura 64 – Distribuição espacial de Definição (D50) obtida na simulação, considerando o uso da sala para música.	106
Figura 65 – Distribuição espacial de Tempo Central (Ts) obtida na simulação, considerando o uso da sala para música.	106

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curvas dos valores médios globais de RT obtidos através de medição.....	83
Gráfico 2 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de RT obtidos através de medição, de acordo com Barron (2009). ....	83
Gráfico 3 – Curvas dos valores médios globais de EDT obtidos através de medição. ....	84
Gráfico 4 – Valores médios (500 Hz a 1000 Hz) de EDT obtidos através de medição, de acordo com Beranek (2004). ....	85
Gráfico 5 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de EDT obtidos através de medição, de acordo com a norma ISO 3382-1 (2009).....	85
Gráfico 6 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Clareza (C80) obtidos através de medição. ....	86
Gráfico 7 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Definição (D50) obtidos através de medição. ....	87
Gráfico 8 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Tempo Central (Ts) obtidos através de medição. ....	88
Gráfico 9 – Curvas dos valores médios globais de RT obtidos no AOL, através de medição e simulação computacional. ....	89
Gráfico 10 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de EDT obtidos através de simulação, considerando a situação atual. ....	90
Gráfico 11 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Clareza (C80) obtidos através de simulação, considerando a situação atual.....	92
Gráfico 12 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Definição (D50) obtidos através de simulação, considerando a situação atual.....	92
Gráfico 13 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Tempo Central (Ts) obtidos através de simulação, considerando a situação atual.....	93
Gráfico 14 – Curvas dos valores médios globais de RT obtidos através de simulação, considerando o uso da sala para fala. ....	99
Gráfico 15 – Valores médios de <i>STI</i> obtidos através de simulação, considerando o uso da sala para fala. ....	101
Gráfico 16 – Curvas dos valores médios globais de RT obtidos através de simulação, considerando o uso da sala para música.....	103
Gráfico 17 – Curvas dos valores médios globais de RT obtidos através de medição e simulação, considerando o uso da sala para fala e para música. ....	104
Gráfico 18 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Clareza (C80) obtidos através de simulação, considerando o uso da sala para música. ....	105
Gráfico 19 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Definição (D50) obtidos na simulação, considerando o uso da sala para música.....	106
Gráfico 20 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Tempo Central (Ts) obtidos com simulação, considerando o uso da sala para música. ....	107



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores padrão do coeficiente de absorção de alguns materiais de construção. Absorção total: $\alpha = 1$ ; Reflexão total: $\alpha = 0$ .....	29
Tabela 2 – Valores recomendados para o STI.....	51
Tabela 3 – Parâmetros objetivos considerados mais relevantes, agrupados de acordo com os aspectos subjetivos com que estão relacionados. ....	52
Tabela 4 – Valores para parâmetros acústicos de acordo com a percepção do ouvinte.....	53
Tabela 5 – Valores recomendados para o tempo de reverberação para diferentes usos de salas (ocupadas). ....	54
Tabela 6 – Valores recomendados para o volume por assento para diferentes usos de salas. .	55
Tabela 7 – Critérios de avaliação de ruído de fundo para auditórios.....	57
Tabela 8 – Resumo dos detalhes acústicos e de construção do AOL. ....	66
Tabela 9 – Valores dos coeficientes de absorção sonora $\alpha$ das superfícies dos materiais utilizados no modelo digital do AOL.....	79
Tabela 10 – Valores médios globais de RT obtidos através de medição. ....	82
Tabela 11 – Valores médios globais de EDT obtidos através de medição. ....	84
Tabela 12 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) dos parâmetros C80, D50 e Ts obtidos através de medição. ....	86
Tabela 13 – Valores médios globais de RT obtidos no AOL, através de medição e simulação computacional. ....	89
Tabela 14 – Valores médios de EDT obtidos através de simulação, considerando a situação atual. ....	90
Tabela 15 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) dos parâmetros C80, D50 e Ts obtidos através de simulação, considerando a situação atual. ....	91
Tabela 16 – Valores médios globais do ruído ambiente obtidos através de medição. ....	95
Tabela 17 – Valores médios globais de RT obtidos através de simulação, considerando o uso da sala para fala. ....	99
Tabela 18 – Valores médios de parâmetro de inteligibilidade (STI) obtidos através de simulação.....	100
Tabela 19 – Valores médios de RT obtidos na simulação, considerando o uso da sala para música. ....	103
Tabela 20 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) dos parâmetros C80, D50 e Ts obtidos através de simulação. ....	105

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

**AFMG** – *Ahnert Feistel Media Group*  
**AOL** – Auditório Onofre Lopes  
**ASW** – *Apparent Source Width*  
**BEM** – *Boundary Element Method* (Método dos Elementos de Contorno)  
**BR** – Bass Ratio (Razão de graves)  
**B&K** – Brüel & Kjær  
**dB** – Decibel  
**EASE** – *Enhanced Acoustic Simulator for Engineers*  
**EDT** – *Early Decay Time* (Tempo de Decaimento Inicial)  
**EMUFRN** – Escola de Música da Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
**FDTD** – *Finite Difference Time Domain* (Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo)  
**FEM** – *Finite Element Method* (Método dos Elementos Finitos)  
**IACC** – Coeficiente interaural de correlação cruzada  
**IEC** – *International Electrotechnical Commission*  
**IR** – *Impulse Response* (Resposta ao Impulso)  
**ISO** – *International Organization for Standardization*  
**ITGD** – *Initial Time Delay Gap*  
**JLF** – Fração de energia lateral inicial  
**JND** – *Just Noticeable Difference* (Diferença mínima perceptível)  
**LEF** – *Lateral Energy Fraction* (Fração de Energia Lateral)  
**LDT** – *Local Decay Time*  
**LJ** – Nível sonoro lateral reverberado  
**LEV** – *Listener Envelopment*  
**MLS** – *Maximum Length Sequence*  
**NR** – Norma Regulamentadora  
**RT** – *Reverberation Time* (Tempo de Reverberação)  
**SDI** – *Surface Diffusivity Index* (Índice de Difusividade de Superfícies)  
**SLIT** – Sistemas Linear e Invariante no Tempo  
**SNR** – *Signal Noise Ratio* (Relação Sinal Ruído)  
**STI** – *Speech Transmission Index* (Índice de Transmissão de fala)  
**TDS** – *Time Delay Spectrometry*  
**TR** – *Treble Ratio* (Razão de agudos)  
**UFRN** – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 Objetivo geral	19
1.1.2 Objetivos específicos	19
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
<b>CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>21</b>
2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE ACÚSTICA	21
2.2 FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA DE SALAS	25
2.2.1 Propagação de ondas sonoras	26
2.2.2 Acústica ondulatória	30
2.2.3 Acústica estatística	32
2.2.4 Acústica geométrica	33
2.3 MODELAGEM EM ACÚSTICA GEOMÉTRICA	33
2.3.1 Modelos analógicos (modelos em escala)	34
2.3.2 Modelos digitais	35
2.4 MÉTODOS DE MEDIÇÃO ACÚSTICA	41
2.4.1 Sistema Linear Invariante no Tempo – SLIT	41
2.4.2 Processamento digital de sinais analógicos	42
2.4.3 Métodos para caracterização da resposta impulsiva	43
2.5 PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS	44
2.5.1 Parâmetros subjetivos	44
2.5.2 Parâmetros objetivos	46
2.5.3 Diferença mínima perceptível ( <i>Just Noticeable Difference</i> ) – JND	52
2.6 ALGUMAS DIRETRIZES PARA O PLANEJAMENTO ACÚSTICO DE SALAS	53
<b>CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA</b>	<b>61</b>
3.1 IDENTIFICAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	61
3.2 MEDIÇÕES ACÚSTICAS	67
3.2.1 Cadeia de medição	67
3.2.2 Equipamentos utilizados	68
3.2.3 Software utilizado para as medições acústicas	70
3.2.4 Localização dos pontos de medição	71
3.2.5 Procedimentos utilizados	72
3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	73
3.3.1 Software utilizado para as simulações acústicas	75
3.3.2 Construção do modelo digital	77
3.3.3 Modelagem das características dos materiais	79
3.3.4 Modelagem das áreas de audiência e dos assentos dos ouvintes	80
3.3.5 Modelagem das características eletroacústicas	80
3.3.6 Validação do modelo computacional	81
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>82</b>
4.1 MEDIÇÕES ACÚSTICAS	82
4.1.1 Análise das características de reverberação (RT e EDT)	82
4.1.2 Análise dos parâmetros de clareza e definição (C80, D50 e Ts)	86
4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA SITUAÇÃO ATUAL	88
4.3 DIRETRIZES GERAIS DE PROJETO	93
4.3.1 Tipo de poltronas	94
4.3.2 Ruído de fundo	95
4.3.3 Acústica variável	96
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES</b>	<b>108</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>110</b>

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A qualidade acústica de um ambiente pode ser avaliada com o auxílio de diversas ferramentas que foram desenvolvidas ao longo dos anos. A partir de 1900, os estudos científicos relacionados à acústica de salas cresceu consideravelmente e o conhecimento nessa área, inicialmente baseado em experimentos práticos, passou a ser tratado como ciência (BERANEK, 2004). Carvalho (2012) relata que os projetos de salas destinadas à música ou à fala eram elaborados através de comparação com ambientes já construídos e que fossem notadamente reconhecidos por terem uma boa qualidade acústica. No entanto, com a criação de salas com novas geometrias, só era possível avaliar a qualidade acústica do ambiente após a conclusão da obra, o que nem sempre produzia o resultado esperado.

Beranek (1962) publicou o primeiro livro sobre o assunto intitulado de *Music, Acoustics and Architecture*, o qual foi considerado um marco histórico para a acústica de salas, tornando-se o primeiro autor a organizar, de forma sistemática, um conjunto de parâmetros relacionados à acústica de salas destinadas à música (FIGUEIREDO, 2005).

Até hoje, inúmeros experimentos têm sido realizadas para correlacionar julgamentos subjetivos de qualidade sonora de um ambiente com medidas objetivas de atributos acústicos, na tentativa de estabelecer uma avaliação matematicamente previsível (LONG 2006). Apenas nas últimas décadas, o conhecimento científico nessa área amadureceu até um nível em que se pode explicar os aspectos subjetivos relacionados ao modo de como percebemos a acústica das salas, como esses aspectos subjetivos são regidos por parâmetros objetivos no campo sonoro e, como esses parâmetros objetivos são governados pelas variáveis físicas do projeto arquitetônico (ROSSING, 2007).

Embora a tarefa de definir o que é uma boa acústica exija uma linguagem precisa e uma compreensão sólida sobre acústica, a maioria dos músicos e apreciadores da música pode concordar em geral sobre o que compõe uma boa sala de concertos. Para o ouvinte comum, a composição, o maestro, a orquestra e a sala devem combinar-se para que produza uma excelente experiência de audição. Pouco importa se o tempo de reverberação, nas várias frequências, tenha determinados valores, ou se a energia sonora em sua poltrona deve exibir uma certa distribuição direcional. Em vez disso, ele espera que a sala, com sua "acústica", suporte a música que é executada ou torne a fala facilmente inteligível (KUTTRUFF, 2009).

Por outro lado, a função do engenheiro ou arquiteto da área de acústica é encontrar maneiras de satisfazer as expectativas do ouvinte. Para isso, ele precisa de conhecimento das relações entre as propriedades do campo sonoro físico e a impressão subjetiva do ouvinte,

distinguindo todos esses parâmetros e entendendo qual a contribuição de cada um para a totalidade da acústica da sala (KUTTRUFF, 2009).

Em um ambiente utilizado principalmente para apresentações musicais, o grau de inteligibilidade das informações musicais e de outros aspectos acústicos é o que possibilita a análise da qualidade dos sons que são recebidos pelos ouvintes e, conseqüentemente, permite uma avaliação das características acústicas da sala.

Nesse sentido, é fundamental para o conforto dos usuários que os projetos acústicos de salas sejam elaborados dentro dos padrões estabelecidos pela literatura. Para isso, os métodos para obtenção das características acústicas de um espaço constituem uma etapa essencial para avaliar a qualidade de um ambiente e, se necessário, desenvolver um procedimento sistemático para a modificação da estrutura arquitetônica, baseado em critérios de melhoria do condicionamento acústico. Esses métodos são baseados em técnicas de medição e modelagem acústica, e são desenvolvidos por meio da análise de um conjunto de parâmetros objetivos, os quais se correlacionam diretamente com as características arquitetônicas da sala.

As medições acústicas são uma valiosa ferramenta de diagnóstico. Elas são fundamentais para revelar e caracterizar as deficiências acústicas da sala e encontrar a causas desses problemas, podendo avaliar, por exemplo, o desempenho de um sistema de reforço eletroacústico instalado no ambiente.

Paralelamente, com o avanço da tecnologia e o desenvolvimento de pesquisas referentes à acústica arquitetônica ao longo dos anos, *softwares* de avaliação da qualidade acústica de salas foram desenvolvidos, tornando-os ferramentas essenciais para a previsão do comportamento do som em ambientes fechados. Com isso, a simulação computacional também passou a ser utilizada como um instrumento para avaliar as características acústicas de um ambiente, antes mesmo dele ser construído.

Dependendo do tipo de atividade que é desenvolvida no ambiente, a avaliação ou previsão da qualidade acústica de uma sala pode assumir diversos níveis de complexidade. Em outras palavras, é válido considerar que, do ponto de vista da qualidade acústica, uma sala destinada ao uso da fala deve ser avaliada sob diferentes perspectivas, quando comparada a uma sala destinada à música.

Na concepção de salas destinadas ao uso da fala, a capacidade de entender o discurso é muito importante. Vários componentes arquitetônicos, como por exemplo, tamanho de sala, forma, orientação de superfície e materiais, bem como o nível de ruído de fundo, influenciam diretamente na inteligibilidade (LONG, 2006). Por isso, vários requisitos são fundamentais

para a concepção de salas com essas características, e cada uma delas contribui para se alcançar um alto nível da relação sinal-ruído no receptor.

Nas salas destinadas à música, a acústica varia de acordo com o estilo musical. Esses ambientes demandam a modelagem de um campo sonoro sem a capacidade de controlar as fontes originais, cujo tipo, posição, intensidade e diretividade, pode mudar em todas as apresentações musicais. Em outras palavras, o engenheiro ou arquiteto atua indiretamente, através as superfícies da sala que refletem, difundem ou absorvem a energia sonora. Deve-se considerar ainda que o público possui ouvidos treinados e senso crítico apurado, exigindo ainda mais conhecimento dos profissionais envolvidos. Para Long (2006), as salas projetadas para música são os espaços mais interessantes da acústica arquitetônica, pois é nesse tipo de projeto que a ciência da acústica e as artes da arquitetura e da música são combinadas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Analisar, através da medição e simulação computacional, os parâmetros objetivos capazes de reproduzir o comportamento acústico de uma sala, com o intuito de propor diretrizes gerais para otimização das características acústicas do Auditório Onofre Lopes (AOL) da Escola de Música da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (EMUFRN).

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Estudar os métodos para a análise do comportamento acústico de salas.
- Realizar medições acústicas do ambiente, considerando parâmetros acústicos de tempo e de energia.
- Desenvolver um projeto de modelagem virtual simplificado da sala utilizando as dimensões, formatos e elementos que compõe a sua estrutura arquitetônica;
- Calcular e avaliar os resultados dos parâmetros acústicos simulados no modelo virtual tridimensional construído;
- Elaborar uma proposta com diretrizes gerais baseada nos resultados obtidos com a simulação computacional, visando otimizar as características acústicas do AOL.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este estudo de caso realizado por meio de uma pesquisa de campo será dividido em 5 (cinco) capítulos, os quais estão resumidamente descritos a seguir.

O primeiro capítulo apresenta uma breve reflexão sobre a acústica de salas, com abordagem voltada aos ambientes que se destinam prioritariamente à música, além de expor a importância desse estudo e os objetivos que esta pesquisa propõe alcançar.

O capítulo 2 refere-se à revisão bibliográfica, onde verificar-se-á os principais tópicos que envolvem a acústica, os trabalhos mais relevantes desenvolvidos sobre o comportamento acústico de ambientes fechados, os métodos computacionais mais atuais utilizados para a predição do comportamento acústico de salas, bem como os diversos tipos de salas em que a qualidade acústica devem proporcionar condições adequadas aos ouvintes.

No capítulo 3 será realizado o levantamento das características geométricas e de construção que compõem a estrutura interna do auditório, as medições experimentais através da resposta impulsiva acústica para obtenção dos parâmetros de avaliação da qualidade acústica de salas, bem como simulações computacionais, desenvolvidas com auxílio do *software* de predição acústica *Enhanced Acoustic Simulator for Engineers* (EASE) da *Ahnert Feistel Media Group* (AFMG).

No capítulo 4, os resultados da pesquisa serão apresentados e comparados aos padrões de referência recomendados pelas normas, desenvolvendo-se uma discussão mais aprofundada sobre as fundamentações constituídas na literatura.

As considerações finais e as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados da pesquisa serão apresentadas no último capítulo. Nesta etapa serão expostas as principais contribuições deste estudo, bem como serão elaboradas sugestões de novas propostas de trabalho que poderão dar continuidade a esta pesquisa na área de acústica de salas.



## **CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO**

Este capítulo aborda a revisão dos principais tópicos referentes ao estudo das ondas sonoras e os conceitos mais importantes necessários à compreensão dos fenômenos acústicos que ocorrem no interior de uma sala, com foco na caracterização acústica através da obtenção da resposta ao impulso e na simulação computacional de parâmetros objetivos.

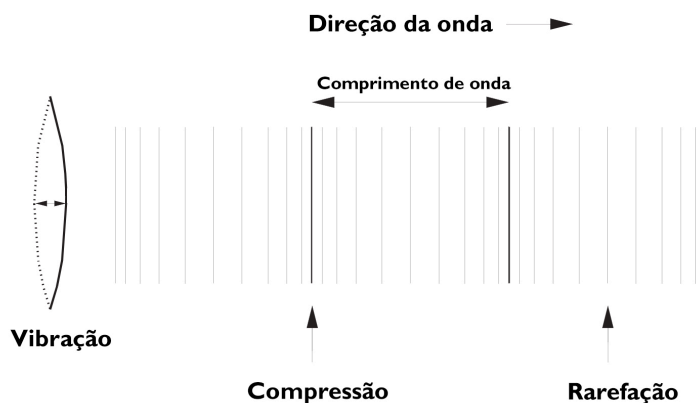
### **2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE ACÚSTICA**

A acústica tornou-se um campo de estudo interdisciplinar, compreendendo disciplinas acadêmicas de diversas áreas como física, engenharia, psicologia, fonoaudiologia, audiolgia, música, arquitetura, fisiologia, neurociência, entre outras. Dentre as várias subdivisões da acústica, Rossing (2007) elencou a acústica arquitetônica, acústica física, acústica musical, psicoacústica, eletroacústica, controle de ruído, choque e vibração e acústica subaquática como sendo as principais delas.

De acordo com Raichel e Hansen (2003), a acústica refere-se ao estudo do som, particularmente no que se concerne à sua produção, transmissão através de meios sólidos e fluidos, e qualquer outro fenômeno produzido pela sua propagação através de um meio. Segundo os autores, o som pode ser descrito como a passagem de flutuações de pressão (ondas sonoras) através do ar ou de outro fluido qualquer, resultado de um impulso de vibração transmitido a esse meio. Esse sinal acústico pode surgir a partir de várias fontes sonoras e pode conter apenas uma frequência, como no caso de uma onda senoidal pura, ou pode ser formada por muitos componentes de frequência, como no caso de uma palavra falada ou uma música tocada por uma orquestra.

Como representado na Figura 1, o som pode ser representado por uma série de compressões e rarefações do meio em que se propaga, a partir da fonte sonora. A passagem dessa onda faz com que as partículas de ar se movam para trás e para frente paralelamente à direção de movimento da onda. Deste modo, pode-se afirmar que as ondas sonoras são, portanto, longitudinais, em vez de transversais como ondas que se deslocam ao longo de uma corda (BARRON, 2009).

Figura 1 – Ilustração de uma onda sonora simples indicando áreas alternadas de compressão e rarefação.



Fonte: Adaptado de BARRON, 2009, pág. 10.

Como todo fenômeno físico, a onda sonora pode ser descrita através de um modelo físico-matemático. Assim, torna-se necessário definir algumas propriedades físicas do som que são de fundamental importância para a compreensão desta pesquisa.

A amplitude ( $A$ ) de uma onda sonora é determinada pela magnitude da variação da pressão. No entanto, a resposta do ouvido humano a essas pressões não é linear e pode ultrapassar a razão de um a um milhão (BARRON, 2009). Para solucionar esse problema, criou-se uma maneira conveniente de comparar a pressão sonora de um som com outro, através da escala logarítmica. Para evitar que essa escala seja muito comprimida, um fator de divisão adequado é introduzido, dando origem ao decibel, que é uma medida de relação de energias ou potências (BIES e HANSEN, 2009).

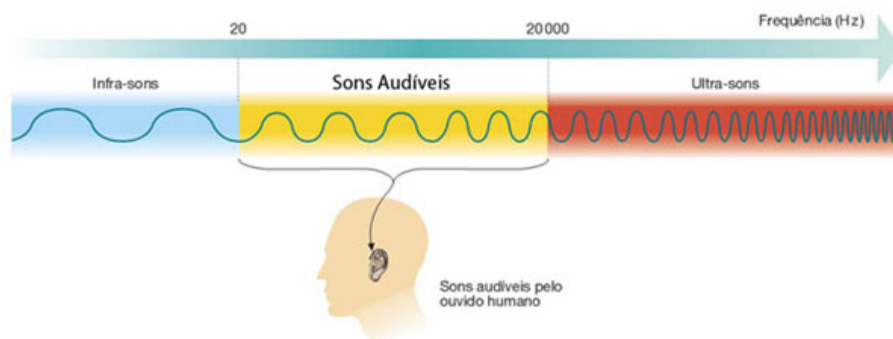
A frequência ( $f$ ) é a grandeza física que expressa o número de ocorrências de um evento (ciclos) por um determinado intervalo de tempo ( $s$ ), e é expressa em Hertz, em homenagem ao físico alemão Heinrich Hertz (EVEREST e SHAW, 2001).

Um sinal acústico pode ou não ser audível para o ouvido humano, dependendo do seu conteúdo de frequência e intensidade. Na Figura 2, a faixa identificada na cor vermelha é chamada de ultrassom e apresenta frequências que são muito elevadas (maior que 20 kHz), tornando o som inaudível para o ouvido humano. Na faixa abaixo de 20 Hz, denominada de infrassom e representada pela cor azul, o som fica muito baixo (em termos de frequência) e também não pode ser ouvido por um ser humano. Deste modo, a faixa de frequência sonora que pode ser ouvida pelo ser humano é representada pela cor amarela e está entre 20 Hz e 20 kHz (RAICHEL e HANSEN, 2003).

Em projetos de arquitetura e engenharia relacionados à acústica de salas, normalmente são utilizadas bandas de frequência de uma oitava centradas nas frequências de 125, 250, 500,

1000, 2000, 4000 Hz (ISO, 2009). Em salas para música, as bandas de 63 Hz e de 8000 Hz podem tornar-se relevantes quando os sons produzidos têm componentes espectrais nessas faixas de frequência.

Figura 2 – Representação do espectro sonoro.



Fonte: Repositório digital do Prof. Nunes Machado<sup>1</sup>

Para Bistafa (2011), período ( $T$ ) é o intervalo de tempo decorrido para que um ciclo se complete na curva de variação de pressão ambiente com o tempo. Segundo o autor, se a frequência  $f$  de uma vibração é conhecida, o período de tempo  $T$  para um ciclo completo de vibração pode ser encontrado pela relação simples:

$$T = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

onde:

$T$  é o período em segundos (s);

$f$  é a frequência medida em Hertz (Hz).

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) é definido por Bistafa (2011) como sendo a distância, a partir de qualquer valor de pressão sonora, que uma onda percorre para completar um ciclo. No caso de um ciclo de ondas periódicas, o comprimento de onda pode ser medido entre picos sucessivos ou entre quaisquer dois pontos correspondentes. A equação do comprimento de onda é dada por:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2)$$

<sup>1</sup> Disponível em: <[https://www.aulas-fisica-quimica.com/8f\\_07.html](https://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html)> Acesso em jan. 2017.

onde:

$\lambda$  é comprimento de onda de uma onda sonora;

$c$  é velocidade do som em m/s;

$f$  é a frequência da onda em Hz.

A velocidade do som ( $c$ ) é a velocidade de propagação das ondas sonoras através do meio dado. À temperatura de 20° Celsius e à pressão atmosférica padrão, a velocidade do som no ar é de aproximadamente 343 m/s e é independente das alterações na pressão barométrica, na frequência e no comprimento de onda, mas é diretamente proporcional à temperatura absoluta (SETO, 1971). Assim, a velocidade do som nos fluidos é dada por:

$$c = \sqrt{\gamma p / \rho} \quad , \quad (3)$$

onde:

$\gamma$  é a relação entre o calor específico do ar a pressão constante e o volume constante;

$p$  é a pressão em newtons/m<sup>2</sup>;

$\rho$  é a densidade do ar em kg/m<sup>3</sup>.

Quando uma onda sonora encontra-se em Movimento Harmônico Simples (MHS), ela pode ser representada por uma função senoidal (Figura 3) ou cossenoidal em que a abscissa representa o tempo decorrido e a ordenada representa o deslocamento das moléculas do meio de propagação ou a variação de pressão, densidade ou velocidade (RAICHEL e HANSEN, 2003). Esse deslocamento  $x(t)$  é descrito pela equação:

$$x(t) = A \cos(2\pi ft + \phi) \quad \text{ou} \quad x(t) = A \cos(\omega t + \phi) \quad (4)$$

onde:

$A$  é amplitude máxima do deslocamento (dB);

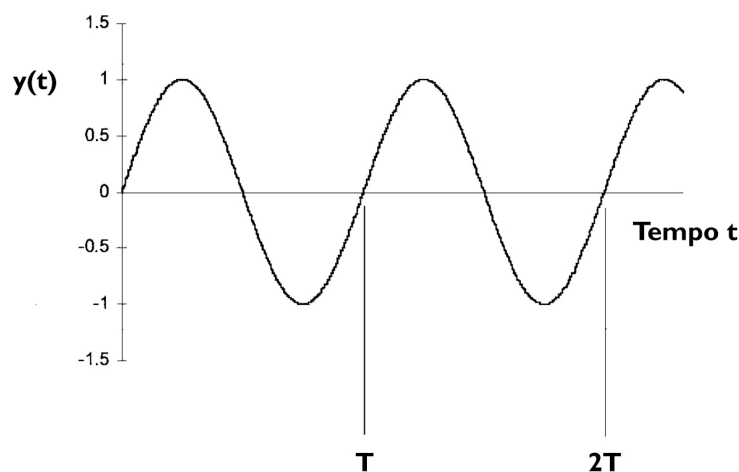
$t$  é a variável temporal (s);

$f$  é a frequência do movimento (Hz);

$\omega$  é a frequência angular (rad/s);

$\phi$  é a fase da onda (rad).

Figura 3 – Representação de uma onda senoidal  $y(t)$ .



Fonte: Adaptado de RAICHEL e HANSEN, 2003, pág. 14.

## 2.2 FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA DE SALAS

O principal objetivo do estudo da acústica de salas é criar condições que garantam a melhor propagação possível do som de uma fonte sonora para um ouvinte posicionado no ambiente. Fuchs e Möser (2013) afirma que quando a fonte em questão refere-se à fala, o critério de qualidade de transmissão é a boa inteligibilidade da voz. No caso da música, o sucesso dos resultados acústicos de sala depende dos hábitos de audição dos ouvintes, bem como de outros fatores que não podem ser facilmente quantificados. O modo com que o ouvinte percebe os sons, quando situado no interior de uma sala, depende, fundamentalmente, das características físicas da fonte sonora, da posição relativa entre a fonte sonora e o ouvinte, das características arquitetônicas do espaço e da natureza subjetiva com que o ser humano avalia a sensação provocada por um estímulo sonoro (PEREIRA, 2010). Brandão (2016) ainda aponta outra preocupação do estudo da acústica de salas, que é a representação tempo-espaço-frequência dos sinais sonoros que se propagam no interior de um ambiente e o controle da propagação das ondas nesse espaço, de forma que ele se torne acusticamente adequado ao seu uso principal. Desse modo, auditórios, salas de conferências, teatros, salas de concerto, igrejas, etc. são considerados objetos de estudo da acústica de salas.

### 2.2.1 Propagação de ondas sonoras

Em um ambiente fechado, o tamanho e a geometria da sala combinados aos efeitos de reflexão, difração e absorção definem a distribuição de energia acústica proveniente de fontes sonoras. Assim, com a influência de todos esses efeitos na difusão das ondas, não é mais pertinente considerá-las como frentes de onda individuais, e sim como um campo sonoro em torno da fonte (RAICHEL e HANSEN, 2003).

A partir dessas considerações, Barron (2009) definiu *campo livre* como sendo uma região em torno da fonte na qual o padrão de som emula o de um espaço aberto e nenhum efeito ocorre para interferir nas ondas que derivam dessa fonte. Nesse sentido, Bauman (2011) explica que a intensidade de uma onda sonora varia em proporção inversa ao quadrado da distância à fonte, fundamentando assim o princípio da lei do inverso do quadrado (Figura 4). Para ele, essa lei revela a imensa importância de sustentar as reflexões sonoras e é dada através da equação:

$$\frac{I_1}{I_2} = \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2, \quad (5)$$

onde:

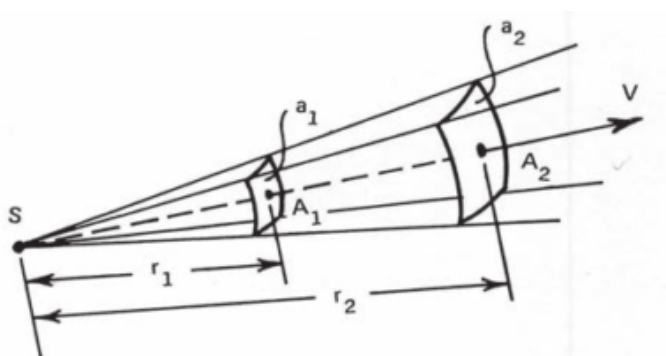
$I_1$  é a intensidade da onda sonora no ponto  $A_1$ ;

$I_2$  é a intensidade da onda sonora no ponto  $A_2$  e é igual a  $I_1$ , considerando que nenhuma energia é perdida no caminho;

$r_1$  é a distância da fonte ao ponto  $A_1$ ;

$r_2$  é a distância da fonte sonora ao ponto  $A_2$ .

Figura 4 – Diminuição da intensidade do som com aumento da distância.

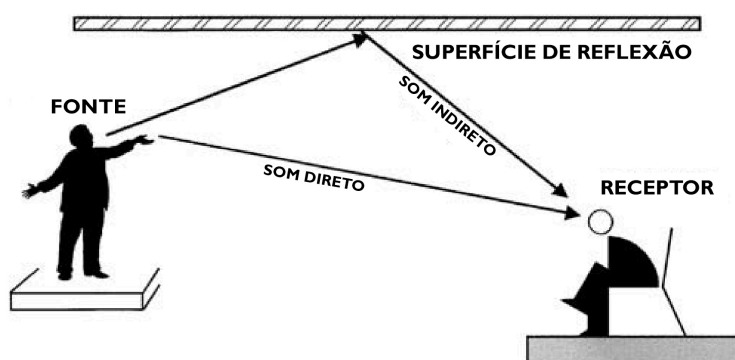


Fonte: BAUMANN, 2011, pág. 91.

O *campo difuso* ocorre quando um grande número de ondas refletidas ou difratadas se combinam para tornar a energia sonora uniformemente distribuída no ambiente onde a medição é realizada (RAICHEL e HANSEN, 2003). Esse som chega em diferentes momentos ao ouvinte e pode ser classificado como som direto e som indireto. É importante destacar que a percepção sonora em um ambiente depende da intensidade e da relação temporal entre o som direto e o som indireto refletido pelas superfícies da sala.

O *som direto* corresponde à energia sonora transmitida diretamente entre fonte e receptor antes que o ouvinte receba qualquer reflexão sonora proveniente das superfícies internas da sala (Figura 5). Já o *som indireto*, subdividido em reflexões primárias (*early sound*) e som reverberante, atinge uma ou mais superfícies e é refletido uma ou mais vezes antes de atingir o receptor (BAUMANN, 2011).

Figura 5 – Ilustração da recepção do som direto e indireto pelo ouvinte.

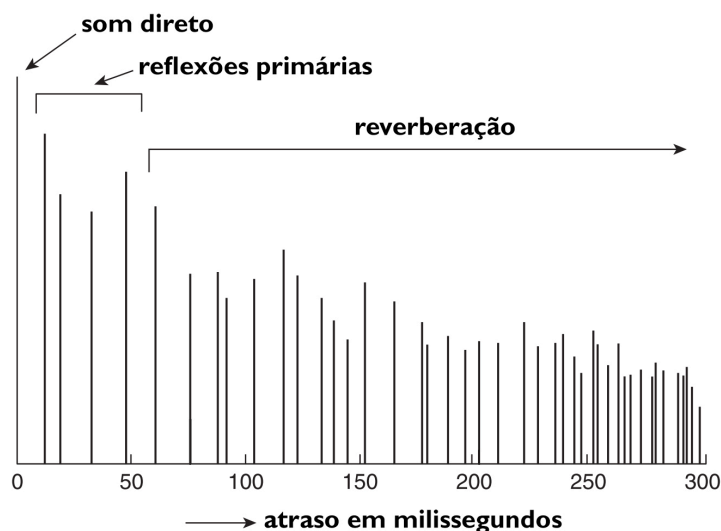


Fonte: Adaptado de RAICHEL e HANSEN, 2003, pág. 246.

À medida que o tempo passa, o número de reflexões aumentam e a energia de cada reflexão diminui devido ao efeito da absorção sonora, mesmo que a superfície seja considerada um refletor ideal. Para Beranek (1962), as reflexões primárias são aquelas que chegam ao receptor até os primeiros 80 ms após a chegada do som direto, enquanto o som reverberante é composto pelas reflexões fracas que chegam posteriormente e que se fundem, sendo subjetivamente percebidas como reverberação.

Kuttruff (2009) explica que se marcarmos os tempos de chegada das várias reflexões por traços perpendiculares sobre um eixo temporal horizontal e escolher as alturas dos traços proporcionais à energia relativa contida neles, obtemos o que é frequentemente chamado de “diagrama de reflexão” ou “reflectograma”. Ele contém todas as informações significativas sobre a estrutura temporal do campo sonoro no ponto analisado da sala (Figura 6).

Figura 6 – Esquema do diagrama de reflexão.

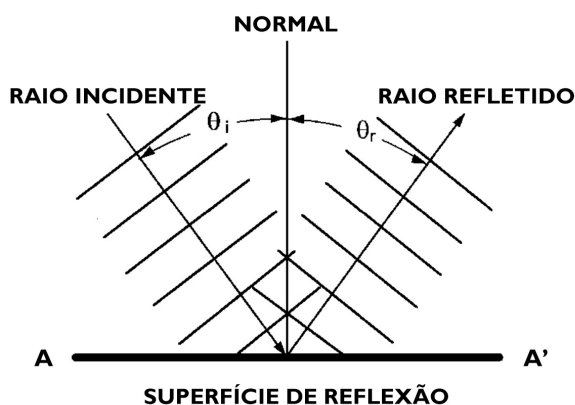


Fonte: Adaptado de KUTTRUFF, 2009, pág. 109.

Para equilibrar a resposta de uma sala é necessário obter informações de como as ondas sonoras interagem com as superfícies do ambiente e como essa interação afetará as características acústica do espaço.

Quando uma onda atinge uma superfície, uma parte de sua energia é absorvida pela face e o restante é refletido. Se essa superfície for dura e lisa, as ondas são refletidas com forma e características de propagação inalteradas, de acordo com o princípio de *Huygens*. Esse princípio afirma que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, definidos entre um plano normal ao plano de reflexão e os raios incidente e refletidos (Figura 7), respectivamente (RAICHEL e HANSEN, 2003).

Figura 7 – Representação geométrica de uma reflexão de onda plana.



Fonte: Adaptado de RAICHEL e HANSEN, 2003, pág. 40.



A fração de energia sonora (ou intensidade) não refletida é caracterizada pelo coeficiente de absorção  $\alpha$  da parede, o qual é definido como a proporção da intensidade não refletida em relação à incidente, e depende geralmente do ângulo de incidência e das frequências dos componentes espectrais do som incidente. Assim, o raio refletido geralmente tem um espectro de potência diferente e uma intensidade menor do que o raio incidente (KUTTRUFF, 2009).

Baumann (2011) afirma que os coeficientes de absorção dependem da porosidade, elasticidade, massa vibratória ou, em outras palavras, do material, da qualidade da superfície e da fixação e construção da subestrutura. Eles podem ser encontrados na literatura (Tabela 1), ou podem ser extraídos de resultados de ensaios específicos.

De acordo com Vorländer (2008), a maioria dos coeficientes de absorção corresponde à incidência sonora difusa, pois foram obtidos a partir de medições em câmaras de reverberação baseadas na teoria de Wallace Sabine e estão dispostas na norma ISO 354.

Tabela 1 – Valores padrão do coeficiente de absorção de alguns materiais de construção. Absorção total:  $\alpha = 1$ ; Reflexão total:  $\alpha = 0$ .

<b>Coeficiente de Absorção</b>	<b><math>\alpha</math> para a média das frequências (Hz)</b>					
<i>Superfícies de parede e teto</i>	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2000</i>	<i>4000</i>
Mármore	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Concreto, estuque, pintura a óleo	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
Cimento de gesso, papel de parede	0,03	0,03	0,02	0,04	0,05	0,08
Placa de madeira, aglomerado em terreno firme	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Janela de vidro	0,25	0,15	0,10	0,05	0,03	0,03
<i>Pisos</i>						
Bloco de concreto	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Piso de madeira em barras	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,06
Plataforma de madeira sobre cavidade	0,12	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06
Piso parquet em subsolo firme	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Piso parquet sobre cavidade	0,10	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06
Carpete, com menos de 6 mm de espessura	0,02	0,04	0,06	0,20	0,30	0,35
Carpete, de 7 a 10 mm de espessura	0,04	0,07	0,12	0,30	0,50	0,50
<i>Cadeiras ocupadas, com 1,15 m de distância entre fileiras:</i>						
Cadeiras de madeira	0,01	0,15	0,30	0,40	0,55	0,60
Cadeiras dobráveis, estofados de 20 mm de espessura	0,30	0,35	0,50	0,60	0,70	0,70

Fonte: Adaptado de BAUMANN, 2011, pág. 104.

Dependendo da relação entre comprimento de onda e dimensões da sala, o modelo matemático usado para calcular o campo acústico pode mudar. Esse problema pode ser resolvido através da divisão do espectro audível em regiões que possibilitem uma solução matemática específica para cada uma delas (BRANDÃO, 2016).

Para demarcar essa divisão, é preciso definir o ponto de transição entre a região onde predominam os modos normais das salas e a região onde há o predomínio da difusão sonora, denominado frequência de *Schröder* ou frequência de corte da sala (LONG, 2006). Deste modo, na região abaixo dessa frequência, deve-se trabalhar com a acústica ondulatória. Acima dela, as ondas sonoras em uma sala podem ser tratadas como raios ou partículas e as soluções matemáticas encontram-se fundamentadas na acústica estatística e geométrica.

A frequência de Schröder é definida por:

$$f_s \cong 2000 \sqrt{\frac{RT}{V}}, \quad (6)$$

onde:

V é o volume da sala (m<sup>3</sup>);

RT é o tempo de reverberação (s).

Um estudo realizado por Mak e Wang (2015) apontam os recentes avanços em acústica arquitetônica é dá uma visão geral dos métodos de previsão e suas aplicações, classificando, além dos métodos experimentais, três métodos de modelagem que são amplamente utilizados na acústica da sala: métodos acústicos baseados em ondas (acústica ondulatória), métodos de equações de difusão (acústica estatística) e métodos acústicos geométricos (acústica geométrica).

### 2.2.2 Acústica ondulatória

A acústica ondulatória se baseia na resolução da equação diferencial da onda para resolver qualquer problema físico em acústica. Essa equação define o comportamento no espaço e no tempo da pressão, densidade e outras variáveis de uma onda sonora, demonstrando que cada região de uma sala representa um sistema capaz de vibrar nas suas três dimensões (LONG, 2006). Segundo Brandão (2016), a capacidade de resolver essa equação depende do conhecimento da geometria do problema em três dimensões, do

conhecimento das condições de contorno relacionadas à geometria da sala e do conhecimento das condições iniciais do problema físico. Por essas razões, ela pode se tornar bastante complexa e raramente é usada de forma direta na acústica arquitetônica, embora seja importante para a compreensão de muitos fenômenos acústicos. A equação da onda é definida por:

$$\nabla p(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (7)$$

onde:

$p(\vec{r}, t)$  é o valor da pressão sonora em função da coordenada espacial  $\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$  e da coordenada temporal  $t$ ;

$c$  é a velocidade do som no meio;

$\nabla^2$  é o Operador Laplaciano que representa a variação espacial da pressão sonora (e pode ser dado em coordenadas cartesianas, esféricas e cilíndricas, dependendo da geometria do problema que se deseja modelar). Em coordenadas cartesianas é dado por

$$\nabla^2(.) = \frac{\partial^2(.)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(.)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(.)}{\partial z^2} \quad (\text{BRANDÃO, 2016}).$$

Em casos mais complexos, soluções aproximadas da equação da onda são possíveis por meio de métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (FEM), o Método dos Elementos de Contorno (BEM), Método das diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD), dentro outros (SAKUMA, SAKAMOTO e OTSURU, 2014). Essa solução é denominada “aproximada” no sentido de que essa não é a solução analítica do problema, apesar da solução encontrada por esses métodos ser considerada bastante exata (BRANDÃO, 2016).

É importante destacar que esta pesquisa não abordou o estudo dos modos acústicos, nem as relações de proporção da geometria de salas. Considerações mais aprofundadas neste sentido demandariam mais tempo de pesquisa, bem como análises mais complexas das dimensões e geometrias do ambiente, envolvendo a teoria da acústica ondulatória. Entretanto, essa abordagem não se constitui como objeto deste trabalho.

### 2.2.3 Acústica estatística

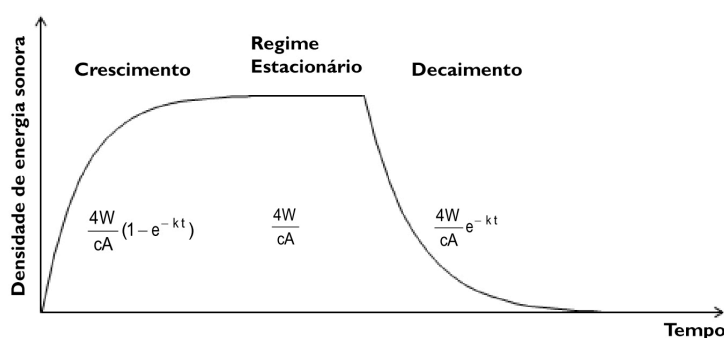
A teoria estatística é baseada na hipótese do campo sonoro difuso. Dessa forma, a distribuição de energia acústica no ambiente é uniforme em qualquer instante de tempo (BARBO, 2009).

Os métodos de cálculo desse modelo ponderam, para análise, as informações como volume e a área das superfícies da sala, e desconsideram as que são referentes à geometria do ambiente. Dessa forma, essa teoria tem a vantagem de ser matematicamente simples e sua implementação prática é, portanto, computacionalmente leve (BRANDÃO, 2016).

A modelagem de evolução temporal da distribuição da densidade de energia sonora no interior de uma sala, considerando a aproximação de campo difuso, está representada na Figura 8.

Quando uma fonte emite ondas sonoras por um período de tempo, a densidade de energia tende a aumentar até alcançar um valor máximo, visto que a energia absorvida pelos objetos da sala é menor que a energia fornecida pela fonte. Com a fonte permanecendo ligada, um campo sonoro estacionário no interior da sala é formado, devido à taxa de produção de energia sonora ser igual à taxa de absorção das superfícies do ambiente (PEREIRA, 2010).

Figura 8 – Densidade de energia *versus* tempo.



Fonte: PEREIRA, 2010, pág. 22.

De acordo com o modelo teórico, ao desligar-se a fonte, as frentes de onda continuarão a se propagar por um período e, a medida que elas atingem as superfícies de absorção do ambiente, a energia sonora decresce gradativamente ao longo tempo.

Sabine (1922) foi o primeiro a realizar experimentos relativos a esse fenômeno e chamou de Tempo de Reverberação, o período de tempo que a energia sonora leva para decair à milionésima parte da energia em regime estacionário.

A teoria estatística pode ser um ponto de partida para a modelagem por meio dos métodos baseados em acústica geométrica, pois permite fazer cálculos iniciais do tempo de reverberação em uma sala e determinar quais os materiais serão usados no tratamento acústico e suas respectivas áreas.

#### 2.2.4 Acústica geométrica

A acústica da sala geométrica investiga a distribuição do som através do rastreamento de raios e suas reflexões nas superfícies, semelhante aos raios de luz refletidos nos espelhos, e cada um desses raios possui as informações do espectro de potência e da distância percorrida pela onda (BAUMANN, 2011). Propagando-se em linha reta, o raio sofre os efeitos dissipativos causados pela viscosidade do meio (ar) e principalmente pelas superfícies de contorno da sala, que incluem os fenômenos de absorção, reflexão especular e reflexão difusa.

Nessa teoria, a descrição do campo sonoro é reduzida a energia, tempo de transição e direção dos raios, tornando-se uma abordagem correta apenas se as dimensões da sala forem grandes em relação aos comprimentos de onda. Segundo Vorländer (2008), estas aproximações são válidas com precisão em salas grandes acima da frequência de corte  $f_c$ . Brandão (2016) esclarece que essa teoria se fundamenta no princípio de *Fermat*, o qual afirma que toda frente de onda se propaga pelo caminho que levar o menor tempo entre dois pontos.

Essa teoria, assim como a estatística, é válida apenas quando existe alta densidade modal no ambiente, e possui a vantagem de considerar a geometria da sala. Entretanto, sua implementação requer um software dedicado, como, por exemplo, ODEON, EASE, CATT, RAIOS, etc.

### 2.3 MODELAGEM EM ACÚSTICA GEOMÉTRICA

Como regra geral, a maioria dos modelos de previsão utilizados em salas baseiam-se na acústica geométrica, em parte combinada com conceitos estatísticos para incluir os efeitos de dispersão sonora (VIGRAN, 2008). Esses modelos se baseiam em técnicas, dentre as quais se destacam a modelagem analógica e a modelação digital. Na modelagem analógica, modelos arquitetônicos da sala são construídos em uma determinada escala e, posteriormente, técnicas de medição são aplicadas ao modelo. Já na modelação digital, algoritmos de cálculo

baseados em modelos físicos e matemáticos são implementados para simulação computacional da sala e das suas características acústicas (VORLÄNDER, 2008).

### 2.3.1 Modelos analógicos (modelos em escala)

Os modelos em escala acústica têm sido utilizados desde a década de 1930 para estudar o comportamento do som em salas (Figuras 9 e 10). Com o detalhamento da geometria e o cuidado na escolha de materiais para a construção do modelo, esta técnica pode fornecer os parâmetros acústicos que se pretende encontrar, bem como previsões bastante precisas da respostas ao impulso da sala (VORLÄNDER, 2008). Rossing (2007) explica que, quando a sala possui muitas superfícies irregulares ou objetos que difundem ou difratam as ondas sonoras, os modelos em escala ainda são considerados mais confiáveis do que os modelos computacionais. No entanto, o uso de modelos físicos em escala é limitado a projetos maiores, onde se tem uma maior exigência acústica, já que construir e testar o modelo é muito mais demorado e oneroso do que desenvolver o projeto através de simulação computacional.

Nessa técnica, as áreas absorventes do modelo são pintadas de preto ou cobertas com papel ou tecido preto, as áreas de reflexão difusa podem ser bem simuladas através do papel branco fosco, enquanto as áreas refletoras são confeccionadas de chapa polida. Atualmente a luz é utilizada nos procedimentos experimentais e a distribuição de energia pode ser detectada com fotocélulas ou por fotografia (KUTTRUFF, 2009).

Figura 9 – Modelo acústico em escala da Sala de Concerto *Barbican*, em Londres.



Fonte: BARRON, 2009, pág. 63.

Figura 10 – Modelo de acrílico de uma sala de concertos (Centro Cultural *Ataturk* em Ancara), escala 1:20.



Fonte: FUCHS, 2013, pág. 164.

### 2.3.2 Modelos digitais

Embora hoje em dia os experimentos com modelos em escala ainda sejam uma ferramenta poderosa no estudo de acústica de salas, cada vez se utilizam as simulações computacionais no desenvolvimento de projetos nessa área, obtendo-se resultados equivalentes aos obtidos com os modelos analógicos. Os modelos computacionais datam da década de 60, quando Krokstad et al. (1968) realizaram os primeiros experimentos com um modelo baseado em reflexões do espelho, utilizando um computador dedicado ao processamento de um grande volume de informações. Desde então, a maior parte desses *softwares*, muitos dos quais comercialmente disponíveis, são desenvolvidos para prever a propagação do som em grandes salas.

Bork (2000) aponta uma série de atributos que esses programas precisam ter em relação à capacidade de cálculo. Brandão (2016) ratifica essas informações, afirmando que esses *softwares* devem ser capazes de: calcular diversos parâmetro acústicos objetivos; serem exatos e confiáveis, necessitando do processo de validação experimental; poder trabalhar com salas abertas, superfícies curvas, superfícies sobrepostas, efeitos de absorção de plateia, etc.; incluir os efeitos de reflexão difusa; modelar a direcionalidade de fontes e receptores; modelar a variação de coeficientes de absorção e espalhamento com a frequência; dentre outros.

Os principais modelos matemáticos que estão por trás dessas ferramentas são o método de traçado de raios, o método de fonte de imagens e os métodos híbridos que

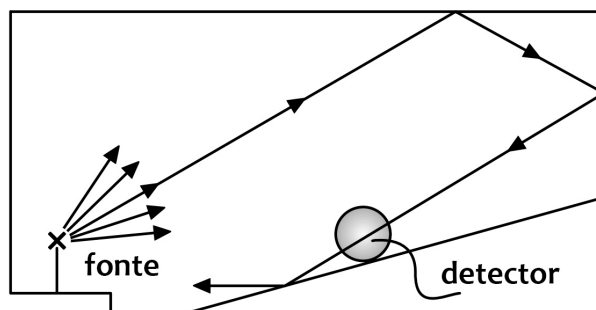
combinam princípios dos dois primeiros métodos (VIGRAN, 2008). Segundo Vorländer (2008), a principal diferença entre o traçado de raios (na definição clássica) e as fontes de imagem é a maneira pela qual a detecção de energia e a natureza interna da propagação de energia física são implementadas.

- **Método de traçado de raios**

Kuttruff (2009) e Vorländer (2008) fornecem conceitos mais modernos e uma descrição relativamente detalhada sobre a implementação desse método. Uma fonte sonora omnidirecional irradia, no instante inicial ( $t=0$ ), um impulso simulado através de raios (ou partículas) que são emitidos em várias direções. Brandão (2016) afirma que cada raio sonoro porta a mesma quantidade de energia que se propaga à velocidade do som e, de vez em quando, atinge o limite da sala (parede) que é uma superfície considerada plana (em um modelo simplificado).

Kuttruff (2009) explica que, neste momento, a partícula será refletida de forma especular ou difusa. No primeiro caso, sua nova direção é calculada a partir da lei da reflexão geométrica. No entanto, se ocorrer a reflexão perfeitamente difusa, o computador gera dois números aleatórios a partir dos quais os ângulos da nova direção são calculados em relação a um sistema de coordenadas esféricas locais. Após a sua reflexão, a partícula continua no seu caminho em direção à próxima parede, e assim por diante (Figura 11).

Figura 11 – Rastreamento de um raio da fonte ao detector.



Fonte: Adaptado de VORLÄNDER, 2008, pág. 182.

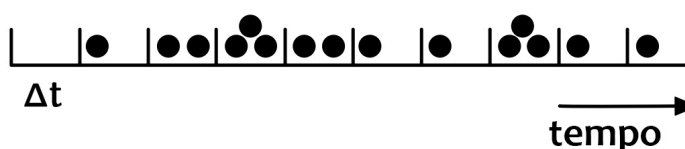
Assim que a energia da partícula cair abaixo de um valor estabelecido ou for completamente absorvida, o processo é truncado e o caminho de outra partícula será "rastreado". Esse procedimento é repetido até que todas as partículas emitidas pela fonte de som tenham sido seguidas.



Os resultados deste método são capturados por meio de "contadores" que podem ser áreas de contagem previamente atribuídas ou volumes de contagem. Sempre que uma partícula cruza esse contador, sua energia e tempo de chegada são armazenadas (Figura 12), e se necessário, também a direção a partir da qual chegou (VORLÄNDER, 2008).

Figura 12 – Representação gráfica de um histograma.

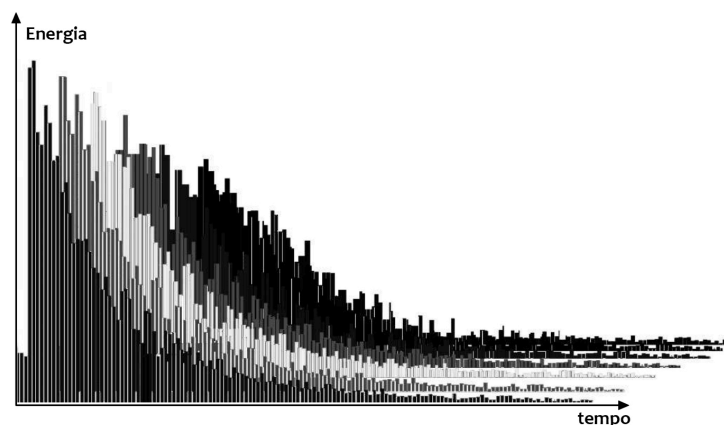
### histograma



Fonte: Adaptado de VORLÄNDER, 2008, pág. 182.

Após o processo ter terminado, isto é, a última partícula foi seguida, as energias recebidas são classificadas em relação aos tempos de chegada das partículas. O resultado é um histograma (Figura 13), que pode ser considerado como uma resposta de impulso energético em média de curto prazo.

Figura 13 – Resposta ao impulso para várias bandas de frequência utilizando *ray tracing*.



Fonte: Adaptado de VORLÄNDER, 2008, pág. 187.

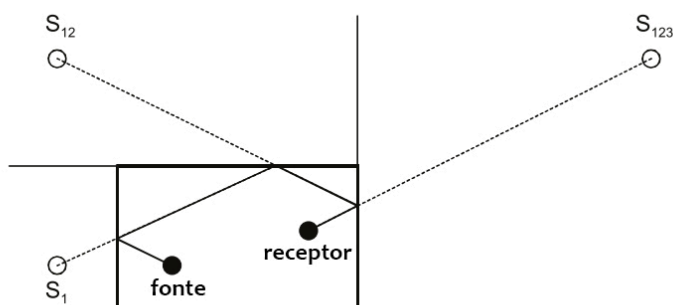
Brandão (2016) ainda destaca que, do ponto de vista computacional, o espaço ao redor da fonte será varrido por uma quantidade finita de raios ( $N_r$ ). Teoricamente, quanto maior for o número de raios, maior será a exatidão dos cálculos. No entanto, o aumento do número de raios implica em um aumento do custo computacional e do tempo de cálculo gasto pelo *software*.

O método de traçado de raios pode ser modificado e otimizado de várias maneiras. Assim, além de escolher a direcionalidade da fonte sonora, pode-se também estudar o efeito combinado de mais de uma fonte. Isso permite que o projetista otimize a configuração de um sistema eletroacústico para o ambiente, por exemplo. Além disso, qualquer combinação de reflexões das paredes puramente especulares ou idealmente difusas pode ser avaliadas nesse método (KUTTRUFF, 2009).

- **Método de fonte de imagem**

O método de fonte de imagem considera todas as reflexões das superfícies de contorno como contribuições sonoras de imagens da fonte real. De acordo com Long (2006) e Kuttruff (2009), essa técnica utiliza a imagem espelhada da fonte como o ponto de origem de um novo raio, desenhado através do ponto de interseção na superfície atingida. As demais imagens são desenhadas até que a ordem de reflexão desejada seja alcançada (Figura 14).

Figura 14 – Trajetória entre uma fonte e um receptor de imagem de terceira ordem.



Fonte: Adaptado de VIGRAN, 2008, pág. 135.

Long (2006) e Vigran (2008) afirmam que é relativamente simples encontrar todas essas fontes de imagem para um ambiente com um formato retangular simples, por exemplo. No entanto, no caso de salas com geometria mais complexa, a maioria dessas fontes não são visíveis em uma determinada posição do receptor ou podem ser invisíveis em qualquer parte da área de audiência (Figura 15). Isso significa que um número de reflexões fisicamente inválidas deverão ser separadas das fontes de imagem "válidas", o que torna o processo demorado quando se trata de reflexões de ordem superior. Dessa forma, a maior dificuldade para realizar o teste de visibilidade é verificar quando um ponto de interseção está contido em um certo polígono. Outra questão é saber quantos testes devem ser realizados para encontrar

uma fonte “invisível” (GOMES, 1998). De acordo com Vorländer (2008), o número de fontes imagem, de acordo com a ordem de reflexão e o número de paredes da sala segue a seguinte lei:

$$N = \left[ (n_w - 1)^i - 1 \right], \quad (8)$$

onde:

$N$  – número de fontes imagem; (2.4.1)

$n_w$  – número de paredes;

$i$  – ordem de reflexão.

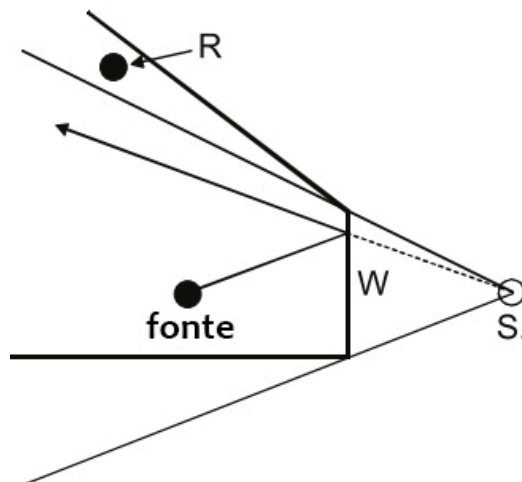
Já o tempo de cálculo ( $t_{calc}$ ) necessário para é de, aproximadamente:

$$t = t_s \cdot N, \quad (9)$$

onde:

$t_s$  - tempo necessário para realizar o teste de interseção de um ponto com o polígono.

Figura 15 – Exemplo da fonte de imagem não sendo visível nas posições do receptor R.



Fonte: Adaptado de VIGRAN, 2008, pág. 136.

O modelo de fonte de imagem clássico é, portanto, aplicável e eficiente para o caso de respostas de impulso curto (segunda ou terceira ordem), para geometrias simples (pequena  $n_w$ ) e para salas retangulares (uma vez que o teste de audibilidade pode ser omitido) (VORLÄNDER, 2008).

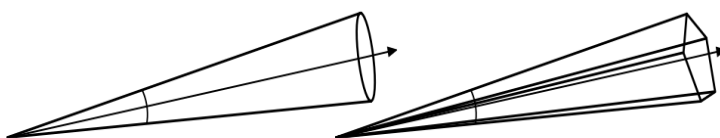
A vantagem deste tipo de modelagem é que, quando realizada com exatidão, cobre todos os caminhos de transmissão entre a fonte e o receptor, podendo produzir respostas ao impulso válidas. Entretanto, Long (2006) alerta para o fato do número de cálculos necessários e o nível de processamento computacional serem relativamente altos.

- **Métodos híbridos**

Inúmeros *softwares* para previsões da acústica de salas são baseados em modelos que podemos caracterizar como sendo híbrido. Eles compreendem elementos de métodos de rastreamento de raios, bem como de métodos de fontes de imagem.

Os algoritmos específicos desses modelos híbridos são conhecidos como "traçado de cone", "rastreamento de feixe", "rastreamento de pirâmide", dentre outros (Figura 16). Eles podem suportar reflexões especulares e difusas para estimar o espectro de reverberação tardia e são a solução para a obtenção de respostas impulsivas muito próximas aos resultados das medições (VORLÄNDER, 2008).

Figura 16 – Rastreamento de cone (esquerda) e pirâmide (direita).



Fonte: VORLÄNDER, 2008, pág. 211.

Os modelos especulares puros (modelos de imagem) não são capazes de simular com precisão os campos sonoros da sala. Portanto, é fundamental desenvolver uma combinação entre esse métodos para obter melhor resolução temporal na qualidade da taxa de amostragem, inclusão de efeito de dispersão (*scattering*) e verificação de audibilidade (auralização<sup>2</sup>) mais rápida das fontes de imagem (VORLÄNDER, 2008). Vigran (2008) ainda aponta a redução do tempo de processamento computacional como sendo um dos principais motivos para desenvolver esses tipos de programas.

---

<sup>2</sup> Auralização é a técnica de criação de arquivos de som audíveis a partir de dados numéricos (simulados, medidos ou sintetizados) (VORLÄNDER, 2008).

## 2.4 MÉTODOS DE MEDIÇÃO ACÚSTICA

As medições acústicas são necessárias para a verificação e avaliação das condições acústicas de uma sala, com a finalidade de se obter uma base de planejamento para o dimensionamento das medidas a serem aplicadas no ambiente (FUCHS e MÖSER, 2013). Entretanto, para se chegar aos resultados dessas medições é necessário obter a Resposta ao Impulso (*Impulse Response* – IR) da sala. Segundo Rossing (2007) e Long (2006), a medição da IR é uma tarefa fundamental no projeto acústico, visto que, através dela, é possível fornecer uma descrição precisa acerca das características acústicas da sala e derivar todas as informações e parâmetros acústicos fundamentais desse ambiente.

Nesta seção serão abordados alguns conceitos sobre os principais métodos utilizados na medição da resposta ao impulso de uma sala, bem como serão feitas algumas considerações físicas e matemáticas sobre processamento de sinais, bem como sistemas lineares e invariantes no tempo, os quais são condições fundamentais para a obtenção da IR.

### 2.4.1 Sistema Linear Invariante no Tempo – SLIT

Um sistema linear possui duas importantes propriedades. A primeira, denominada de proporcionalidade, garante que, para um dado estímulo, o sistema responderá sempre de modo proporcional. A segunda, que é a propriedade de sobreposição, afirma que se uma entrada de um sistema é a soma ponderada de vários sinais, então a saída é simplesmente a soma ponderada das respostas do sistema para cada um destes sinais.

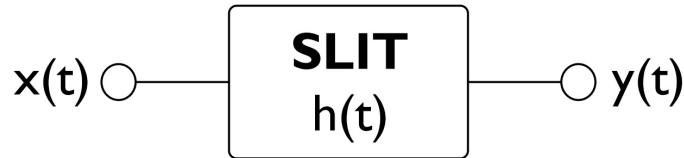
Já para um sistema ser considerado invariante no tempo, o comportamento e as características físicas desse sistema devem permanecer constantes ao longo do tempo (OPPENHEIM et al., 1998). Brandão (2016) explica que se as características físicas da sala (propriedades do ar, geometria e materiais aplicados) não se alterarem ao longo do tempo, bem como as características da fonte e do receptor sejam lineares, a configuração sala-fonte-receptor pode ser considerada um Sistema Linear e Invariante no Tempo (SLIT).

Se uma fonte emite um sinal contínuo  $x(t)$  qualquer, o sinal resultante  $y(t)$  captado em determinado ponto será dado por:

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_0^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau, \quad (10)$$

onde,  $h(t)$  é a resposta ao impulso do sistema e esta equação geral é a base para todas as considerações teóricas dos sistemas SLIT (Figura 17).

Figura 17 – Diagrama entrada e saída de um Sistema Linear e Invariante no Tempo – SLIT.



Fonte: Adaptado de VORLÄNDER, 2008, pág. 110.

De acordo com Figueiredo (2005), a equação acima enuncia que o sinal resultante de um sistema linear é dado pela convolução entre o sinal de estímulo e a resposta impulsiva do sistema. Pode-se expressar essa relação também no domínio da frequência por meio do teorema de convolução. Nesse caso, a equação 10 pode ser descrita por:

$$Y(\omega) = X(\omega)H(\omega), \quad (11)$$

onde,  $Y(\omega)$ ,  $X(\omega)$  e  $H(\omega)$  são as Transformadas de Fourier (também conhecidas como funções de transferência) do sinal captado, do sinal gerado e da resposta impulsiva, respectivamente.

Vorländer (2008) explica que quando um sistema linear e invariante no tempo é estimulado por um impulso ideal, isto é, quando o sinal de entrada for uma função delta de Dirac, o sinal de saída é denominado a resposta impulsiva do sistema. Sendo  $x(t) = \delta(t)$ , a saída é dada por:

$$y(t) = \delta(t) * h(t) = h(t), \quad (12)$$

#### 2.4.2 Processamento digital de sinais analógicos

As duas primeiras etapas em uma análise digital são amostragem e quantização. A amostragem pode ser definida como o processo de medição instantânea de valores de um sinal analógico em intervalos regulares. Esse intervalo entre as amostras é determinado por um

pulso de sincronismo e a sua frequência é chamada de taxa de amostragem. De outra forma, o sinal  $x(t)$  é substituído por um número  $N$  de amostras separadas por uma unidade de tempo  $\Delta t$ . O comprimento do sinal a ser analisado é então  $T = N \cdot \Delta t$ , e os cálculos são realizados tratando os dados como periódicos com um período de tempo de  $T$  (VIGRAN, 2008).

Segundo o Teorema de *Nyquist*, a taxa de amostragem ideal deve ser maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado, para que possa ser reproduzido integralmente sem erros. Como o ouvido humano é capaz de perceber até 20 kHz, uma frequência de amostragem de 40.000 Hz é a ideal para que se capture toda a informação necessária do sinal de áudio.

Já a quantização, realizada por um conversor analógico para digital (conversor AD), é o processo de atribuição de valores discretos para um sinal cuja amplitude varia entre infinitos valores. O número de bits manipulados pelo conversor AD dá a precisão dessas estimativas. Um conversor de 12 bits, por exemplo, processa o sinal em  $2^{12} = 4096$  passos, um 16 bits em 65536 passos, etc.

#### 2.4.3 Métodos para caracterização da resposta impulsiva

De acordo com Vorländer (1994), a resposta impulsiva acústica é uma função temporal da pressão sonora de um espaço acústico, que resulta da excitação desse espaço por uma função que se aproxima da função delta de Dirac. Como regra geral, a IR é obtida por meio da excitação da sala através da reprodução de um sinal em um alto-falante em vários locais da sala, e a captura do sinal sonoro se dá através de um microfone.

Diversos métodos para obtenção da resposta impulsiva de salas já foram desenvolvidos e eles se diferem, essencialmente, pelo tipo de sinais utilizados para excitação da sala e pela forma como o sinal de resposta é processado (FIGUEIREDO, 2005). Atualmente, as técnicas mais conhecidas são a excitação por impulsos (pistola de alarme ou pulso gerado eletronicamente e emitido por um sistema amplificação sonora), estática por sinusóides (*stepped tone*, *multitone*), por sequência aleatória de impulsos (*Maximum Length Sequences* – MLS), por um sinal “*sweep*” em que a frequência varia de forma linear ao longo do tempo (*Time Delay Spectrometry* – TDS) e por sinais “*sweep*” em que a frequência tem uma variação exponencial ao longo do tempo (*Exponential Sine Sweep* – ESS) (PEREIRA, 2010).

A varredura logarítmica apresenta alguns pontos positivos quando comparada ao método MLS. Um deles é o fato do método MLS ser vulnerável à não-linearidades do meio,

tornando seu uso desaconselhável para medição de grandes espaços abertos. Entretanto, o uso de MLS traz algumas vantagens: seu espectro é plano, exceto por uma pequena diferença em  $f = 0$  Hz; sua função de auto-correlação é um impulso periódico; por se tratar de uma sequência binária, a correlação cruzada é simples de ser computada; sendo um sinal determinístico, pode ser repetido precisamente (GOMES, 1998). Para Guidorzi et. al. (2015), a teoria por trás do uso da MLS está bem desenvolvida e não envolve problemas computacionais.

## 2.5 PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE SALAS

De acordo com Long (2006), inúmeras experimentos têm sido realizados para correlacionar julgamentos subjetivos de qualidade sonora com medidas objetivas de atributos acústicos, na tentativa de estabelecer uma avaliação matematicamente previsível de salas de concerto. Após a realização de inúmeras experiências subjetivas realizadas em salas reais e também em campos sonoros simulados, criou-se uma série de parâmetros subjetivos e medidas objetivas correspondentes, promovendo a padronização dos métodos de medição (ROSSING, 2007).

O primeiro livro publicado sobre o assunto foi o *Music, Acoustics and Architecture* de Beranek (1962), e é considerado um marco histórico para a acústica de salas. Ele tornou-se o primeiro autor a buscar organizar de forma sistemática um conjunto de parâmetros com o objetivo de classificar a acústica de salas de música (FIGUEIREDO, 2005). Alguns parâmetros a serem relacionados abaixo não serão utilizados neste trabalho, mas devem ser úteis para esclarecer o contexto desta pesquisa.

### 2.5.1 Parâmetros subjetivos

- **Vivacidade**

A vivacidade ou reverberância é o parâmetro subjetivo que está relacionado com o tempo de reverberação em médias frequências ou, em algumas situações, com o tempo de decaimento inicial – EDT. Figueiredo (2005) afirma que esse atributo é provavelmente o parâmetro com o qual os músicos têm maior contato em sua rotina de trabalho, e explica que uma sala com baixo grau de vivacidade é usualmente descrita como "seca" ou "morta".



Para muitas formas de música, a reverberação pode adicionar uma plenitude atraente ao som, juntando notas adjacentes e misturando os sons dos diferentes instrumentos ou vozes em um conjunto, aumentando assim o "preenchimento" sonoro e melhorando a difusão. Entretanto, quando uma sala possui reverberação excessiva, a fala perde a inteligibilidade porque os detalhes importantes (consoantes) são mascarados por sons de fala mais altos e persistentes (as vogais) (ROSSING, 2007).

- ***Loudness***

O parâmetro *loudness* avalia a capacidade que uma sala tem de amplificar os sons de forma passiva, ou seja, sem recurso a sistemas eletroacústicos, e pode ser quantificado pelo parâmetro objetivo denominado fator de força (*Strength*) – G.

Um som emitido numa sala vazia provoca uma sensação sonora mais intensa do que numa sala completamente ocupada, isto, porque a primeira apresenta uma quantidade de absorção menor do que a segunda. O *loudness* depende fortemente das características de reverberação da sala e também da existência de superfícies que transmitam as primeiras reflexões diretamente para a audiência, da posição relativa entre a fonte sonora e o ouvinte e da distribuição das áreas de absorção sonora pela sala, incluindo a própria audiência (PEREIRA, 2010).

- **Clareza**

A Clareza mede o grau de separação (capacidade em distinguir) entre sons sucessivos e de certa forma avalia a capacidade de distinção entre tons sobrepostos (PEREIRA, 2010). Figueiredo (2005) esclarece que quando a música tocada numa sala soa bem definida, com articulações sonoras límpidas e precisas independentemente do andamento, a sala apresenta bom grau de clareza. De outro modo, o som se apresentará confuso e indefinido, principalmente em passagens mais rápidas. Está relacionada ao parâmetro objetivo Definição, que atualmente é considerado um dos parâmetros objetivos mais importantes na acústica de salas, sendo referenciado nas normas internacionais mais modernas (BERANEK, 2004).

- **Intimidade**

A intimidade é um indicador bastante importante na qualidade acústica de uma sala. Pereira (2010) explica que o som direto e as primeiras reflexões são percebidos com intensidades elevadas, bem como o intervalo de tempo entre a chegada do som direto e a primeira reflexão é reduzido em salas para música em que a qualidade acústica e intimidade são mais valorizadas. A intimidade dá ao ouvinte a sensação dele estar num espaço com dimensões menores, mesmo que o volume deste ambiente seja elevado (BERANEK, 1962).

- **Brilho**

O som brilhante de uma sala deriva da ênfase dos harmônicos das frequências mais agudas e do relativo baixo decaimento para essas altas frequências (FIGUEIREDO, 2005). Para uma sala possui um decaimento lento da energia sonora associada às altas frequências, naturalmente apresentará um som “brilhante” associada a essa gama (PEREIRA, 2010).

- **Calor**

Os instrumentos que trabalham nas baixas frequências, por natureza, precisam de muito mais energia para produzirem o mesmo nível de intensidade sonora que instrumentos de média e alta frequência (FIGUEIREDO, 2005). Assim, quando o ambiente nos permite ouvir uma música que é rica em graves, diz-se que a sala tem calor. Em termos técnicos, esse "calor" na música é determinado pela força dos tons graves, calculado por um medidor de nível sonoro em vários assentos da plateia em uma sala durante o qual um alto-falante padronizado emite um tom de 125 Hz do palco (BERANEK, 2004).

## 2.5.2 Parâmetros objetivos

- **Tempo de reverberação (*Reverberation Time*) – RT**

O Tempo de Reverberação (*Reverberation Time*) – RT, estudado inicialmente por W.C. Sabine, é definido como o tempo gasto para que o nível sonoro em uma sala diminua 60 dB após uma fonte sonora contínua ser desligada (ROSSING, 2007).

Embora tenha sido comprovado há algum tempo que ele caracteriza apenas um aspecto particular do campo sonoro e que precisa ser complementado por parâmetros adicionais quando se pretende obter uma descrição completa das condições de audição da sala, o RT pode ser considerado como o parâmetro mais importante na acústica de ambientes (KUTTRUFF, 2009).

Após anos de pesquisas desenvolvidas em várias salas da Universidade de Harvard, Sabine desenvolveu uma equação para calcular a reverberação em cada frequência em um espaço arquitetônico. Até hoje essa equação permanece como um parâmetro fundamental no planejamento de salas de concertos (BERANEK et al., 1992). Assim, o tempo de reverberação com base na resposta ao impulso é definido por:

$$T_{60} = \frac{0.161V}{S\bar{\alpha}} \quad (13)$$

onde:

$T_{60}$  = tempo de reverberação obtido por Sabine, (s);

$V$  = volume da sala, (m<sup>3</sup>);

$S\bar{\alpha}$  = a quantidade de absorção presente no ambiente, (m<sup>2</sup>);

$\bar{\alpha}$  = coeficiente de absorção médio.

O coeficiente de absorção médio  $\bar{\alpha}$  é a média ponderada dos coeficientes de absorção ( $\alpha_i$ ) e áreas  $S_i$  em (m<sup>2</sup>) de cada superfície encontrada no ambiente (BRANDÃO, 2016).

Assim, tem-se:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i \quad (14)$$

onde:

$S$  = somatório das áreas dos absorvedores e aparatos dentro da sala.

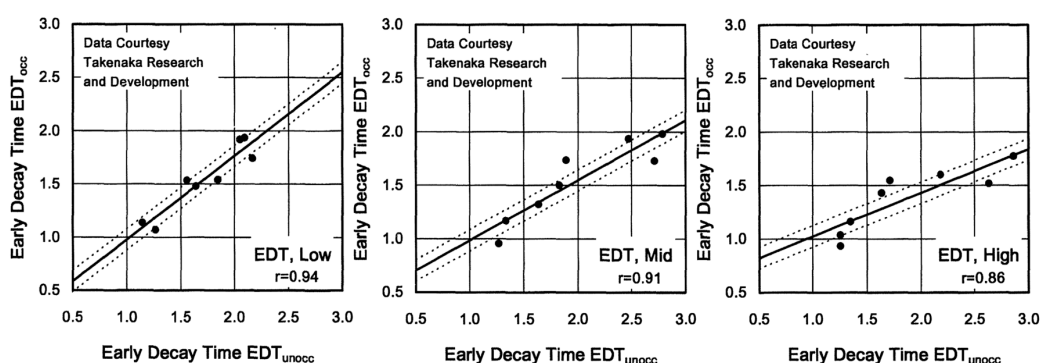
- **Tempo de decaimento inicial (*Early Decay Time*) – EDT**

O tempo de decaimento inicial (EDT) é uma medida da taxa de decaimento sonoro entre 0 dB e -10 dB, expressa em segundos (s), da mesma maneira que o tempo de reverberação (BARRON, 2009).

Durante a execução da música ou da fala, a parte mais tardia e mais fraca da reverberação será mascarada pela próxima sílaba ou nota musical. Portanto, uma medida alternativa, o tempo de decaimento inicial (EDT) se mostrou melhor correlacionado com a reverberação percebida durante a execução de fala e música. É um parâmetro que está melhor relacionado com o julgamento subjetivo de reverberação, também chamado de "reverberância", do que com as propriedades físicas da sala e o tempo de reverberação tradicional, sendo considerado bastante importante na análise dos parâmetros acústicos subjetivos de um ambiente fechado (BARRON, 2009).

Beraneck (2004) explica que existe uma relação entre os valores desse parâmetro com a sala ocupada e desocupada. Na Figura 18 ele apresenta os resultados de medições realizadas nas duas situações para três diferentes faixas de frequência.

Figura 18 – Gráficos das relações entre os Tempos de Decaimento Inicial (para frequências baixas, médias e altas) nas salas ocupadas versus salas desocupadas.



Fonte: BERANEK, 2004, pág. 507.

- **Clareza**

A Clareza ( $C_{50}$  ou  $C_{80}$ , em inglês "*Clarity*") mede a razão entre a energia sonora inicial (*early sound*) da resposta ao impulso recebida entre o instante 0 e  $t$  pela energia total da cauda reverberante, onde  $t$  é a duração do intervalo de tempo considerado como sendo "*early*

*sound*” e é definido em 80 ms para música e 50 ms no caso da palavra (PEREIRA, 2010). Assim, para o caso da música, esse parâmetro é calculado por:

$$C_{80} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(t) dt} \quad (15)$$

Esse parâmetro descreve o grau em que cada detalhe da *performance* é percebido em comparação a tudo que está sendo misturado com componentes da cauda reverberante que chegam depois. Quando as reflexões são atrasadas por 50-80 ms em relação ao som direto, o ouvido associa a mistura dessas contribuições com o som direto. Isso provoca a percepção de um efeito como se o som original tivesse sido amplificado (ROSSING, 2007).

Assim, é possível afirmar que quanto maior o valor de C, mais o som primário (*early sound*) domina, e maior a impressão de clareza.

- **Definição**

A Definição (D<sub>50</sub> ou D<sub>80</sub> em inglês “*Definition*”) mede a razão linear entre a energia contida nas primeiras reflexões pela energia total da resposta ao impulso (KUTTRUFF, 2009). Para a análise de fala, utiliza-se o tempo de 50 ms, e quando a avaliação é referente à música, adota-se 80 ms. É calculado a partir da resposta impulsiva através da equação:

$$D_{50} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (16)$$

- **Fator de força (*Strength*) – G**

O Fator de Força “*Strength*” (G) é uma medida da influência da sala na percepção subjetiva do *loudness* (volume sonoro ou intensidade percebida do som) (BRANDÃO, 2016). Em outras palavras, esse atributo objetivo é um indicador que representa o quão intensa é uma

fonte sonora ouvida em um ambiente, tornando-se um parâmetro bastante indicado para a comparação entre diferentes salas.

O fator de força é determinado pela razão entre a quantidade de energia da resposta ao impulso de um fonte sonora medida em uma sala pela quantidade de energia da resposta ao impulso gerada pela mesma fonte sonora e captada pelo mesmo microfone a uma distância de 10 m em campo livre (FUCHS; MÖSER, 2013). Assim, o cálculo do Fator de Força, em dB, é definido por:

$$G = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}{\int_0^{t_{dir}} h_{10m}^2(t) dt} \quad (17)$$

- **Tempo central – Ts**

O Tempo Central ( $T_s$ ) descreve o centro de gravidade da energia da resposta ao impulso e é usado para demonstrar a relação entre Clareza e Reverberação, bem como descrever o equilíbrio entre as primeiras reflexões e a energia total do campo reverberante (ROSSING, 2007). Dessa forma, a definição do tempo central, com base na resposta ao impulso é:

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (18)$$

Definição, Clareza e Tempo Central estão inter-relacionados e correspondem à nitidez de fala e música. Testes extensivos de escuta e questionários utilizados em laboratório e em salas de música mostraram que todas as quantidades são úteis para descrever essa impressão auditiva específica relacionada aos elementos básicos linguísticos ou musicais, como sílabas ou notas (VORLÄNDER, 2008).

- **Índice de Transmissão de fala (*Speech Transmission Index*) – STI**

O Índice de Transmissão de fala é o parâmetro que visa mensurar a inteligibilidade da fala, considerando o tempo de reverberação e o ruído de fundo das salas. De acordo com a norma IEC 60268-16, esse parâmetro pode ser classificado de acordo com a avaliação apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores recomendados para o STI.

Avaliação segundo a IEC 60268-16	Valor do STI
Excelente	0,75 – 1,00
Bom	0,60 – 0,75
Adequado	0,45 – 0,60
Fraco	0,30 – 0,45
Péssimo	0,00 – 0,30

Fonte: IEC 60268-16.

- **Razão de Graves (*Bass Ratio*) – BR**

A razão de graves “*Bass Ratio*” (BR) é o parâmetro físico que descreve o atributo subjetivo Calor acústico numa sala e é definido pela razão entre a soma dos tempo de reverberação (RT) nas baixas frequências [125 Hz e 250 Hz] pela soma dos tempos de reverberação nas médias frequências [500 Hz e 1 kHz] (FIGUEIREDO, 2005). É calculado a partir da resposta impulsiva através da equação::

$$BR = \frac{T_{125Hz} + T_{250Hz}}{T_{500Hz} + T_{1000Hz}} \quad (19)$$

- **Razão de agudos (*Treble Ratio*) – TR**

A razão de agudos “*Treble Ratio*” (TR), descreve a sensação de “ênfase” das frequências agudas em relação às frequências médias (PEREIRA, 2010). É definido pela razão entre a soma dos tempos de reverberação nas altas frequências [2000 Hz e 4000 Hz] e a soma dos tempos de reverberação nas médias frequências [500 Hz e 1000 Hz]. É calculado a partir da resposta impulsiva através da equação:

$$TR = \frac{T_{2kHz} + T_{4kHz}}{T_{500Hz} + T_{1000Hz}} \quad (20)$$

Na Tabela 3, estão resumidos os parâmetros objetivos considerados mais relevantes na caracterização acústica de salas, bem como os aspectos subjetivos que estão relacionados a cada um deles.

Tabela 3 – Parâmetros objetivos considerados mais relevantes, agrupados de acordo com os aspectos subjetivos com que estão relacionados.

Aspecto subjetivo	Parâmetro objetivo
Reverberação	Tempo de reverberação – RT “ <i>Early Decay Time</i> ” – EDT
Clareza	Claridade – C (C80 e C50) Definição – D50 Tempo central – Ts
<i>Loudness</i>	Fator de força “ <i>Strength</i> ” – G
Balanço/equilíbrio (calor e brilho)	Razão de graves “ <i>Bass Ratio</i> ” – BR Razão de agudos “ <i>Treble Ratio</i> ” – TR

Fonte: Adaptado de BRANDÃO, 2016.

### 2.5.3 Diferença mínima perceptível (*Just Noticeable Difference*) – JND

O *JND* é, basicamente, é a quantidade de um parâmetro que deve ser alterada para que uma diferença mínima possa ser percebida. Se essa quantidade é menor do que o valor do *JND*, então é possível considerá-lo subjetivamente imperceptível (VORLÄNDER, 2008). Long (2006) explica que o *JND* depende da intensidade e da frequência, e que experimentos psicoacústicos são realizados com o objetivo de se medir essa diferença mínima perceptível. Esses testes utilizam um sujeito que é solicitado a comparar dois sons e a indicar qual possui maior nível ou frequência. Para Vorländer (2008), esse parâmetro é bastante útil na comparação entre valores encontrados nas medições acústicas e as simulações computacionais, tornando-se fundamental para determinar a precisão necessária e a simplificação permitida de um modelo geométrico. A norma ISO 3382-1 (2009) fornece uma tabela com os valores de JND para alguns parâmetros subjetivos (Tabela 4).



Tabela 4 – Valores para parâmetros acústicos de acordo com a percepção do ouvinte.

Aspecto subjetivo do ouvinte	Parâmetro objetivo	Frequências de avaliação <sup>a</sup> (Hz)	JND	Escala típica <sup>b</sup>
Percepção da intensidade ( <i>Loudness</i> )	Fator de força, G, em decibéis	500 a 1000	1 dB	-2 dB; +10 dB
Percepção da reverberação	Tempo de Decaimento Inicial (EDT) em (s)	500 a 1000	Rel. 5 %	1,0 s; 3,0 s
Percepção de clareza do som	Clareza, C <sub>80</sub> , em (dB)	500 a 1000	1 dB	-5 dB; +5 dB
	Definição, D <sub>50</sub>	500 a 1000	0,05	0,3; 0,7
	Tempo Central, Ts, em (s)	500 a 1000	10 ms	60 ms; 260 ms

a A média de frequência de número único denota a média aritmética para as bandas de oitava, com exceção de LJ, que deve ser a média da energia.

b Valores médios em frequência em posições individuais em salas de concertos e salas multiusos não ocupadas de até 25.000 m<sup>3</sup>.

Fonte: Adaptado de ISO, 2009, pag. 12.

## 2.6 ALGUMAS DIRETRIZES PARA O PLANEJAMENTO ACÚSTICO DE SALAS

O objetivo de um projeto de acústica de salas é determinar as características acústicas de um espaço que sejam adequadas às atividades desenvolvidas nesse ambiente. É preciso ter em mente, no entanto, que cada ambiente projetado será único, já que terá uma geometria, um volume e outras características que serão diferentes de outras salas. Deste modo, o projeto acústico de salas segue algumas diretrizes gerais para a construção de um ambiente que esteja adequado ao seu uso, e por isso, faz-se necessário saber quais faixas de valores dos parâmetros objetivos são ideias para cada aplicação.

É importante destacar que inúmeros fatores contribuem para compor o campo acústico de uma sala. Entretanto, o valor do RT geralmente é o primeiro parâmetro com valor definido (BRANDÃO, 2016).

O tempo de reverberação apropriado para um auditório deve ser determinado principalmente com base no programa (Tabela 5). Muitas referências são encontradas na literatura para o tempo de reverberação ideal, sendo também uma função do volume da sala.

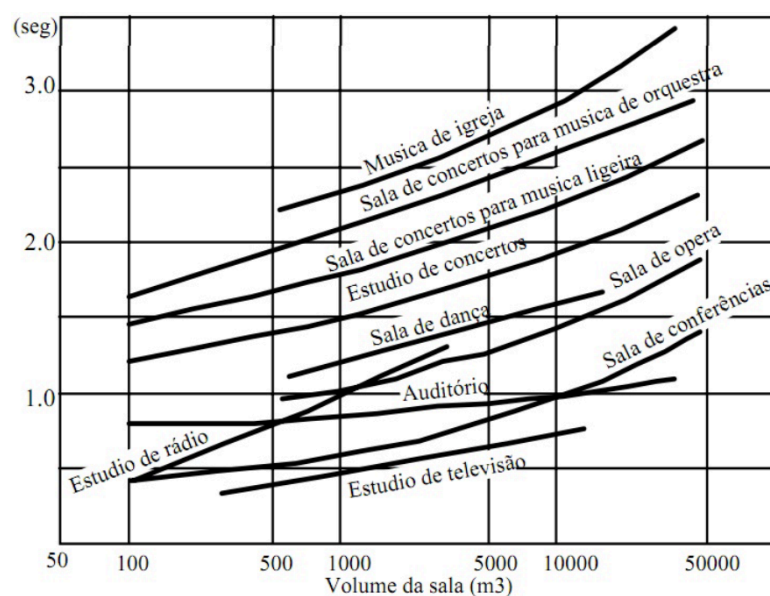
As recomendações sobre tempos de reverberação ideais para diferentes tipos de espaços foram abordadas por vários autores (Doelle, 1972; Knudsen e Harris, 1950; Long, 2006) e a Figura 19 mostra um resumo de vários destes gráficos. É importante destacar que se uma única figura for citada para o tempo de reverberação, geralmente se refere ao valor de médias frequências, com uma média entre 500 e 1000 Hz (BARRON, 2009).

Tabela 5 – Valores recomendados para o tempo de reverberação para diferentes usos de salas (ocupadas).

Tipo de sala e uso	RT (s) Média 500 e 1000 Hz
Música de órgão	> 2.5
Música período romântico	1.8–2.2
Música período clássico	1.6–1.8
Ópera	1.3–1.8
Música de câmara	1.4–1.7
Teatro de Drama	0.7–1.0

Fonte: Adaptado de BARRON, 2009, pág. 30.

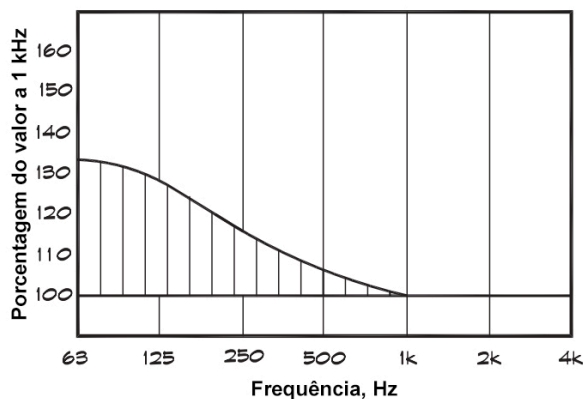
Figura 19 – Tempo de reverberação (500 e 1000 Hz) ótimo para diversos tipos de ambiente.



Fonte: Adaptado de LONG, 2006, pág. 586.

Para a frequência de 125 Hz, Beranek (2004) recomenda um fator entre 1,2 e 1,3 vezes o valor médio das frequências de 500 a 1000 Hz. Essa crescente reverberação de graves ilustrada na Figura 20 é uma boa prática para salas usadas para música não amplificada, embora não seja desejável em espaços onde a baixa frequência é fornecida por algum sistema de sonorização (LONG, 2006). Para salas destinadas à fala, o RT deve permanecer plano em todas as faixas de frequência.

Figura 20 – Razão do Tempo de Reverberação de graves e médias frequências



Fonte: Adaptado de LONG, 2006, pág. 587.

Barron (2009) ainda destaca que existe um grande impasse para a definição do tempo de reverberação de espaços multiusos. Segundo o autor, adotar um valor padrão desse parâmetro para esse tipo de ambiente pode resultar em características acústicas que não são capazes de oferecer a inteligibilidade necessária pra fala, nem a vivacidade necessária para os padrões musicais.

De acordo com Fuchs e Möser (2013), o volume de uma sala depende do tempo de reverberação desejado e da capacidade de assentos projetada. Brandão (2016) afirma que em salas com pequena capacidade de assentos, um valor alto do volume por assento ( $V/N$ ) ajuda a manter o volume sonoro (*loudness*) sob controle. Por este motivo, os valores recomendados para o volume necessário por assento devem ser definidos de acordo com a utilização da sala. A Tabela 6 apresenta o volume desejado por assento para algumas funções de sala.

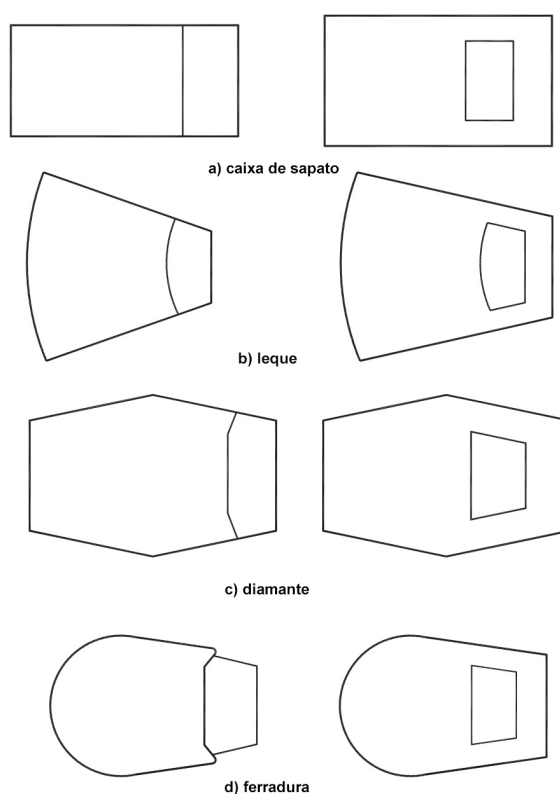
Tabela 6 – Valores recomendados para o volume por assento para diferentes usos de salas.

Tipo de sala e uso	Volume/assento (m <sup>3</sup> )
Salas de conferências, teatros líricos, salas de congressos	4 – 6 m <sup>3</sup>
Salas multifuncionais para fala e música	4 – 7 m <sup>3</sup>
Casas de ópera	6 – 8 m <sup>3</sup>
Salas de concertos para música de câmara	6 – 10 m <sup>3</sup>
Salas de concertos para música sinfônica	8 – 12 m <sup>3</sup>
Igrejas	10 – 15 m <sup>3</sup>
Salas de ensaio orquestrais	30 – 50 m <sup>3</sup>

Fonte: Adaptado de FUCHS e MÖSER, 2013, pág. 258.

Considerando a forma da sala, existem geometrias comprovadas para diferentes usos, mas não há uma forma exata de sala. Uma sala retangular, por exemplo, fornece as fortes reflexões laterais necessárias para o envolvimento sonoro, como uma consequência natural da sua forma e as salas estreitas também produzem baixos tempos de ITDG (BRANDÃO, 2016). As formas comumente encontradas no *design* de salas são ilustradas na Figura 21, e segundo Long (2006), qualquer uma das formas básicas pode ser construída em uma configuração surround, movendo a plataforma da orquestra para o centro da sala e arrumando os assentos ao redor.

Figura 21 – Formas mais comuns encontrada em auditórios (configuração normal e surround).



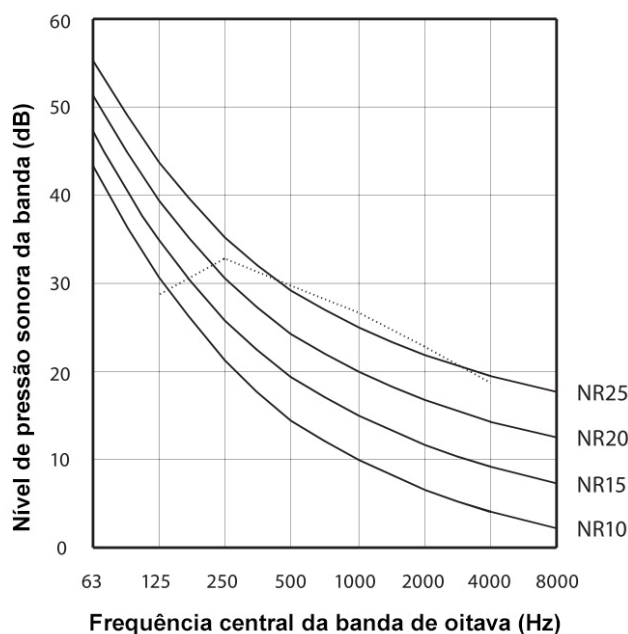
Fonte: Adaptado de LONG, 2006.

Outra etapa importante do projeto acústico é definir os níveis máximos admissíveis de ruído de fundo adequados ao uso da sala. De acordo com Fuchs e Möser (2013), nas salas de concertos e casas de ópera, o nível de ruído de fundo normalmente não deve exceder 25 dB (A). Já no caso de salas de aula ou salas de conferências, o limite máximo deve ser de 35 dB (A). Isso garantirá qualidade para uma boa comunicação de fala e audição de música com um nível de ruído de fundo suficientemente baixo. Além disso, no caso de salas sensíveis ao

ruído, como estúdios de gravação, salas de concertos ou teatros, pode ser necessário fazer exigências sobre a composição espectral do ruído (BRANDÃO, 2016).

Barron (2009) também apresenta uma amostra de curvas NR por banda de frequência na Figura 22. Os níveis da banda de oitava são comparados com a curva específica para a sala analisada e segundo o autor não devem excedê-la em nenhuma oitava. Os critérios para a avaliação de ruído de fundo de diferentes auditórios são apresentados na Tabela 7.

Figura 22 – Curvas de classificação de ruído relevantes para auditórios e o espectro de ruído do público (linha pontilhada).



Fonte: Adaptado de (BARRON, 2009), pág. 28.

Tabela 7 – Critérios de avaliação de ruído de fundo para auditórios.

Grandes salas de concerto	NR 15
Casas da ópera e teatros de drama	NR 20
Auditório pequeno (menos de 500 lugares)	NR 25

Fonte: Adaptado de BARRON, 2009, pág. 28.

Em salas projetadas para a fala, a capacidade de entender o discurso é muito importante. Long (2006), explica que componentes arquitetônicos desses espaços com tamanho, forma, orientação da superfície e materiais, bem como o nível de ruído de fundo, influenciam a inteligibilidade da sala, e aponta vários requisitos fundamentais na concepção

desse tipo de ambiente que contribuem para alcançar um alto nível de relação sinal-ruído (SNR) no receptor.

- deve haver uma intensidade de som adequada;
- o nível sonoro deve ser relativamente uniforme;
- as características de reverberação da sala devem ser apropriadas;
- deve haver uma alta relação sinal-ruído;
- os níveis de ruído de fundo devem ser suficientemente baixos para não interferir com o ambiente de escuta;
- a sala deve estar livre de defeitos acústicos, como reflexos longos atrasados, ecos de vibração e ressonância.

Em salas destinadas à música, geralmente existe uma solicitação técnica bastante complexa, bem como um alto nível de exigência dos usuários (músicos e público em geral), já que geralmente eles possuem ouvidos mais treinados e um senso crítico mais apurado (BRANDÃO, 2016). Long (2006) afirma que o ambiente de audição ideal para música depende, em certa medida, do tipo de música que está sendo tocada, e destaca uma série de atributos comuns sobre os quais existe um consenso geral.

- a sala deve possuir fortes reflexões laterais com uma fração significativa da energia que vem do lado para que o público possa se sentir envolvido pelo som;
- a sala deve suportar o som instrumental, fornecendo um campo reverberante, cuja duração depende do tipo de música que está sendo tocada;
- a sala deve possuir um tempo de reverberação que aumenta com uma frequência decrescente abaixo de 500 Hz, produzindo assim o aumento da sensação denominada “calor”;
- deve haver clareza e definição nas passagens musicais rápidas para que possam ser apreciadas em detalhes. Isso requer reflexões a partir de superfícies localizadas perto da fonte ou receptor, de modo que o intervalo de tempo de atraso inicial (ITGD) seja curto;
- o som deve ter uma intensidade adequada que seja distribuída uniformemente por toda a sala;
- a sala deve suportar uma extensa largura de banda, visto que os instrumentos musicais produzem sons de 30 Hz a 12.000 Hz (muito mais amplo do que o espectro de fala);

- o ruído de fontes externas e equipamentos mecânicos (como condicionadores de ar) deve ser controlado para que o som instrumental mais silencioso possa ser ouvido;
- as características detalhadas de reverberação do espaço devem ser bem controladas com uma cauda reverberante suave e sem ecos, sombras, coloração ou outros defeitos;
- os artistas devem ter a capacidade de se ouvir nitidamente e de receber do espaço um retorno reverberante que seja próximo ao da experiência do público.

Já as salas de múltiplo uso são construídas para fins culturais, suportando uma diversidade de eventos como teatro, música clássica, shows, ópera, conferências, cinema e outros tipos de eventos. Long (2006) explica que os ambientes projetados para uso misto exigem um ajuste criterioso entre as necessidades de fala e da música. Edifícios deste tipo, incluindo auditórios, teatros, igrejas e sinagogas, estão entre os mais diversos de todos os espaços e os mais desafiadores para projetar.

Nessas situações, um tempo de reverberação variável será necessário pois algumas demandas exigem prioritariamente a inteligibilidade da fala, enquanto outras exigem uma reverberação considerável, como para a música clássica. Segundo Rossing (2007), essa alteração do tempo de reverberação da sala pode ser proporcionada por meio de absorção variável ou até mesmo utilizando dispositivos que permitam o ajuste do volume da sala. O autor explica que se uma mudança em  $T$  é realizada por meio de absorção variável,  $G$  será reduzido juntamente com a redução de  $T$ . No entanto, se, em vez disso,  $T$  diminuir ao reduzir o volume, por exemplo movendo uma parede ou diminuindo o teto,  $G$  permanecerá aproximadamente constante ou talvez até aumentar.

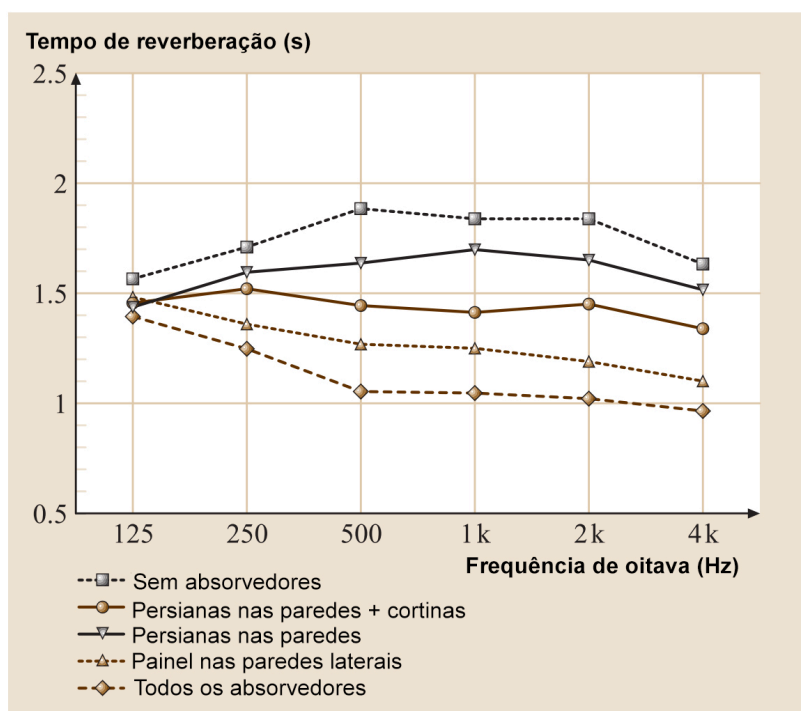
A *Dronningesalen Hall*, na Royal Library de Copenhague ilustrada na Figura 23 é uma sala em que essas exigências foram atendidas através da absorção variável, proporcionada por meio de painéis móveis nas paredes laterais, bem como por cortinas dobradas e persianas nas paredes das extremidades. Combinando essas medidas de diferentes maneiras, pode-se obter os valores de  $T$  no intervalo de 1,1 a 1,8 s (na sala vazia), como ilustrado na Figura 24.

Figura 23 – *Dronningesalen Hall*, na Biblioteca Real de *Copenhagen*.



Fonte: Repositório Digital de Jens Drejer <sup>3</sup>

Figura 24 – Curvas de tempo de reverberação da *Dronningesalen Hall*, utilizando absorção variável.



Fonte: Adaptado de ROSSING, 2007, pág. 343.

<sup>3</sup> Disponível em: < <https://jensdrejer.files.wordpress.com/2014/03/copenhagen-phil.jpg> > Acesso em jan. 2017.



## CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Neste capítulo são abordados os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, após a revisão bibliográfica realizada no capítulo anterior.

A primeira parte deste capítulo está relacionada à caracterização do objeto de estudo. Nessa etapa, é apresentado um resumo dos detalhes acústicos e de construção do ambiente.

Após esta etapa inicial, os parâmetros acústicos são obtidos primeiramente a partir da medição da resposta impulsiva da sala. Em seguida, a partir da utilização de um modelo digital tridimensional do auditório e, com o auxílio do *software* de simulação computacional EASE da AFMG, as características acústicas dos materiais, bem como as características eletroacústicas das fontes sonoras são modeladas no ambiente.

Após a validação do modelo, realizada através da comparação dos resultados de RT obtidos nas medições e nas simulações, os parâmetros acústicos *Early Decay Time* (EDT), Clareza (C80), Definição (D50), Tempo Central (Ts) e *Speech Transmission Index* (STI) são simulados e avaliados de acordo os valores recomendados na literatura.

Os valores coletados nas medições e simulações são analisados, e de acordo com os resultados apresentados, algumas diretrizes de condicionamento acústico são simuladas, com o objetivo de aperfeiçoar a resposta temporal acústica para a utilização do auditório como um espaço destinado a múltiplos usos.

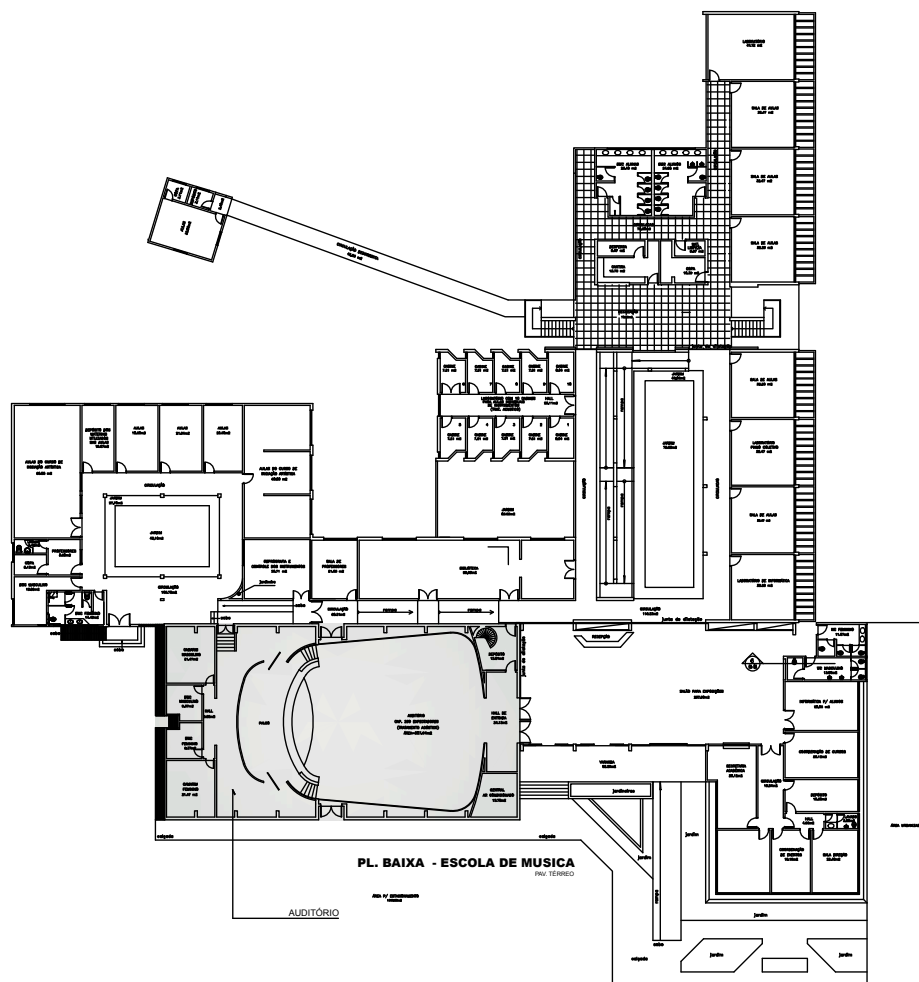
### 3.1 IDENTIFICAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

O edifício em análise refere-se ao Auditório Onofre Lopes, localizado na Escola de Música da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Figura 25). Esse espaço foi inaugurado junto com a nova sede da Escola de Música no setor do Campus Universitário da UFRN, no ano de 1991 (Figura 26), na gestão do Magnífico Reitor Daladier da Cunha Lima.

Projetado pelo arquiteto Ubirajara Galvão (*in memoriam*), foi concebido inicialmente para ser um espaço destinado à concertos musicais, apresentações culturais, bem como para eventos onde ocorre apenas a transmissão da palavra. Atualmente tem recebido principalmente performances musicais de estilos variados, sobretudo de música orquestrada.

O auditório tem capacidade para 250 espectadores e possui a geometria em forma de leque, bastante comum em auditórios, conforme ilustrado nas Figuras 27 e 29. As diferentes cotas do terreno e os diversos ângulos de inclinação do forro do teto estão dispostos na Figura 28.

Figura 25 – Planta de localização do Auditório Onofre Lopes da UFRN.



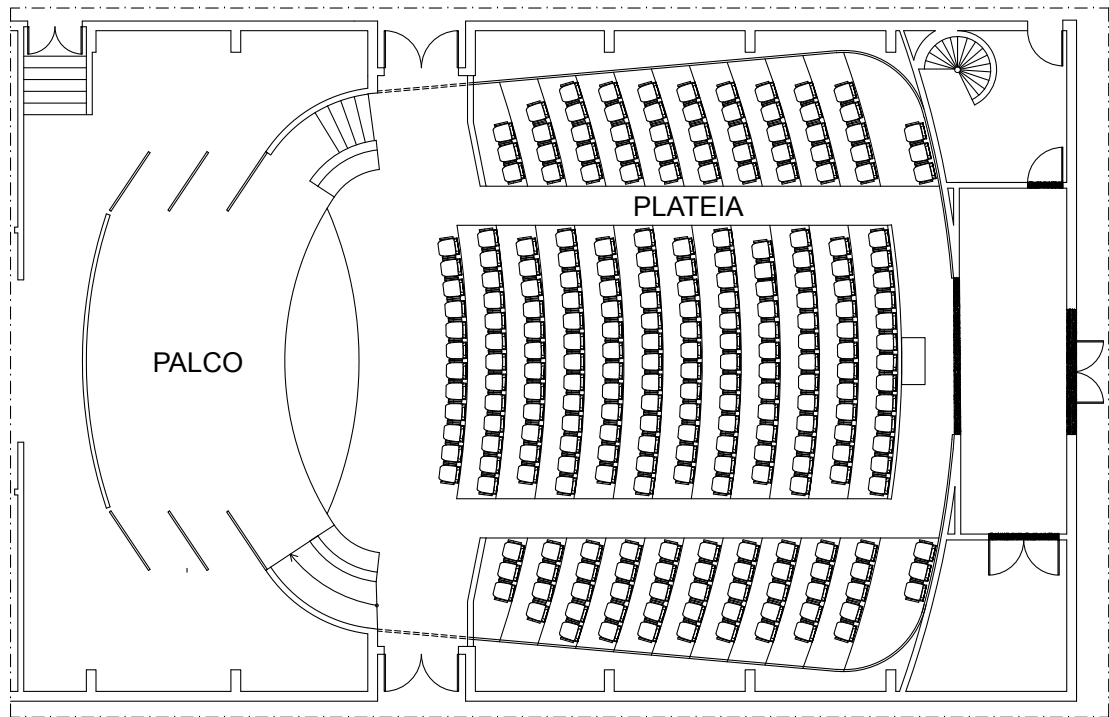
Fonte: Superintendência de Infraestrutura da UFRN, modificado pelo autor, 2017.

Figura 26 – Construção do Auditório Onofre Lopes na sede da Escola de Música da UFRN.



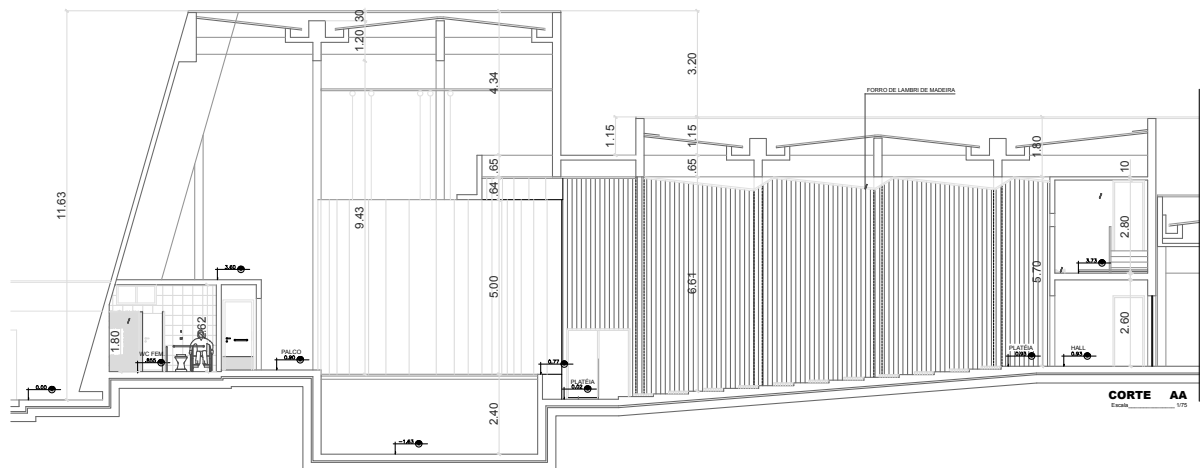
Fonte: UFRN, 1991.

Figura 27 – Planta baixa do Auditório Onofre Lopes da UFRN.



Fonte: Superintendência de Infraestrutura da UFRN, modificado pelo autor, 2017.

Figura 28 – Corte lateral do Auditório Onofre Lopes da UFRN.



Fonte: Superintendência de Infraestrutura da UFRN, modificado pelo autor, 2017.

Figura 29 – Plano aberto mostrando a geometria em forma de leque do Auditório da Escola de Música da UFRN.



Fonte: Acervo próprio, 2017.

As paredes externas do prédio são construídas em alvenaria, mas a sala possui um revestimento estruturado interno, construído em madeira (do tipo lambri) e com formato arredondado nas extremidades da face oposta ao palco (Figura 30).

Figura 30 – Paredes internas do Auditório da EMUFRN, com formato curvilíneo, construídas em lambri e fixadas em estrutura rígida de madeira.



Fonte: Acervo próprio, 2017.

O teto possui formato multifacetado e é construído do mesmo material das paredes nas faces que refletem diretamente o som para o público. Nas demais faces, a estrutura é composta por chapas de madeira compensado pintadas na cor preta (Figura 31).

Figura 31 – Teto multifacetado do Auditório da EMUFRN construído em madeira.



Fonte: Acervo próprio, 2017.

O piso da área de audiência é todo revestido com carpete cinza colado no concreto, e as cadeiras, do tipo articuladas, possuem revestimento em *courvin* nas cores verde e cinza.

No palco, com cota de 0,85 m em relação ao nível onde está localizada a primeira fileira de cadeiras mais próxima ao palco, o piso é construído em lâminas de madeira maciça e as paredes em alvenaria com revestimento em reboco e pintura na cor preta. Por fim, cortinas grossas confeccionadas na cor preta compõem a estrutura de coxias do palco (Figura 32).

Um resumo com as principais informações referentes aos detalhes acústicos e de construção do AOL estão organizados na Tabela 8.



Figura 32 – Palco do Auditório da EMUFRN construído com lâminas de madeira maciça.



Fonte: Acervo próprio, 2017.

Tabela 8 – Resumo dos detalhes acústicos e de construção do AOL.

Volume da sala	3.256,87 m <sup>3</sup>
Comprimento total da sala	23,73 m
Comprimento da área de plateia	15,13 m
Comprimento do palco	8,60 m
Largura média da área de plateia	15,00 m
Largura média do palco c/ coxia	16,90 m
Altura média da área de plateia	5,41 m
Altura média da área de palco	9,88 m
Número de assentos	250
Volume / assento	13,02 m <sup>3</sup>
Área de plateia	226,95 m <sup>2</sup>
Área do palco c/ coxia	145,34 m <sup>2</sup>
Área / assento	0,9078 m <sup>2</sup>
Usos	música clássica, música popular, palestras, conferências, cerimônias, etc.
Circulação	corredores e área entre as fileiras de assentos cobertos com carpete
Paredes	palco: alvenaria com reboco e pintura na cor preta área de plateia: externa em alvenaria / interna em madeira do tipo lambri
Teto	forro multifacetado em madeira do tipo lambri e compensado
Palco	pranchas de madeira maciça
Assentos	estrutura metálica, braços e costas com carenagens em poliuretano, estofados em tecido sintético ( <i>courvin</i> ).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

### 3.2 MEDIÇÕES ACÚSTICAS

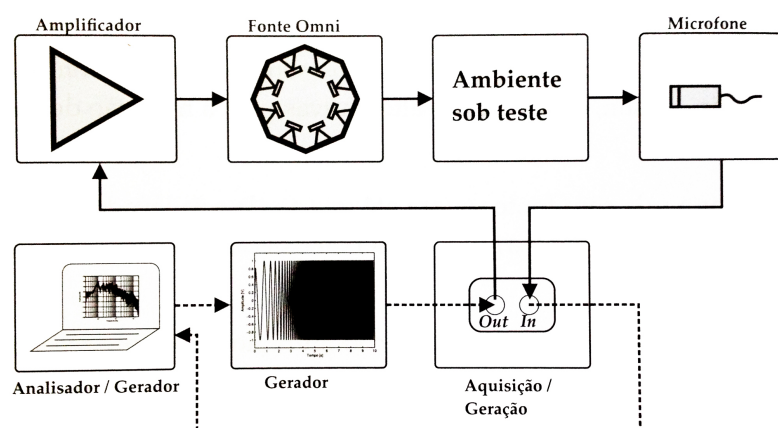
As medições de parâmetros acústicos desta pesquisa, as quais fundamentam a validação do modelo computacional construído para simulação de diferentes condições acústicas do AOL, foram realizadas de acordo com as recomendações da ISO 3382-1 (2009). Essa norma especifica os métodos para a medição do tempo de reverberação (RT) e outros parâmetros acústicos de salas que estão listados na Tabela 4, descrevendo os procedimentos, os equipamentos necessários, o método de avaliação dos dados e a apresentação do relatório de ensaio. É um modelo que tem como objetivo a aplicação de modernas técnicas de medição digital e à avaliação de parâmetros acústicos de ambiente derivados de respostas de impulso (ISO, 2009).

As medições acústicas desta pesquisa foram realizadas com bandas de oitava entre 125 Hz e 8000 Hz e a maior frequência submetida à análise é de 8000 Hz. Desse modo, uma taxa de amostragem de 48 kHz é mais que suficiente para que esse sinal seja processado sem erros.

#### 3.2.1 Cadeia de medição

A ISO 3382-1 (2009) especifica o conjunto de equipamentos necessários aos procedimentos de medição acústica, bem como o fluxo de sinais ao longo da cadeia de medição. O esquema de interligação de equipamentos está ilustrado na Figura 33.

Figura 33 – Diagrama da cadeia de medição.



Fonte: BRANDÃO, 2016.

Nessa figura, cada equipamento da linha superior é considerado um SLIT, sujeito a um sinal de entrada e fornecendo um sinal de saída. As setas em linha cheia indicam sinais contínuos (analógicos) e as setas tracejadas indicam sinais discretos (digitais). O sistema é composto por um gerador de sinais, um amplificador, uma fonte sonora omnidirecional, microfone omnidirecional, placa de captura de sinais de áudio e um computador para processamento e análise dos sinais medidos.

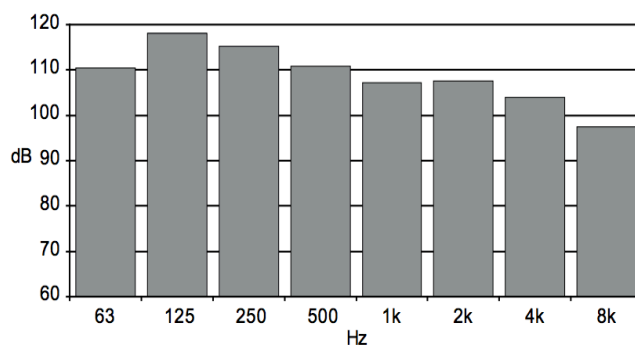
### 3.2.2 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados nas medições e as respectivas especificações de marcas e modelos estão descritos na lista a seguir. É importante destacar que todas as medições foram realizadas no mesmo dia e com a mesma configuração dos equipamentos, evitando assim possíveis alterações nos resultados por interferência de operação. Na Figura 35 é mostrada a fonte sonora dodecaedro posicionada no centro do palco durante o processo de medição.

- Transdutor de emissão: Fonte sonora omnidirecional com doze alto-falantes (dodecaedro), Modelo *OmniPower* 4292-L da Brüel & Kjær com resposta de frequência especificada na Figura 34;
- Amplificador da fonte sonora: *2734 Power Amplifier* da Brüel & Kjær com resposta de frequência de 20 Hz a 20 kHz (-1dB);
- Transdutor de recepção: Microfone condensador omnidirecional Modelo 2270 com cápsula Tipo 4189 da Brüel & Kjær com resposta de frequência de 6,3 a 20000 Hz e faixa dinâmica de 14,6 a 146,0 dB;
- Interface de áudio: Modelo USB ZE 0948 da Brüel & Kjær com resolução máxima de 16 bits, taxa de amostragem de até 48 kHz e resposta de frequência especificada na Figura 36.
- Pré-amplificador de microfone: Modelo 2270 *Analyzer* da Brüel & Kjær com resposta de frequência linear de 0,5 Hz a 20 kHz (Figura 37);
- Computador: Notebook Dell I5 2.8 GHz 8Gb RAM SSD 250Gb;
- Gerador/Analisador de sinais: Software de medições acústicas DIRAC v1.0.



Figura 34 – Resposta de frequência da fonte sonora *OmniPower* 4292-L da Brüel & Kjær.



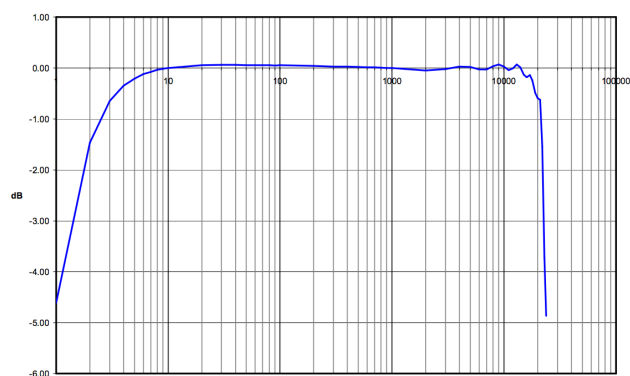
Fonte: B&K, 2013.

Figura 35 – Fonte sonora dodecaedro *OmniPower* 4292-L da Brüel & Kjær posicionada no palco.



Fonte: Acervo próprio, 2017.

Figura 36 – Resposta de frequência da Interface de áudio USB ZE 0948 da Brüel & Kjær.



Fonte: Página da Brüel & Kjær<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Disponível em: <<https://www.acoustics-engineering.com>> Acesso em nov. 2017.

Figura 37 – Pré-amplificador de microfone e analisador 2270 *Analyzer* da Brüel & Kjær.



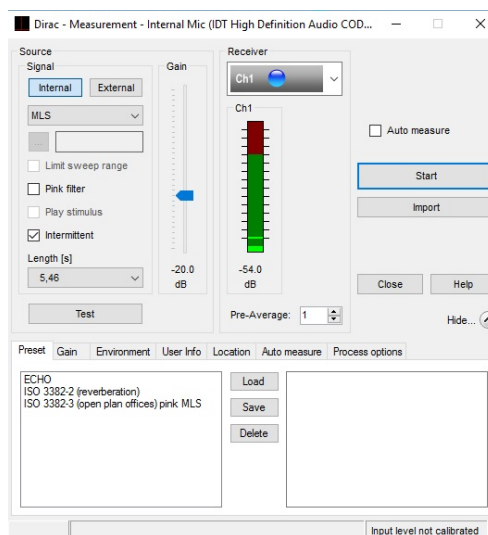
Fonte: Acervo próprio, 2017.

### 3.2.3 Software utilizado para as medições acústicas

Esta pesquisa utilizou o *software* DIRAC da Brüel & Kjær para a gravação, processamento e análise dos sinais de áudio captados em todas as medições realizadas no AOL.

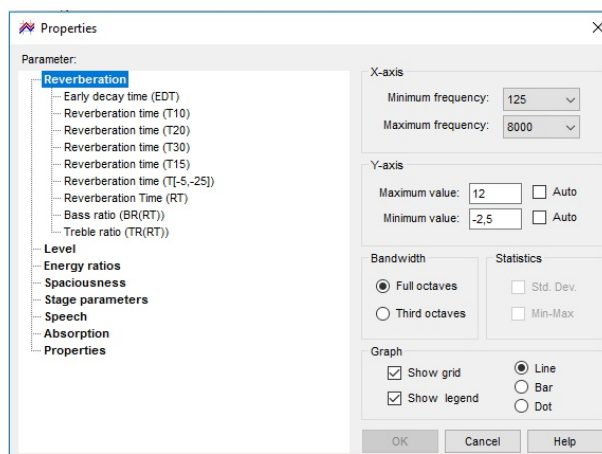
Esse *software* é composto pelos módulos de geração de sinal (Figura 38), medição e pós-processamento, e fornece a aquisição de dados com uma variedade de sinais de estímulo, incluindo *sweep's* e MLS, bem como um sistema de processamento de sinais para calcular todas as funções ou medidas acústicas (Figuras 39 e 40) de acordo com as normas vigentes (BRÜEL & KJÆR, 2017).

Figura 38 – Módulo de geração de sinais do *software* DIRAC da Brüel & Kjær.



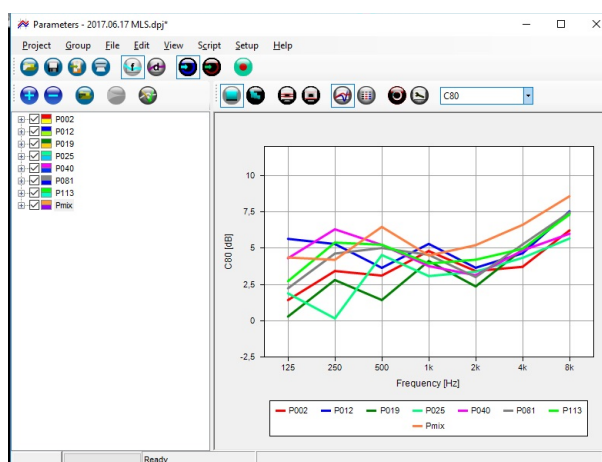
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 39 – Módulo de pós-processamento de sinais do *software* DIRAC da Brüel & Kjær.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 40 – Visualização de resultados no módulo de pós-processamento de sinais do DIRAC da Brüel & Kjær.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

### 3.2.4 Localização dos pontos de medição

A localização da fonte e dos pontos de recepção foram estabelecidas de acordo com as recomendações da ISO 3382-1. A fonte sonora foi posicionada na região central de palco (F1) e, num segundo momento, a 2,5 metros à esquerda do centro do palco (F2), e a altura do centro geométrico da caixa acústica dodecaedro foi mantida a 1,5 m da cota do palco conforme ilustrado na Figura 41. O microfone foi posicionado em 6 (seis) pontos de recepção diferentes da área de audiência e 3 (três) medições foram realizadas em cada um desses pontos, repetindo-se os procedimentos para cada posição da fonte. A altura do microfone foi mantida a 1,2 m da cota do pavimento em questão, conforme disposto na norma. Como a

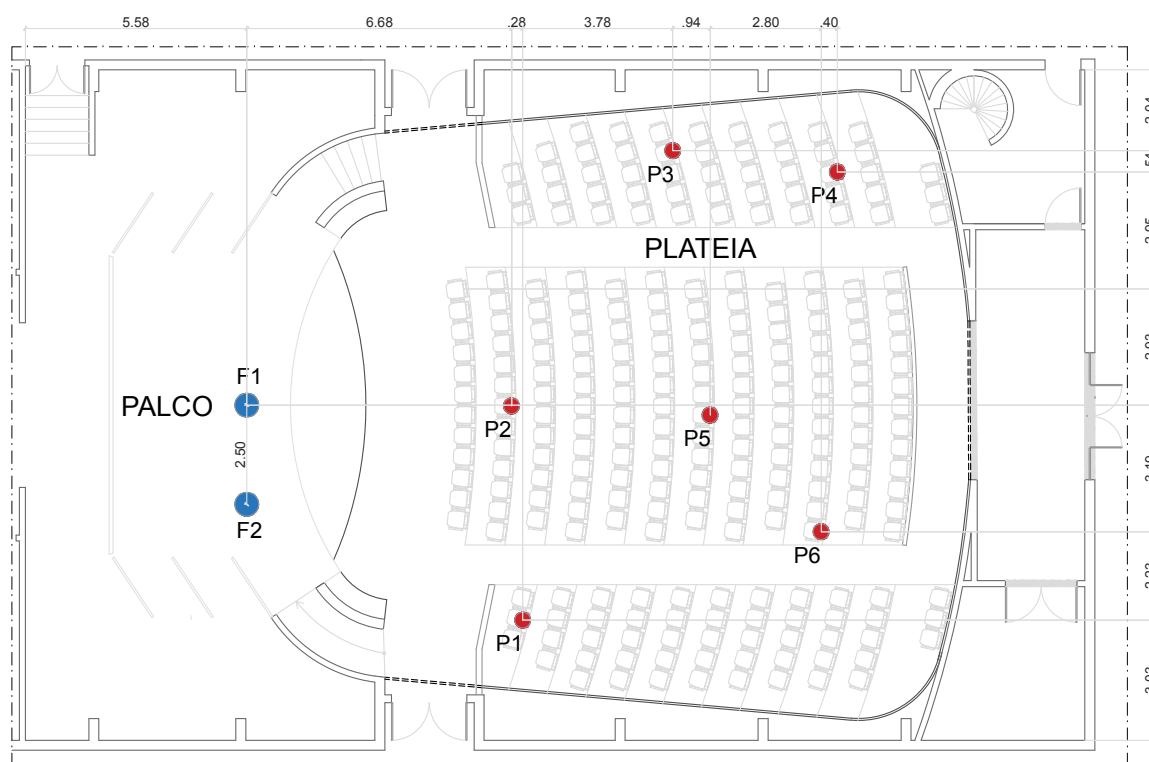
maioria dos salões são simétricos, tais medições só são necessárias na metade da sala (BERANEK, 2004).

Legenda:

**F** = fonte sonora;

**P** = posições do microfone durante as sucessivas medições.

Figura 41 – Posições da sala utilizadas nas medições acústicas, considerando a ISO 3382-1 (2009).



Fonte: Superintendência de Infraestrutura da UFRN, modificado pelo autor, 2017.

### 3.2.5 Procedimentos utilizados

As medições *in situ* tiveram como objetivo a obtenção dos parâmetros acústicos supracitados. O software utilizado para medir, calcular e analisar os parâmetros acústicos da sala de concerto em estudo foi o DIRAC<sup>®</sup> da B&K.

Para capturar a resposta ao impulso do ambiente, o DIRAC<sup>®</sup> gera um estímulo sonoro do tipo *MLS*. Os estímulos são convertidos em um sinal analógico na placa de som, ampliados pelo amplificador de potência e reproduzidos pela fonte sonora omnidirecional. Após essa etapa, o medidor captura a resposta da sala através do transdutor de captação (microfone) e a

*interface* de áudio, após converter o sinal para o formato digital, o endereça ao computador. Em seguida, o programa aplica um processo de deconvolução para obter a resposta ao impulso da sala. Com essa resposta gerada, o *software* DIRAC<sup>®</sup> está apto a representar, graficamente, diversos parâmetros acústicos.

### 3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

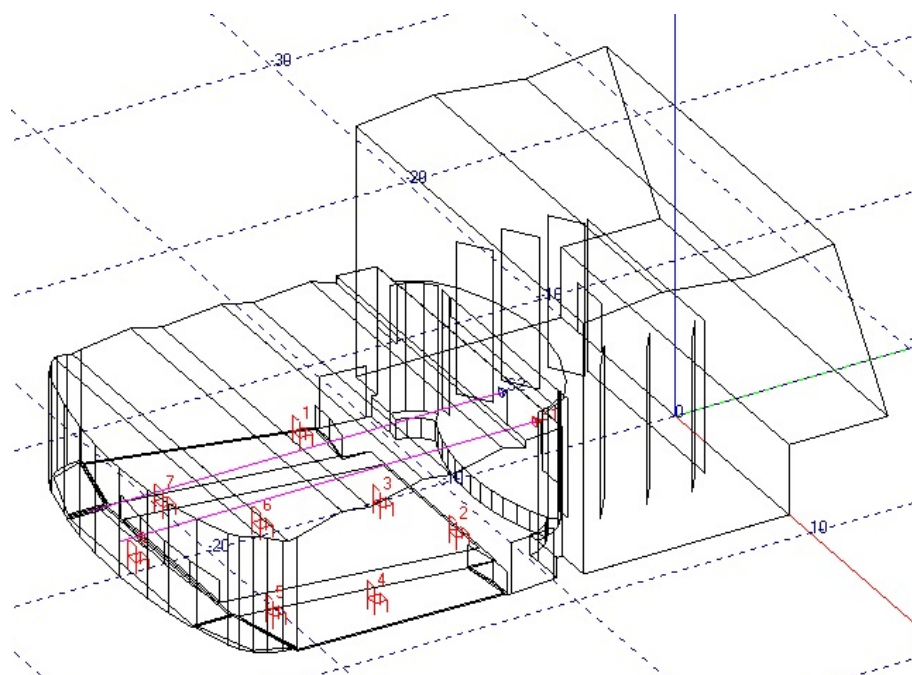
As características acústicas de um recinto são quantificadas objetivamente por diversos parâmetros físicos definidos na Seção 2.5. O objetivo da simulação acústica é conhecer os valores assumidos por esses parâmetros sobre as áreas de audiência do ambiente de estudo, mesmo em salas que ainda não foram construídas.

No entanto, para que essa ferramenta seja utilizada, faz-se necessária, primeiramente, a elaboração do projeto arquitetônico do ambiente. Esse projeto é transferido para um arquivo no computador e os dados referentes à estrutura, como tipo de material das paredes, do piso, do teto e dos demais elementos estruturais que compõe o ambiente, bem como a localização da fonte e do receptor são definidos.

A partir daí, parâmetros acústicos que envolvem a propagação do som na sala podem ser simulados muito rapidamente e as modificações no ambiente podem ser testadas e simuladas sem grandes esforços (VORLÄNDER, 2008).

O método computacional adotado para as simulações foi o *Ray-Tracing* (traçado de raios), as ferramentas utilizadas para o processamento de sinais foram os módulos *Local Decay Time* e AURA, e as medidas de condicionamento adotadas para a pesquisa foram o Tempo de reverberação (RT), o Tempo de Decaimento Inicial (EDT), a Claridade (C80), a Definição (D50), o Tempo Central (Ts) e o STI. Essas simulações foram realizadas nas 6 (seis) posições definidas anteriormente nos procedimentos de medição (Figura 41), para que, na etapa de validação do modelo, seja possível realizar uma análise comparativa entre os resultados das duas técnicas utilizadas (Figura 42).

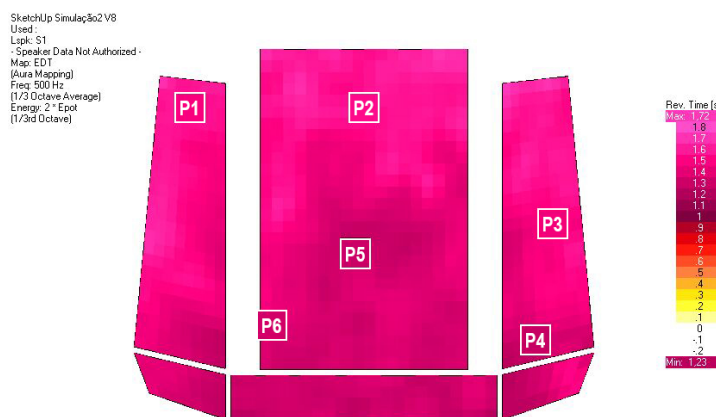
Figura 42 – Posições da sala utilizadas nas simulações computacionais, considerando a ISO 3382-1 (2009).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Apesar das simulações utilizando o método de rastreamento de raios (*Ray Tracing*) demandar muito tempo de processamento, foram realizadas, além das posições específicas citadas anteriormente, simulações em toda a área de audiência para que os parâmetros acústicos pudessem ser analisados na sala como um todo. Para esse fim, foi utilizado o mapeamento de sala (*Area Mapping*) para visualização dos resultados que serão apresentados no próximo capítulo (Figura 43).

Figura 43 – Visualização do parâmetro EDT utilizando o mapeamento de área (*Area Mapping*).

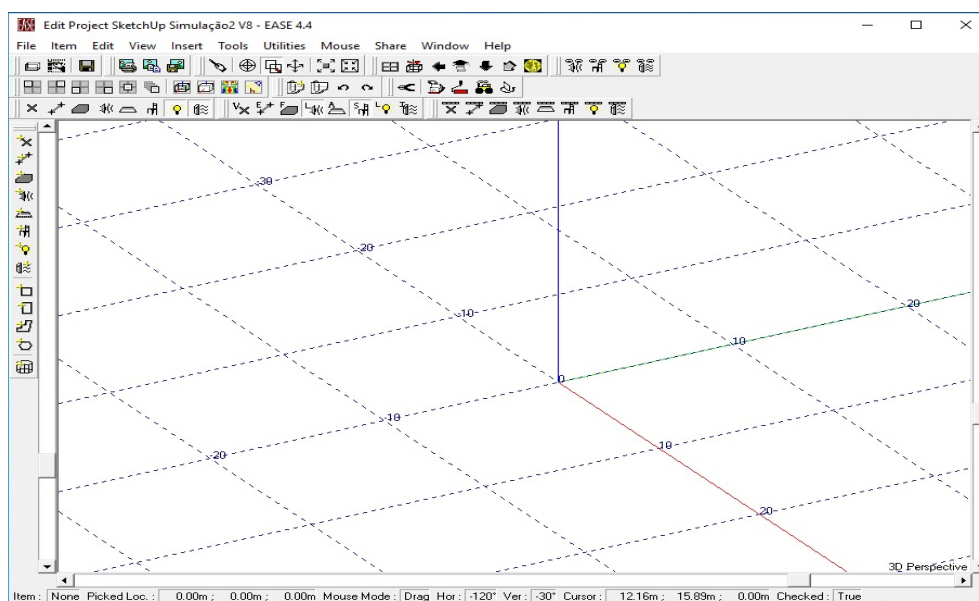


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

### 3.3.1 Software utilizado para as simulações acústicas

Esta pesquisa utilizou o *software* EASE da AFMG para a simulação, processamento e análise dos sinais de áudio realizados no modelo digital construído do AOL. O programa possui inúmeras ferramentas que permitem auxiliar na modelagem e simulação acústica de ambientes, exibindo o desempenho acústico e eletroacústico de uma sala e de seu sistema de alto-falantes. Dentre elas, pode-se destacar algumas como o módulo *Edit Project* (Figura 44), *AURA*, *Eyes*, *Local Ray Tracing*, *Draw RT*, *Local Decay Time*, *Ray Tracing Impacts*, *Mirror Image Impacts*, *Acoustical Probe* e *Auralization*. Todas elas possuem funções, parâmetros de configurações e métodos de simulação distintos, oferecendo, consequentemente, diversos tipos de resultados com níveis de precisão diferenciados.

Figura 44 – Visualização do módulo *Edit Project* do software EASE da AFMG.

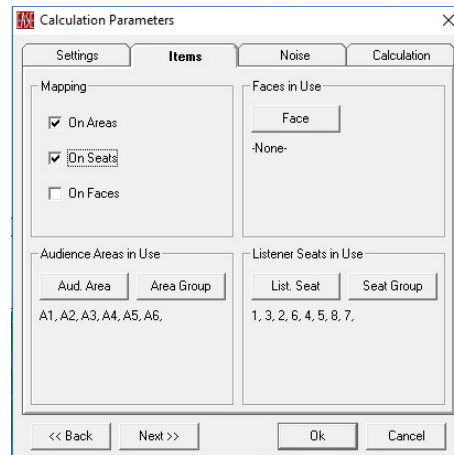


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

O EASE ainda oferece a opção de escolher se as avaliações e os cálculos serão realizados na região que o público ocupa, denominada *audience areas*, ou em posições específicas de ouvintes posicionados na sala, denominada de *listeners seats* (Figura 45).



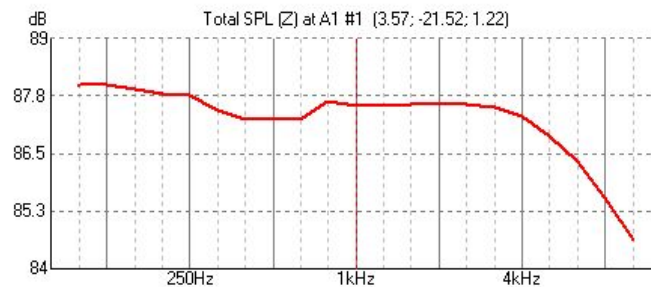
Figura 45 – Configuração das *audience areas* e dos *listeners seats* no software EASE da AFMG.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

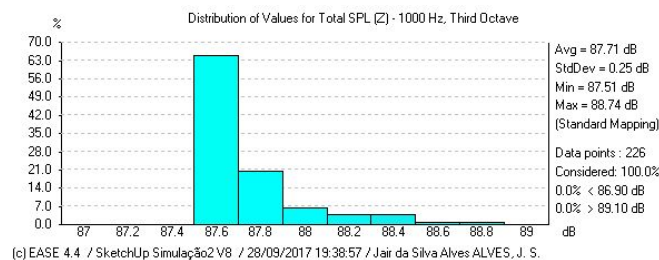
Isso permitirá que o usuário obtenha resultados da sala como um todo, ou apenas de locais específicos de um ouvinte posicionado na sala. Dessa forma, os resultados podem ser visualizados sob a forma de gráficos no domínio da frequência (Figura 46), tabelas, mapa de cores da distribuição espacial já ilustrado na Figura 43, bem como através da distribuição percentual dos valores assumidos pelos parâmetros de caracterização acústica (Figura 47).

Figura 46 – Visualização dos resultados na forma de gráfico no domínio da frequência.



Fonte: EASE, modificado pelo autor, 2017.

Figura 47 – Visualização dos resultados na forma de gráfico de distribuição percentual dos valores.



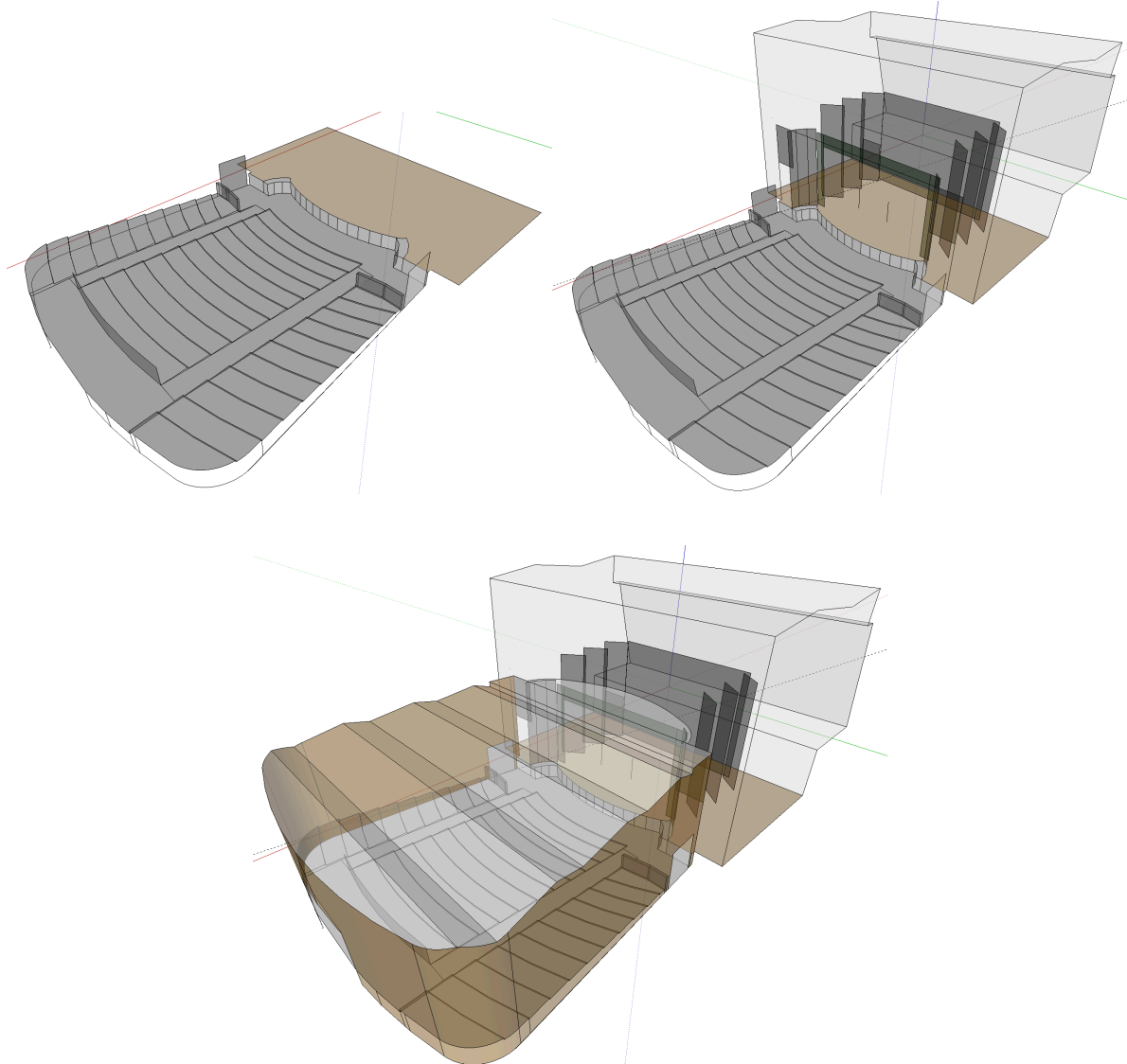
Fonte: EASE, modificado pelo autor, 2017.



### 3.3.2 Construção do modelo digital

A partir da planta baixa e dos cortes da seção transversal do auditório construídas em CAD, o volume simplificado a ser implementado no *software* EASE foi modelado passo-a-passo no programa *Sketchup Pro* (Figura 48) e posteriormente importado para o EASE. Esse modelo arquitetônico irá fornecer a entrada de dados iniciais da simulação. Ou seja, as informações acerca das dimensões e geometria do espaço. É importante destacar que, apesar das poltronas do auditório não terem sido desenhadas no modelo, são consideradas para efeitos de cálculo.

Figura 48 – Passo-a-passo da construção do modelo em 3D no programa *Sketchup Pro*.



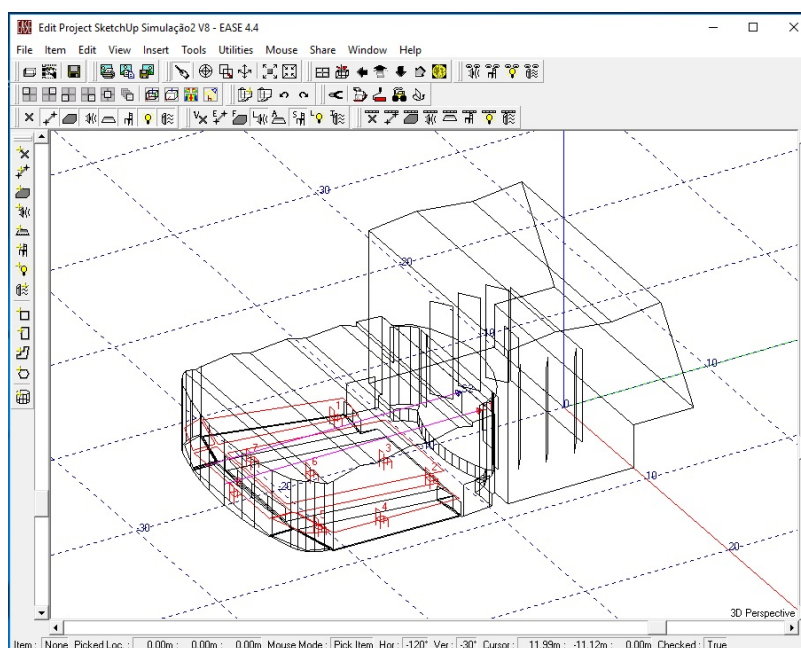
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Alguns detalhes da sala dificultam a construção de um modelo completamente fiel à realidade. Por exemplo, superfícies curvas não são bem aceitas nos programas que são baseados na teoria de raios acústicos. Dessa forma, superfícies deste tipo devem ser modeladas de forma aproximada, através da construção de vários planos (VORLÄNDER, 2008). Apesar da sala em questão possuir um formato de leque, as superfícies curvas estão localizadas apenas nas extremidades da parede do fundo da sala. Por este motivo, o modelo foi construído substituindo essas superfícies por paredes planas. Deste modo, os resultados apresentados no Capítulo 4 não sofreram a influência desta adequação.

O modelo em CAD foi importado para o *software* EASE e iniciou-se um processo para verificar se havia erros de construção, como por exemplo, faces inexistentes, sobrepostas ou invertidas. No caso de haver a presença de algum desses defeitos no modelo, haverá a formação de buracos (*holes*) que deverão ser devidamente corrigidos. Os buracos são o resultado de violar uma ou mais das regras de modelagem do EASE, sinalizando que algo não está certo e deve ser corrigido antes de prosseguir.

O modelo do pronto para as simulações no ambiente do módulo *Edit Project* do *software* EASE está representado na Figura 49.

Figura 49 – Modelo do AOL importado para o *software* EASE.

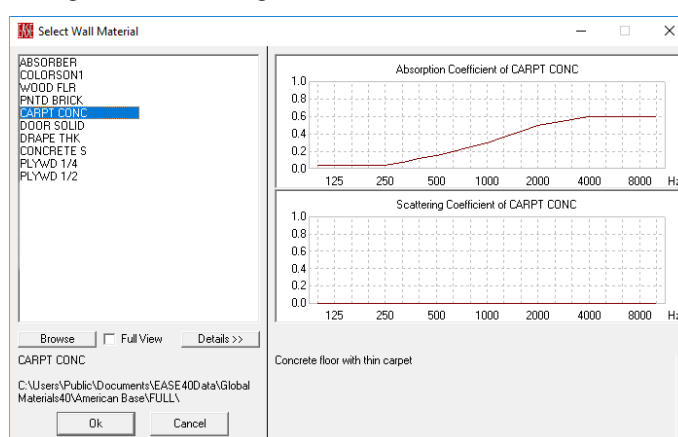


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

### 3.3.3 Modelagem das características dos materiais

Após essa correção inicial, foi fornecido ao modelo uma segunda entrada de dados que consiste na definição de todos os tipos de materiais que constituem as superfícies internas da sala. As características de absorção sonora dessas superfícies foram definidas através de uma base de dados (Figura 50), que é fundamentada nos valores dos coeficientes de absorção sonora por banda de frequência de Sabine.

Figura 50 – Modelagem das características dos materiais.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Os valores dos coeficientes de absorção sonora  $\alpha$  dos materiais utilizados no modelo digital do AOL estão descritos na Tabela 9 abaixo. Por padrão do EASE, os coeficientes de espalhamento da superfície de todos os materiais foram fixados em 0.2.

Tabela 9 – Valores dos coeficientes de absorção sonora  $\alpha$  das superfícies dos materiais utilizados no modelo digital do AOL.

Coeficiente de Absorção		$\alpha$ para a média das frequências (Hz)						
Descrição	Material EASE	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Assentos	MTSEAT LHT	0,44	0,54	0,60	0,62	0,58	0,50	0,45
Concreto sólido	CONCRETE S	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05	0,06
Compensado de 1/2" fixado em estrutura sólida de madeira	PLYWD1/2	0,40	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,10
Cortina grossa	DRAPE THK	0,05	0,12	0,35	0,48	0,38	0,36	0,39
Alvenaria de tijolo rebocado e com pintura	PNTD BRICK	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Piso em lâde madeira sólida	WOOF FLR	0,20	0,15	0,10	0,08	0,08	0,05	0,05
Carpete colado no concreto	CARPT CONC	0,04	0,04	0,15	0,30	0,50	0,60	0,60
Porta sólida de madeira	DOOR SOLID	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,07

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

### 3.3.4 Modelagem das áreas de audiência e dos assentos dos ouvintes

Após esta etapa, as áreas de audiência bem como a posição dos ouvintes foram definidas. Estas representam, respectivamente, as áreas e os pontos de recepção para os quais se calculará os parâmetros de caracterização acústica.

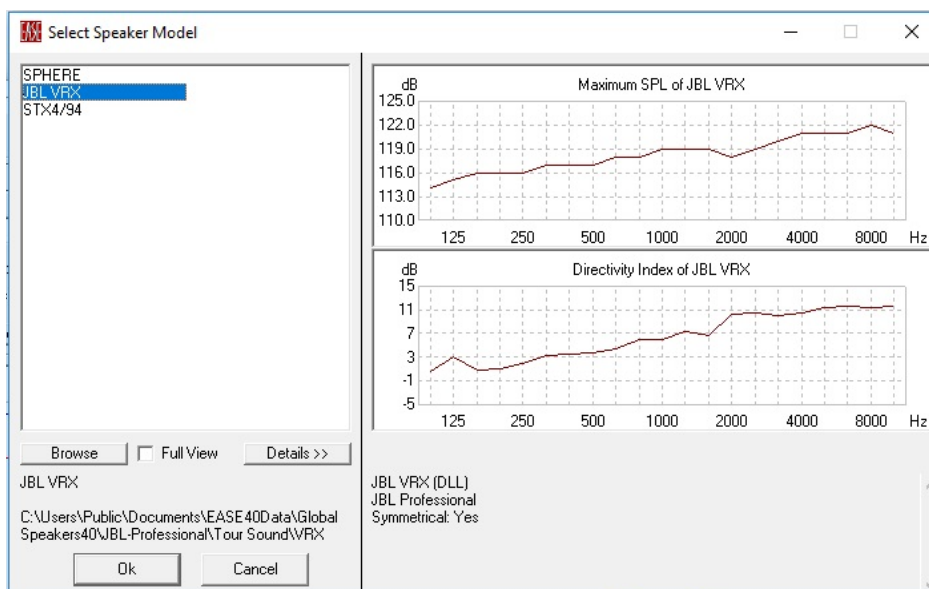
As *audience areas* são as áreas imaginárias nas quais o EASE normalmente mapeia o desempenho do sistema. A rotina de varredura utilizada pelo EASE no seu módulo de mapeamento de área requer áreas de quatro lados, então este método de adicionar áreas de audiência funciona somente se a Área de Audiência estiver sendo colocada acima de uma face com quatro cantos; Isto é, um quadrado, retângulo ou uma superfície quadrangular.

Os *listeners seats*, também denominados de receptores pontuais, fornecem um ponto de referência para as simulações EASE, EARS e AURA. Eles representam pontos identificáveis para investigações acústicas mais aprofundadas, bem como pontos (assentos) para se observar ao redor da sala usando as capacidades gráficas do EASE.

### 3.3.5 Modelagem das características eletroacústicas

As características físicas das fontes em termos de potência sonora (resposta dinâmica e em frequência) e direcionalidade, são possíveis de definir através de uma base de dados onde estão disponíveis diversas gamas de alto-falantes fabricados atualmente (Figura 51).

Figura 51 – Modelagem das características eletroacústicas dos alto-falantes.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

É importante ressaltar ainda que o sistema de alto-falantes pode ser simulado em diferentes posições e com diferentes orientações e, caso a caixa acústica não esteja presente no banco de dados do EASE, o *software* também fornece a opção de uma ferramenta que permite criar um alto-falante baseado nas especificações técnicas do fabricante.

O modelo de alto-falante selecionado nas simulações foi o SPHERE, que é tecnicamente compatível com o modelo da B&K utilizado nas medições acústicas.

### 3.3.6 Validação do modelo computacional

O desempenho e a precisão das simulações computacionais só podem ser validados quando os ambientes são modelados e os resultados dessas simulações são comparados com as medições (VORLÄNDER, 2013). Assim, após construído, o modelo desenvolvido para o AOL foi validado, comparando-se os resultados do parâmetro Tempo de Reverberação (RT) medidos *in situ* com os apresentados na simulação computacional. Para isso, foi utilizada a ferramenta *Local Decay Time* – LDT do EASE, na qual tem a capacidade de desenvolver rapidamente tempos de reverberação com base em estudos de reflexão.

As fórmulas de *Eyring* ou *Sabine* que o EASE usam para calcular o RT, muitas vezes são fórmulas generalizadas que não se aplicam a todos os espaços, pois assumem que o material de absorção do ambiente é distribuído de forma homogênea nas superfícies da sala, uma condição que não existe em todos os ambientes. Consequentemente, o tempo de reverberação também é um único conjunto de tempos para toda a sala, enquanto que, em uma situação real, o tempo de reverberação muda de um local para outro.

O *Local Decay Time* fornece uma verificação rápida sobre a fidelidade dessas fórmulas, além de fornecer projeções de tempo de reverberação para pontos específicos dentro da sala. Essa ferramenta usa uma fonte omnidirecional para distribuir um número customizável de raios em toda a sala e, a medida que os raios atravessam a sala, o programa registra a energia e o tempo de cada um deles, calculando assim o tempo de reverberação. Os resultados são tempos de reverberação mais próximos de uma situação real.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são avaliados todos os resultados da pesquisa, comparando-os com os padrões de referência estabelecidos na literatura. Essa análise é apresentada em duas etapas distintas: a primeira refere-se aos resultados das medições de parâmetros RT, EDT, C80, D50 e Ts do AOL obtidos através da resposta ao impulso, os quais servirão para realizar uma avaliação preliminar do condicionamento acústico dessa sala, bem como para validar o modelo digital tridimensional construído. Na segunda etapa, são apresentados os resultados desses mesmos parâmetros obtidos a partir das simulações computacionais realizadas no modelo digital construído. Esses resultados são avaliados sob duas diferentes perspectivas: a primeira, considerando a simulação computacional dos parâmetros acústicos da situação atual da construção, e a segunda, considerando uma situação hipotética, na qual serão avaliadas algumas diretrizes sugeridas no modelo através do software, visando a otimização do condicionamento acústico do ambiente para a utilização desse espaço como sendo destinado a múltiplos usos.

### 4.1 MEDIÇÕES ACÚSTICAS

#### 4.1.1 Análise das características de reverberação (RT e EDT)

As características de reverberação do AOL foram obtidas através dos parâmetros RT e EDT definidos na seção 2.5.2.

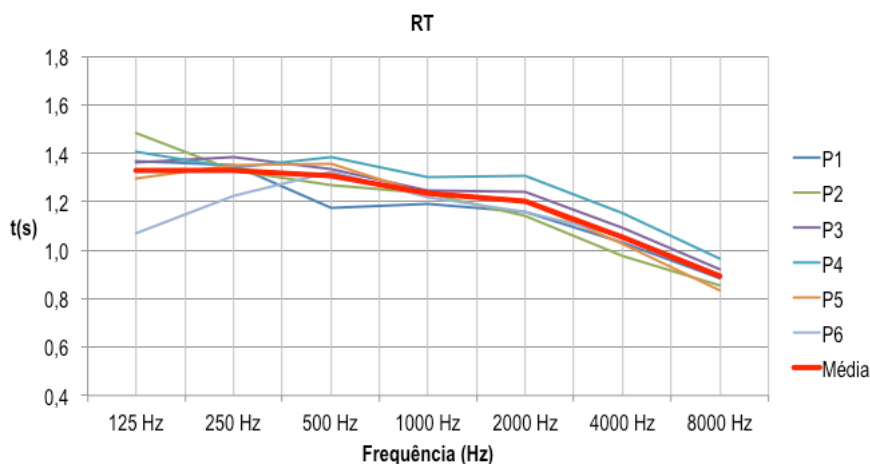
A Tabela 10 apresenta os valores médios de todas as posições do parâmetro RT por banda de frequência, obtidos através de medições acústicas executadas de acordo com as recomendações da ISO 3382-1 (2009). Esses mesmos resultados estão ilustrados no Gráfico 1.

Tabela 10 – Valores médios globais de RT obtidos através de medição.

Ponto de medição	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	RT (500 e 1000 Hz)
P1	1,4	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0	0,9	1,2
P2	1,5	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	1,3
P3	1,4	1,4	1,3	1,2	1,2	1,1	0,9	1,3
P4	1,4	1,3	1,4	1,3	1,3	1,2	1,0	1,3
P5	1,3	1,4	1,4	1,2	1,2	1,0	0,8	1,3
P6	1,1	1,2	1,3	1,2	1,2	1,1	0,9	1,3
Média	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	0,9	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

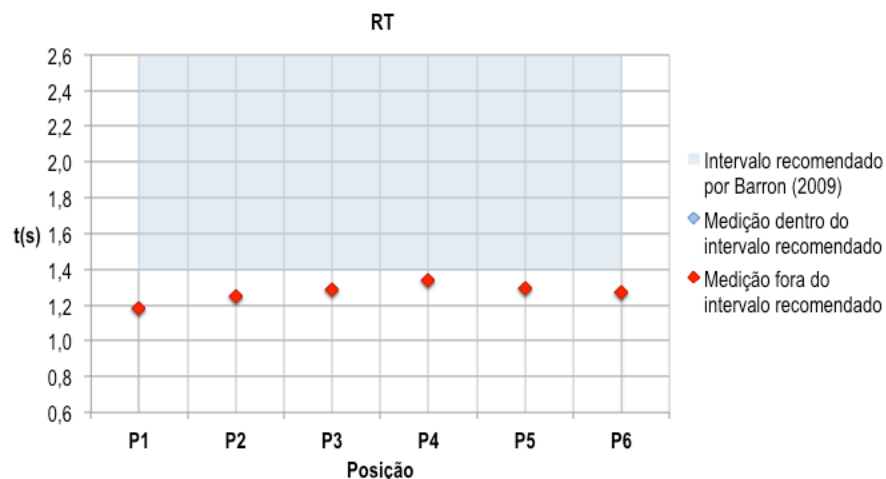
Gráfico 1 – Curvas dos valores médios globais de RT obtidos através de medição.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

As medições realizadas no AOL (sem ocupação) apresentaram resultados de RT variando entre 0,8 s em 8000 Hz na posição P5 e 1,5 s em 125 Hz na posição P2. Analisando os valores médios das frequências de 500 e 1000 Hz de todas as posições, os resultados variaram entre 1,2 e 1,3 s (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de RT obtidos através de medição, de acordo com Barron (2009).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

De acordo com os valores dos parâmetros de reverberação sugeridos por Brandão (2016), Barron (2009), Beranek (2004) e Long (2006), e considerando o uso desse espaço para a música, os resultados de RT medidos no AOL encontram-se fora dos intervalos recomendados pelos autores em todas as posições avaliadas. Considerando o uso do ambiente

para a fala, os resultados desse parâmetro também não podem ser considerados ideais, visto que deveriam estar próximo a 1 (um) segundo (BARRON, 2009).

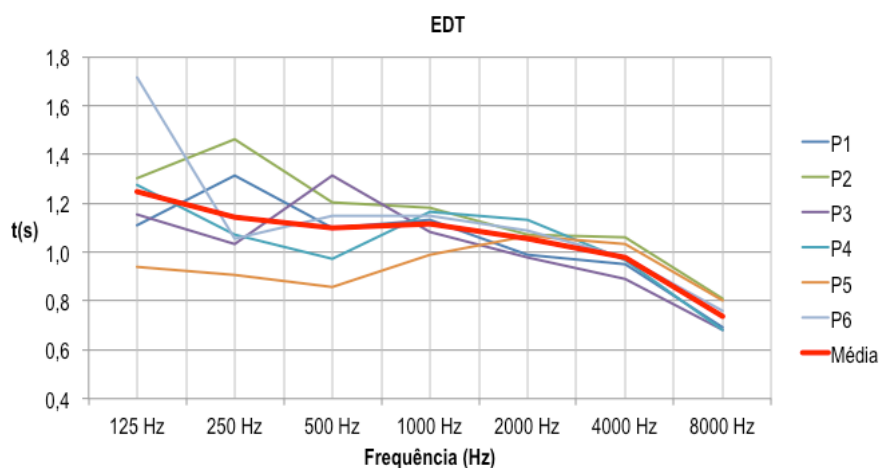
Na Tabela 11 são apresentados os valores médios de todas as posições do parâmetro EDT por banda de frequência, medidos de acordo com as recomendações da ISO 3382-1. Esses mesmos resultados estão ilustrados no Gráfico 3.

Tabela 11 – Valores médios globais de EDT obtidos através de medição.

Ponto de medição	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	EDT (500 e 1000 Hz)
P1	1,1	1,3	1,1	1,1	1,0	1,0	0,7	1,1
P2	1,3	1,5	1,2	1,2	1,1	1,1	0,8	1,2
P3	1,2	1,0	1,3	1,1	1,0	0,9	0,7	1,2
P4	1,3	1,1	1,0	1,2	1,1	1,0	0,7	1,1
P5	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,0	0,8	0,9
P6	1,7	1,1	1,1	1,2	1,1	1,0	0,8	1,1
Média	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	0,7	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Gráfico 3 – Curvas dos valores médios globais de EDT obtidos através de medição.

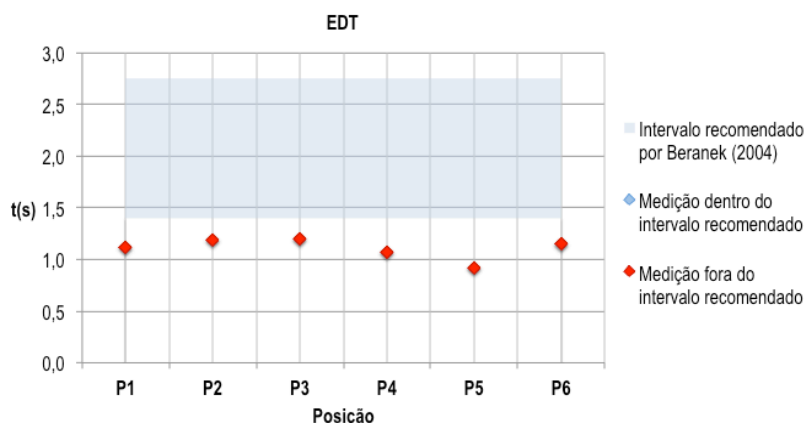


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

As medições realizadas no AOL (sem ocupação) apresentaram resultados de EDT variando entre 0,7 s em 8000 Hz nas posições P1, P3 e P4 e 1,7 s em 125 Hz na posição P6. Analisando os valores médios das frequências de 500 e 1000 Hz de todas as posições, os resultados variaram entre 0,9 e 1,3 s e estão plotados no Gráfico 4 abaixo.



Gráfico 4 – Valores médios (500 Hz a 1000 Hz) de EDT obtidos através de medição, de acordo com Beranek (2004).

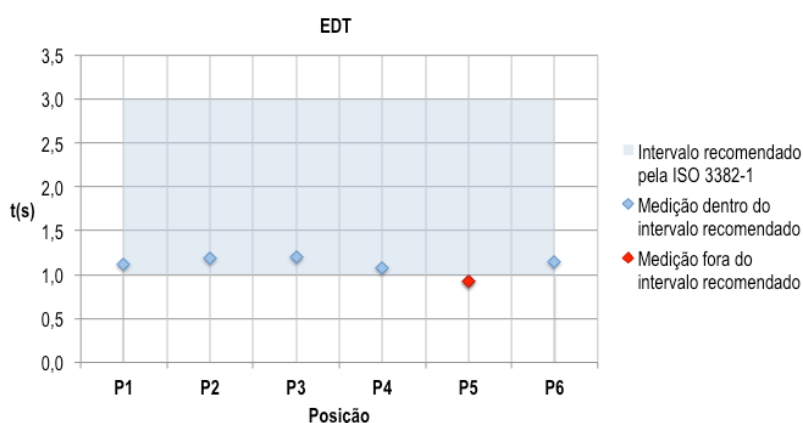


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

De acordo com Beranek (2004), as melhores salas de concerto possuem valores do EDT variando entre 2,25 e 2,75 s. Em outras salas que não foram tão bem avaliadas por ele, esses valores variaram entre 1,4 e 2,0 segundos. Dessa forma, as medidas do EDT encontradas na sala encontram-se fora dos intervalos recomendados pelos autores em todas as posições avaliadas.

Se avaliarmos esses resultados considerando a ISO 3382-1 (2009), a qual recomenda valores de EDT entre 1,0 e 3,0 segundos, verifica-se que, exceto na posição P6 que possui valor de 0,74 s, e portanto encontra-se abaixo do limite mínimo recomendado pela norma, os valores dos resultados das demais posições avaliadas estão dentro do intervalo recomendado, embora bastante próximos ao limite inferior (Gráfico 5).

Gráfico 5 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de EDT obtidos através de medição, de acordo com a norma ISO 3382-1 (2009).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

#### 4.1.2 Análise dos parâmetros de clareza e definição (C80, D50 e Ts)

Os resultados obtidos para os principais parâmetros acústicos de caracterização da clareza e definição sonora estão organizados na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) dos parâmetros C80, D50 e Ts obtidos através de medição.

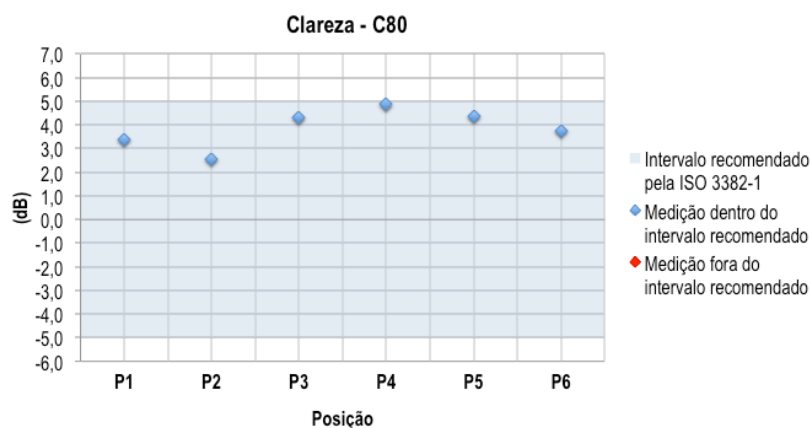
Ponto de medição	C80 (dB)			D50 (-)			Ts (ms)		
	500 Hz	1000 Hz	Média	500 Hz	1000 Hz	Média	500 Hz	1000 Hz	Média
<b>P1</b>	3,1	3,7	<b>3,4</b>	0,51	0,60	<b>0,56</b>	71,2	64,4	<b>67,8</b>
<b>P2</b>	1,1	4,1	<b>2,6</b>	0,44	0,62	<b>0,53</b>	82,4	63,5	<b>73,0</b>
<b>P3</b>	4,6	4,1	<b>4,3</b>	0,65	0,60	<b>0,63</b>	63,6	67,2	<b>65,4</b>
<b>P4</b>	5,2	4,5	<b>4,9</b>	0,65	0,62	<b>0,64</b>	58,8	67,5	<b>63,2</b>
<b>P5</b>	5,1	3,7	<b>4,4</b>	0,56	0,47	<b>0,52</b>	64,9	74,5	<b>69,7</b>
<b>P6</b>	4,6	2,9	<b>3,8</b>	0,61	0,50	<b>0,56</b>	70,9	80,2	<b>75,6</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

As medições realizadas no AOL (sem ocupação) apresentaram resultados de C80 variando entre +2,6 dB na posição P2 e +4,9 na posição P4. Por recomendação da ISO 3382-1 (2009), os valores do C80 podem variar entre -5,0 e +5,0 dB. Deste modo, os resultados médios apresentados em todas as posições encontram-se dentro do intervalo especificado pela norma.

No Gráfico 6, estão plotados os valores médios das frequências de 500 e 1000 Hz em todas as posições, bem como uma região identificada na cor azul, ilustrando o intervalo do parâmetro C80 recomendado pela ISO 3382-1.

Gráfico 6 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Clareza (C80) obtidos através de medição.

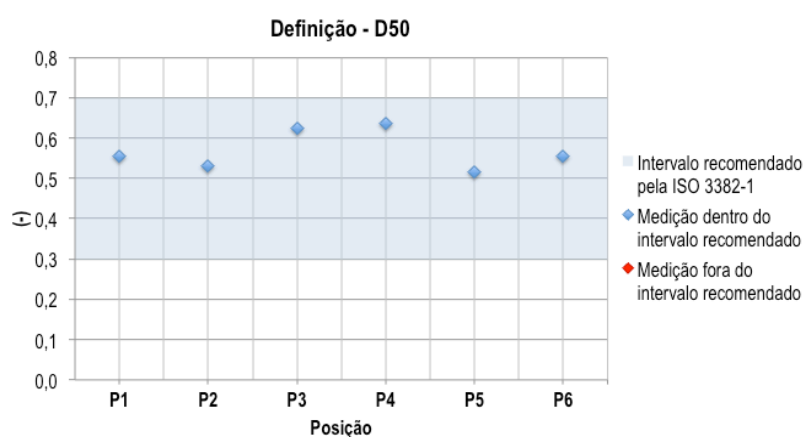


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para a Definição (D50), as medições apresentaram resultados que variaram entre 0,52 na posição P5 e 0,64 na posição P4. Por recomendação da ISO 3382-1 (2009), os valores do D50 podem variar entre 0,30 e 0,70. Deste modo, todos os valores apresentados encontram-se dentro do *range* típico especificado pela norma.

No Gráfico 7, estão plotados os valores médios das frequências de 500 e 1000 Hz em todas as posições, bem como uma região identificada na cor azul, ilustrando o intervalo do parâmetro D50 recomendado pela ISO 3382-1.

Gráfico 7 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Definição (D50) obtidos através de medição.

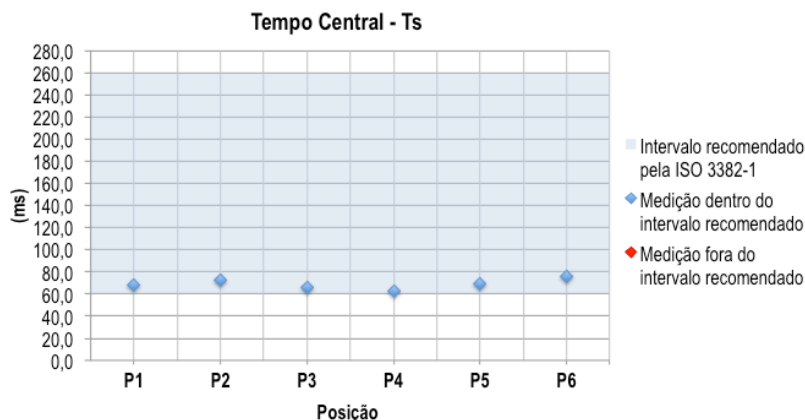


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para o Tempo Central (Ts), as medições apresentaram resultados que variaram entre 63,2 na posição P4 e 75,6 na posição P6. Por recomendação da ISO 3382-1 (2009), os valores do Ts podem variar entre 60 e 260 ms. Deste modo, todos os valores apresentados encontram-se dentro do intervalo especificado pela norma.

No Gráfico 8, estão plotados os valores médios das frequências de 500 e 1000 Hz em todas as posições, bem como uma região indicada na cor azul, ilustrando o intervalo do parâmetro Ts recomendado pela ISO 3382-1.

Gráfico 8 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Tempo Central (Ts) obtidos através de medição.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Como visto na seção 2.5.2, quanto maior o valor de  $C$ , maior o domínio das reflexões primárias (*early sound*), e, conseqüentemente, maior a impressão de clareza do som. No caso da Definição, quanto maior esse índice, maior a razão linear entre a quantidade de energia das primeiras reflexões em relação à energia total da resposta ao impulso. Para o  $T_s$ , quanto menor esse valor, menos energia no campo reverberante a sala possui.

Deste modo, analisando os valores apresentados por esses parâmetros é possível observar que a sala possui mais energia nas primeiras reflexões do que no campo reverberante, tornando-a deficiente para a utilização desse espaço com um ambiente destinado à música sem amplificação.

## 4.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA SITUAÇÃO ATUAL

Na previsão das características acústicas do Auditório Onofre Lopes foi utilizada uma fonte sonora omnidirecional ideal localizada nas mesmas posições de fonte utilizadas nas medições (Figura 41). Além disso, o ruído de fundo ambiente medido *in situ* (Tabela 16) foi considerado nas simulações.

Como primeira etapa da simulação, foi realizada a validação do modelo tridimensional construído do AOL através da comparação dos resultados do parâmetro Tempo de Reverberação medidos *in situ* com os apresentados na simulação computacional.

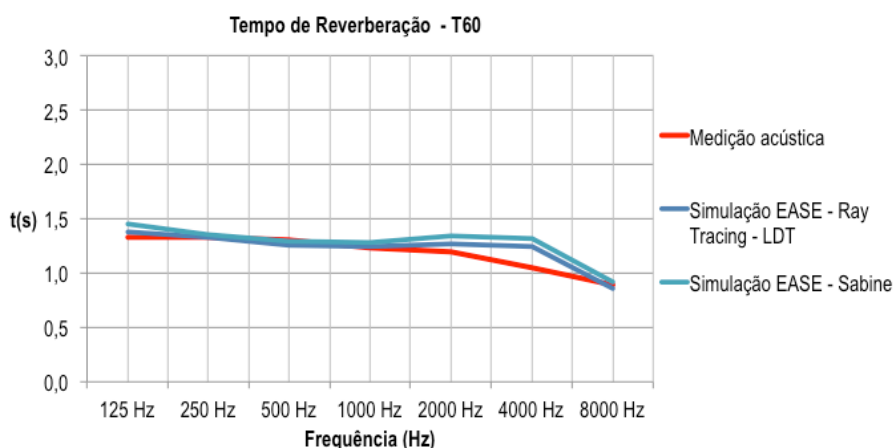
Na Tabela 13 são apresentados os valores médios de todas as posições do parâmetro RT, por banda de frequência, obtidos através de medição e simulação computacional. Esses mesmos resultados estão ilustrados no Gráfico 9.

Tabela 13 – Valores médios globais de RT obtidos no AOL, através de medição e simulação computacional.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
<b>Medição</b>	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	0,9
<b>LDT</b>	1,4	1,3	1,3	1,2	1,3	1,2	0,9
<b>Sabine</b>	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	0,9

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Gráfico 9 – Curvas dos valores médios globais de RT obtidos no AOL, através de medição e simulação computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor, 2017.

Como observado no gráfico acima, as ferramentas de simulação computacional forneceram valores bastante próximos aos resultados obtidos através de medição acústica *in situ*. A diferença de valores entre as bandas de frequência de 2000 e 4000 Hz pode ser atribuída à absorção causada pelos objetos reais presentes no auditório que não foram considerados no modelo (VORLÄNDER, 2008).

Assim, é possível inferir que o modelo digital construído apresenta dimensões e coeficientes de absorção acústica dos materiais compatíveis aos utilizados na construção real do auditório, permitindo assim que o modelo possa ser utilizado em outras simulações.

Após a validação do modelo computacional, os parâmetros *Early Decay Time* (EDT), Clareza (C80), Definição (D50), Tempo Central (Ts) e *Speech Transmission Index* (STI) foram simulados.

Os valores médios das frequências de 500 e 1000 Hz obtidos nas simulações realizadas no modelo digital construído do AOL (sem ocupação) apresentaram resultados de EDT variando entre 1,1 e 1,4 s (Tabela 14) que, de acordo com Beranek (2004), encontram-se fora do intervalo recomendado em todas as posições avaliadas. A distribuição espacial dos

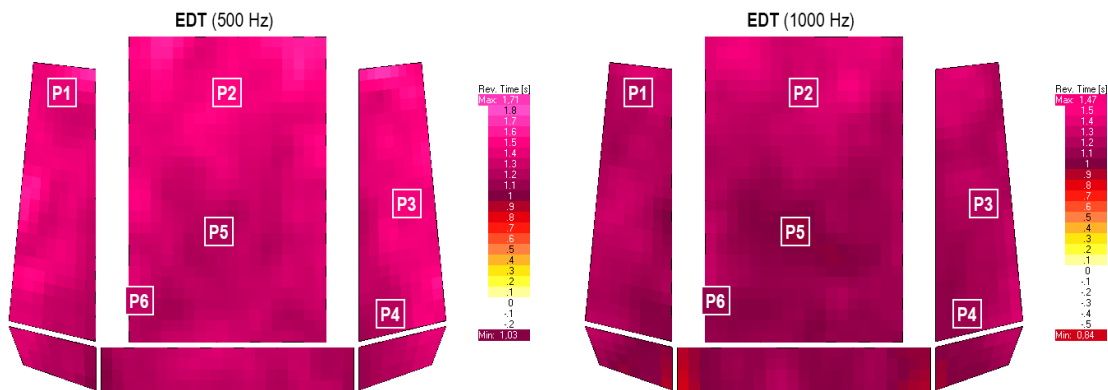
valores assumidos pelo parâmetro EDT está ilustrada na Figura 52 e os valores médios por banda de frequência (500 Hz e 100 Hz) estão plotados na Gráfico 10.

Tabela 14 – Valores médios de EDT obtidos através de simulação, considerando a situação atual.

	500 Hz	1000 Hz	Média
<b>P1</b>	1,5	1,2	1,4
<b>P2</b>	1,4	1,3	1,4
<b>P3</b>	1,5	1,2	1,4
<b>P4</b>	1,3	1,1	1,2
<b>P5</b>	1,2	1,0	1,1
<b>P6</b>	1,3	1,0	1,1

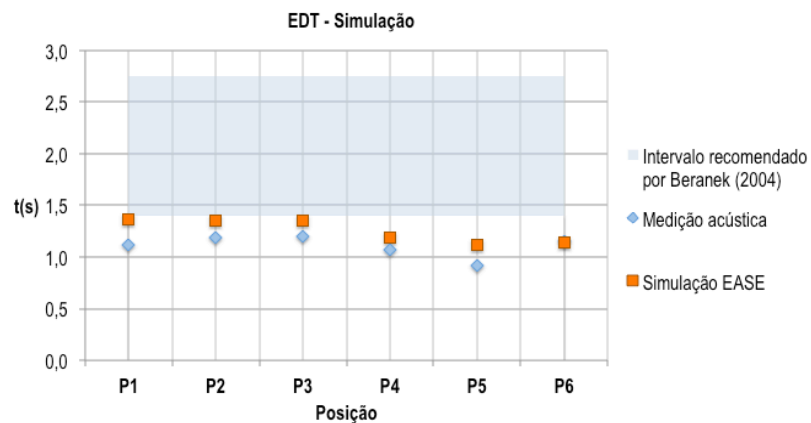
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 52 – Distribuição espacial de EDT obtida através de simulação, considerando a situação atual.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Gráfico 10 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de EDT obtidos através de simulação, considerando a situação atual.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Os valores médios das frequências de 500 e 1000 Hz obtidos nas simulações realizadas no modelo digital construído do AOL (sem ocupação) apresentaram resultados de C80 variando entre +3,1 dB na posição P1 e +4,6 dB na posição P5, de D50 variando entre 0,55 na posição P1 e 0,62 nas posições P4 e P6 e de Ts variando entre 71,5 segundos na posição P5 e 77,2 segundos nas posições P1 e P2 (Tabela 15).

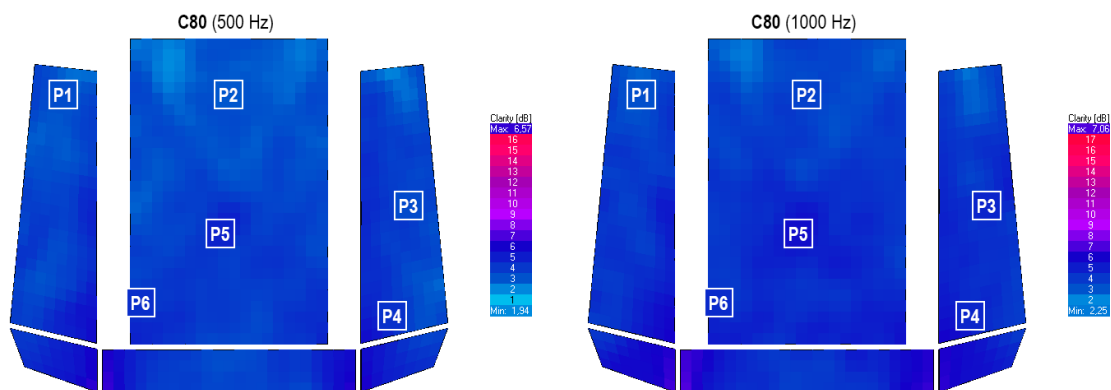
Tabela 15 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) dos parâmetros C80, D50 e Ts obtidos através de simulação, considerando a situação atual.

Ponto de medição	C80 (dB)			D50 (-)			Ts (ms)		
	500 Hz	1000 Hz	Média	500 Hz	1000 Hz	Média	500 Hz	1000 Hz	Média
P1	2,9	3,3	<b>3,1</b>	0,53	0,56	<b>0,55</b>	82,7	71,6	<b>77,2</b>
P2	3,0	3,5	<b>3,3</b>	0,55	0,57	<b>0,56</b>	81,6	72,8	<b>77,2</b>
P3	4,1	4,6	<b>4,3</b>	0,57	0,58	<b>0,58</b>	79,7	68,5	<b>74,1</b>
P4	4,3	4,7	<b>4,5</b>	0,60	0,63	<b>0,62</b>	77,4	67,4	<b>72,4</b>
P5	4,4	4,8	<b>4,6</b>	0,61	0,62	<b>0,61</b>	75,3	67,8	<b>71,5</b>
P6	4,0	4,6	<b>4,3</b>	0,60	0,64	<b>0,62</b>	78,8	68,2	<b>73,5</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

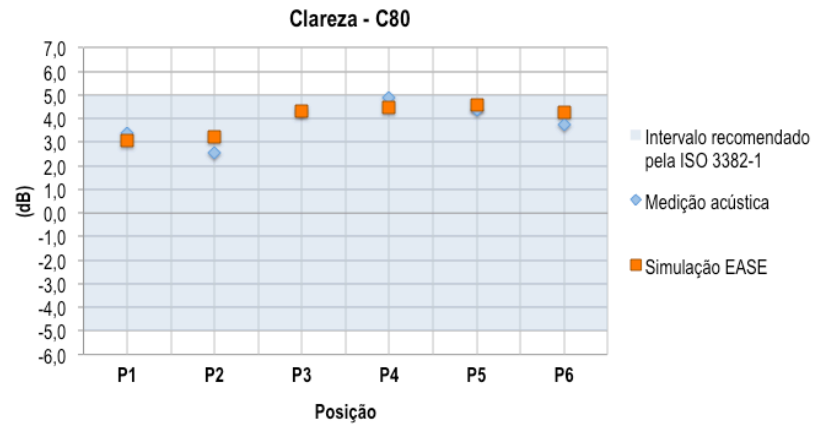
De acordo com a ISO 3382-1 (2009), todos os parâmetros encontram-se dentro do intervalo recomendado pela norma em todas as posições avaliadas. A distribuição espacial dos valores assumidos por esses parâmetros está ilustrada nas Figuras 53, 54 e 55 e os valores médios por banda de frequência (500 Hz e 1000 Hz) estão plotados nos Gráficos 11, 12 e 13.

Figura 53 – Distribuição espacial de Clareza (C80) obtida através de simulação, considerando a situação atual.



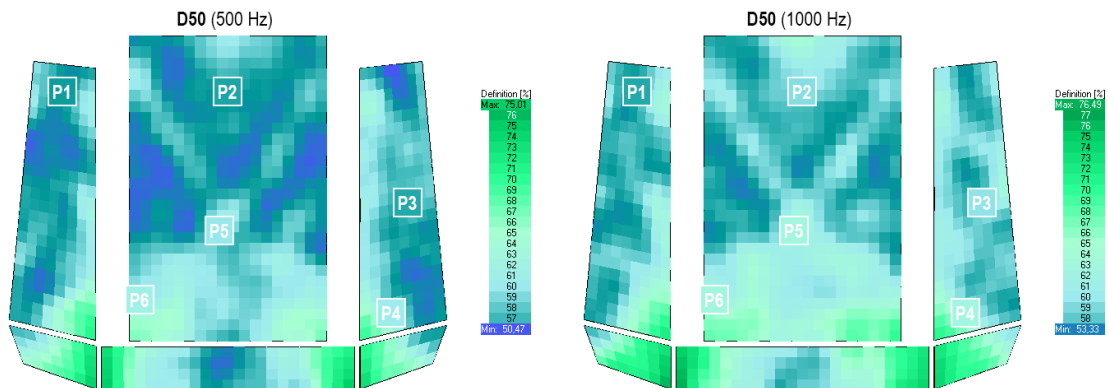
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Gráfico 11 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Clareza (C80) obtidos através de simulação, considerando a situação atual.



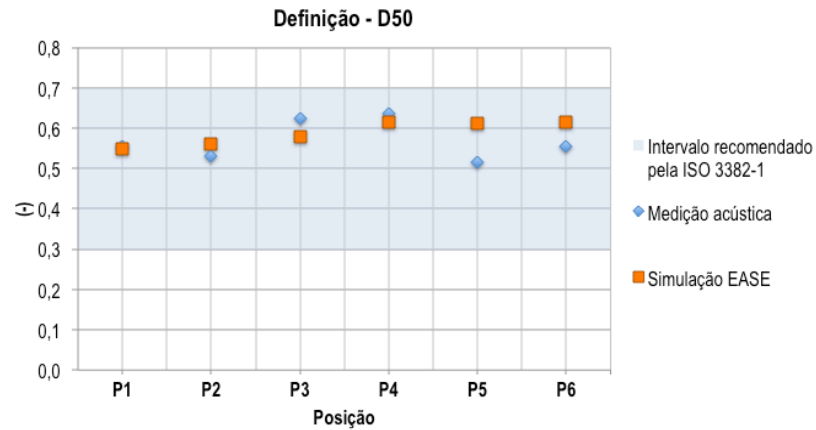
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 54 – Distribuição espacial de Definição (D50) obtida através de simulação, considerando a situação atual.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

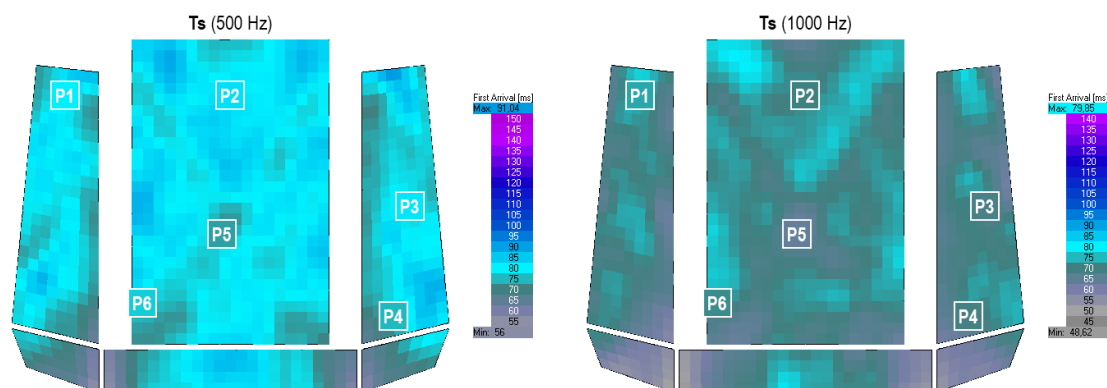
Gráfico 12 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Definição (D50) obtidos através de simulação, considerando a situação atual.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

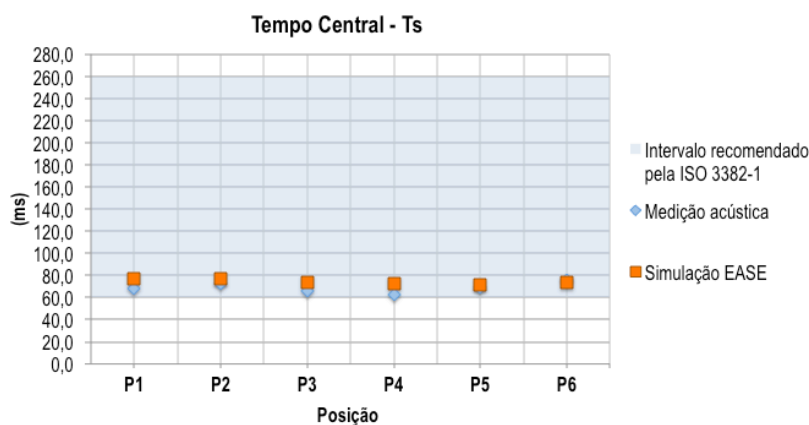


Figura 55 – Distribuição espacial de Tempo Central (Ts) obtida através de simulação, considerando a situação atual.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Gráfico 13 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Tempo Central (Ts) obtidos através de simulação, considerando a situação atual.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

### 4.3 DIRETRIZES GERAIS DE PROJETO

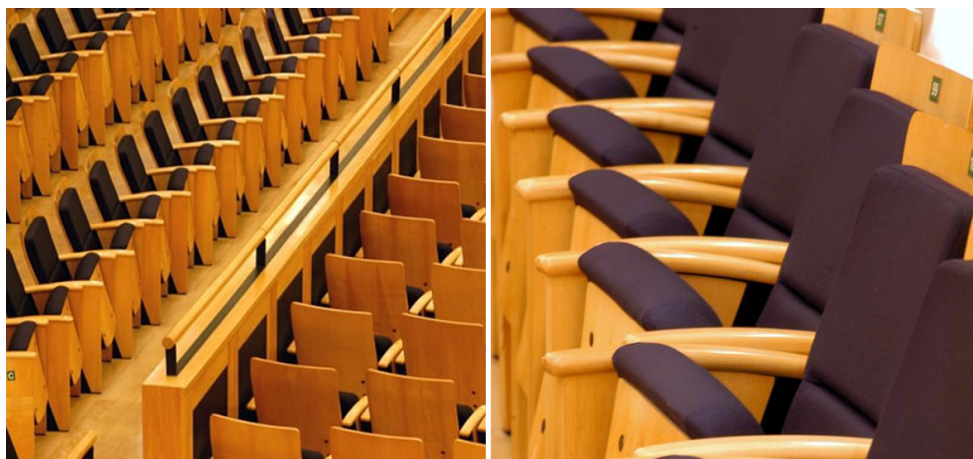
Considerando que os resultados apresentados nas medições e simulações computacionais apontam que a sala possui alguns parâmetros acústicos fora dos padrões estabelecidos pelas normas para o uso a que se destina, foram elaboradas algumas diretrizes gerais de projeto, visando otimizar as características acústicas do Auditório Onofre Lopes.

#### 4.3.1 Tipo de poltronas

Assim como nos auditórios para música, no caso de auditórios multiuso, a plateia é, comumente, o principal elemento absorvedor (BRANDÃO 2016). Beranek (2004) já demonstrou influência da ocupação total dos assentos nas características de reverberação do ambiente (Figura 18). Assim, para que essas características acústicas sejam mantidas sem alterações significativas devido à presença do público, sugere-se o uso de assentos acolchoados com propriedades de absorção similares à absorção das pessoas. Deste modo, é recomendável a utilização de cadeiras que sejam de material moldado, como a madeira compensada. O estofamento não deve ser mais espesso do que 5 cm no topo do assento e não deve possuir mais do que 2,5 cm de espessura no encosto do banco. Se possível, o encosto deve ter apenas dois terços de cobertura. Além disso, o apoio de braços e a parte traseira do assento de uma cadeira não devem ser estofados.

As cadeiras da Sala São Paulo (Figura 56), reconhecida internacionalmente pela qualidade acústica que possui, é um exemplo prático das recomendações elaboradas por Beranek (2004).

Figura 56 – Assentos construídos com características de absorção acústica similares as do público.



Fonte: Página da Galeria da Arquitetura<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Disponível em: < <https://www.galeriadaarquitetura.com.br/> > Acesso em ago. 2017.

#### 4.3.2 Ruído de fundo

O ruído ambiente no interior do Auditório foi medido diretamente através da captação do microfone e caracterizado no *software* DIRAC da B&K. Os resultados obtidos estão indicados na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores médios globais do ruído ambiente obtidos através de medição.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
<b>Ruído (dB)</b>	54,3	48,7	46,7	45,8	41,0	33,7	23,4

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Como mostrado acima, os valores de ruído de fundo por banda de frequência medidos no AOL mostraram-se extremamente altos se considerarmos os valores recomendados na NR25 (Figura 22), que é a curva que sugere o limite máximo de ruído permitido em auditórios com até 500 lugares. Na frequência de 1000 Hz, por exemplo, a curva estabelece um limite máximo de ruído de aproximadamente 25 dB, enquanto o resultado da medição apontou um valor de 45,8 dB, o que corresponde a aproximadamente 20 dB de ruído acima do limite máximo permitido.

Uma das principais fontes geradoras de ruído é proveniente do sistema de climatização que atualmente equipa esse auditório. Trata-se de um sistema composto por cinco condicionadores de ar do tipo *Split Hi-Wall* de 84.000 BTUs cada, que produzem um alto nível de ruído na sala, necessitando serem desligados em algumas ocasiões, como por exemplo, apresentações e gravações musicais.

Como uma possível solução para esse problema, sugere-se a substituição do atual sistema de climatização por um modelo de refrigeração central com dutos, que possua um dimensionamento adequado e que seja capaz de reduzir as vibrações indesejadas causadas pela dinâmica do fluido.

Outro fator que contribui para o aumento do nível de ruído da sala é o isolamento acústico deficiente. As portas, por exemplo, foram construídas sem nenhum tipo de tratamento acústico e são um ponto bastante vulnerável no isolamento total do ambiente.

Como possíveis medidas de solução desse problema, faz-se necessária a realização de um estudo para avaliação do ruído ambiental existente, bem como do tipo de fonte sonora presente no ambiente, com o objetivo de elaborar um projeto de isolamento acústico que envolva o dimensionamento das portas acústicas e defina o nível de isolamento acústico

necessário para que não haja perturbação da vizinhança ou de outras atividades desenvolvidas na própria EMUFRN.

Com a implementação dessas medidas, espera-se uma redução significativa do ruído de fundo para níveis compatíveis com a curva NR25, aumentando o conforto acústico do ambiente através da otimização da inteligibilidade, e permitindo que os ouvintes possam perceber, com mais qualidade, as variações de dinâmica executadas nas apresentações musicais.

#### 4.3.3 Acústica variável

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 10 e considerando os intervalos recomendados pelos autores na Seção 2.6, os valores do tempo de reverberação por banda de frequência medidos no AOL mostraram-se relativamente baixos para a utilização desse espaço para música não amplificada, e, relativamente altos considerando o uso da fala. Como uma possível solução para esse problema, sugere-se a instalação de dispositivos que proporcionem a utilização da acústica variável no ambiente, visando atender às exigências acústicas para cada tipo de uso.

A acústica variável depende tanto de sistemas eletroacústicos como de elementos físicos ajustáveis e, normalmente, as possibilidades entre os elementos acústicos variáveis físicos são consideradas em primeiro lugar. A partir da equação de Sabine (seção 2.5.2), as duas variáveis que influenciam o tempo de reverberação são o volume interno e a quantidade de material absorvente acústico. Destas, as mudanças no volume são, em princípio, mais atraentes, mas, na prática, muitas vezes são difíceis de incorporar dentro de um auditório em funcionamento. Variando o volume, tem-se a vantagem de variar a absorção acústica sem que haja penalidade em termos de nível de som. Dessa forma, inserir o absorvente acústico é a abordagem mais simples, apesar de ter o efeito adicional de reduzir o nível sonoro da sala (*sound strength*), o que pode ser inaceitável para a configuração de tempo de reverberação mais baixo.

Em pequenas salas, uma cortina retrátil é suficiente para mudar o caráter acústico de maneira perceptível. Em alguns casos, as cortinas colocadas na área do palco podem ser estendidas para reduzir o volume de instrumentos altos posicionados perto das paredes. Mas, para influenciar o tempo de reverberação, a área de absorção ajustável deve ser muito grande, de fato comparável em tamanho ao da área de audiência. Isso torna a absorção variável uma opção progressivamente mais extravagante quanto maior for a sala em questão.

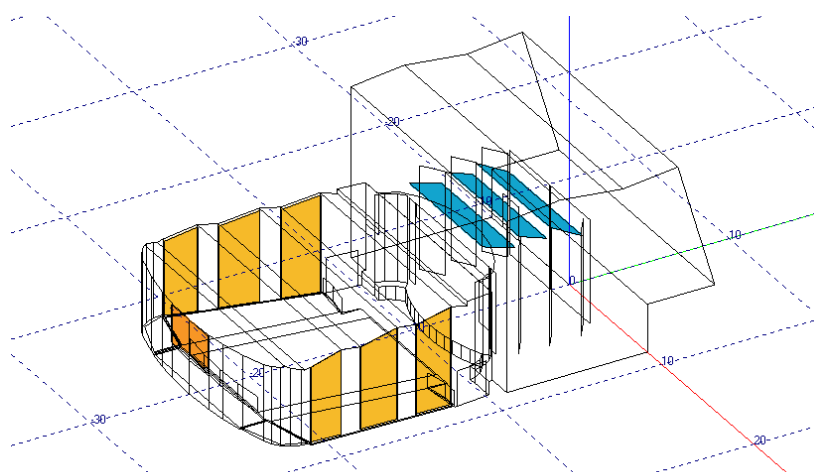
Foram realizadas simulações computacionais para prever o comportamento acústico do Auditório Onofre Lopes em duas situações distintas: na primeira, todos os dispositivos de absorção acústica disponíveis no ambiente foram utilizados, na tentativa de satisfazer as exigências de uso da sala para a fala; e na segunda, todos dispositivos citados anteriormente foram desativados na tentativa de adequar as características acústicas do ambiente para a música não amplificada. Em ambas as situações, superfícies com áreas definidas foram manipuladas com o objetivo de satisfazer às exigências dos dois principais tipos de uso da sala.

#### 4.3.3.1 Utilização do auditório para a fala

Para a primeira simulação, dispositivos móveis com coeficiente de absorção sonora de 50% em todas as bandas de frequência, área total de 82,85 m<sup>2</sup> e identificados pela cor amarela (Figura 57) foram instalados nas paredes laterais e na parede de fundo (acima da porta de entrada do auditório).

Com a adoção dessas medidas, observou-se a redução das reflexões tardias no ambiente e a consequente diminuição do tempo de reverberação da sala, adequando-a às exigências das normas no que diz respeito à inteligibilidade da fala. Um exemplo desses dispositivos são os banners acústicos (Figura 58), comumente utilizados em espaços com múltiplos usos e que necessitam de ajuste nas características acústicas da sala.

Figura 57 – Dispositivos instalados no auditório para adequação do tempo de reverberação, considerando o uso da sala para fala.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 58 – *Banners* acústicos instalados em auditório multiuso.



Fonte: Página da AVNetwork<sup>6</sup>

Com o objetivo de aumentar a energia sonora inicial (*early sound*) recebida nas áreas de audiência, outra medida adotada nessa simulação foi a instalação de superfícies refletoras suspensas sobre a zona de palco identificadas pela cor azul (Figura 57), fabricadas em madeira e com características acústicas similares ao material PLYWD1/2 especificado na Tabela 9.

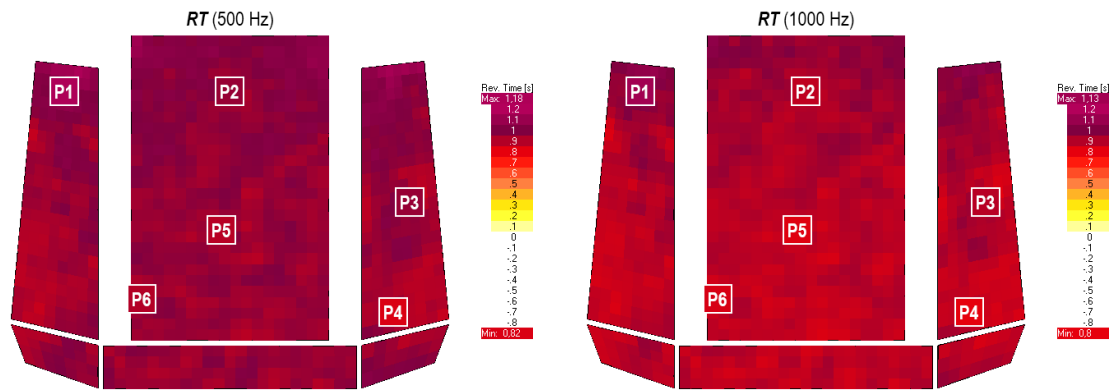
#### ▪ **Análise das características de reverberação (RT)**

A distribuição espacial dos valores assumidos pelo RT está ilustrada na Figura 59 e os valores médios globais desse parâmetro por banda de frequência em todas as posições estão plotados na Tabela 17. Esses mesmos resultados também estão ilustrados no Gráfico 14.

---

<sup>6</sup> Disponível em: <<https://www.avnetwork.com/article.aspx?articleid=117455>> Acesso em jul. 2017.

Figura 59 – Distribuição espacial de RT obtida através de simulação, considerando o uso da sala para fala.



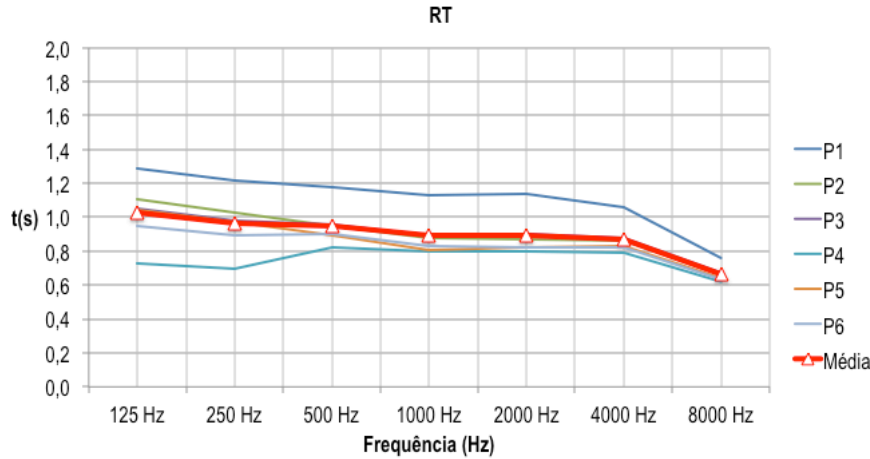
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Tabela 17 – Valores médios globais de RT obtidos através de simulação, considerando o uso da sala para fala.

Ponto de medição	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	RT médio (500 e 1000 Hz)
P1	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0	0,8	1,2
P2	1,1	1,1	1,0	0,9	0,9	0,9	0,7	0,9
P3	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,7	0,9
P4	0,8	0,7	0,9	0,8	0,8	0,8	0,6	0,8
P5	1,1	1,0	0,9	0,8	0,8	0,8	0,6	0,9
P6	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,6	0,9
Média	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,7	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Gráfico 14 – Curvas dos valores médios globais de RT obtidos através de simulação, considerando o uso da sala para fala.

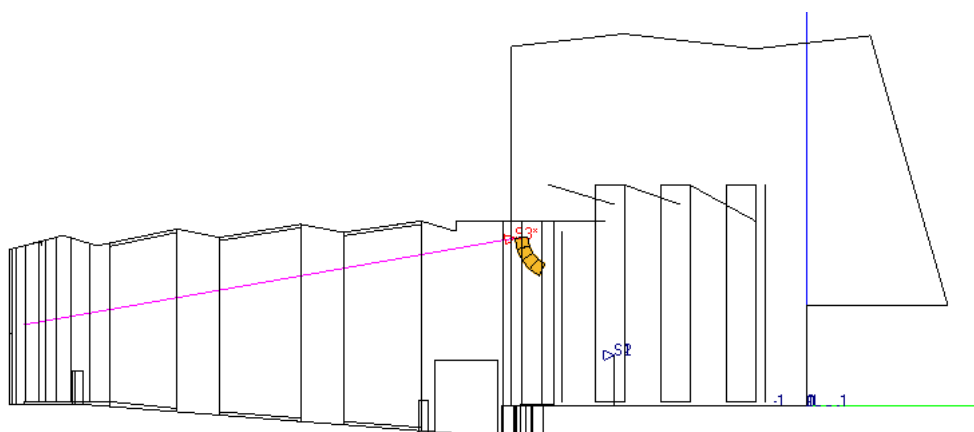


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

### ▪ Análise da inteligibilidade da fala (STI)

Para a análise do grau de inteligibilidade da fala (STI), foi considerada a instalação de um sistema de reforço sonoro, constituído, essencialmente, por um conjunto de caixas compostas por alto-falantes para frequências graves, médias e agudas do tipo *line array*, instalado nas zonas laterais de palco a 5,5 m de altura conforme disposto na Figura 60.

Figura 60 – Corte lateral da sala com a identificação do sistema eletroacústico da série VRX da JBL.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

O modelo de caixa acústica adotada para essa simulação foi o VRX da JBL, o qual possui características acústicas já apresentadas na Figura 50.

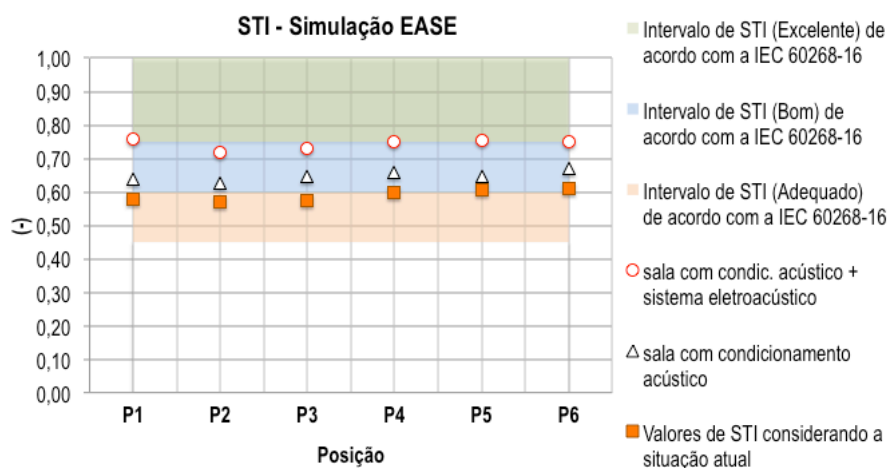
Os valores do parâmetro *Speech Transmission Index (STI)* obtidos nas simulações estão organizados na Tabela 18, o comparativo entre esses resultados estão plotados no Gráfico 15 e a distribuição espacial dos valores assumidos pelo STI estão ilustradas na Figura 61.

Tabela 18 – Valores médios de parâmetro de inteligibilidade (STI) obtidos através de simulação.

	STI (-)		
	Situação atual	Sala com condicionamento acústico	Sala com condicionamento acústico e sistema eletroacústico
P1	0,58	0,64	0,76
P2	0,57	0,63	0,72
P3	0,57	0,65	0,73
P4	0,60	0,66	0,75
P5	0,61	0,65	0,75
P6	0,61	0,67	0,75

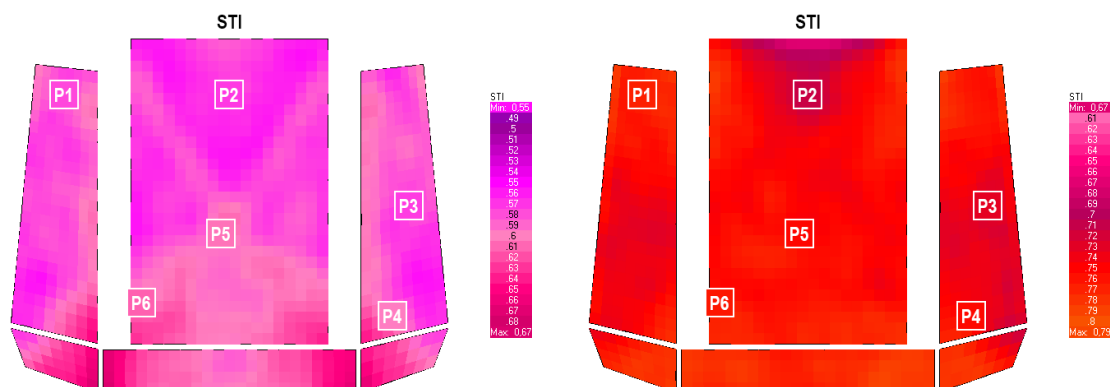
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.



Gráfico 15 – Valores médios de *STI* obtidos através de simulação, considerando o uso da sala para fala.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 61 – Distribuição espacial de *STI* obtida na simulação da situação atual (à esquerda) e após aplicadas as medidas de condicionamento e com a utilização de sistema eletroacústico (à direita).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

De acordo com a situação atual, os resultados obtidos nas simulações realizadas no modelo digital construído do AOL (sem ocupação) apresentaram resultados de *STI* variando entre 0,58 e 0,61, os quais, de acordo com a IEC 60268-16 (2003), são classificados dentro do intervalo considerado *Adequado* nas posições P1, P2 e P3 e *Bom* (apesar de muito próximo do limite inferior) nas posições P4, P5 e P6.

Na simulação com as medidas de condicionamento acústico aplicadas e sem a utilização do sistema eletroacústico, os resultados obtidos na simulação variaram entre 0,63 e 0,67 segundos, os quais, de acordo com a IEC 60268-16 (2003), são classificados dentro do intervalo considerado *Bom* em todas as posições avaliadas.

Quando a avaliação é realizada com as medidas de condicionamento acústico aplicadas e com a utilização do sistema eletroacústico, os resultados obtidos na simulação variam entre 0,72 e 0,76 segundos, os quais, de acordo com a IEC 60268-16 (2003), são classificados dentro do intervalo considerado *Excelente* na maioria as posições avaliadas, exceto nas posições P2 e P3 que são classificadas como *Bom*.

Os resultados do parâmetro STI obtidos nas simulações demonstram um efeito positivo devido à utilização dos dispositivos de absorção acústica instalados nas paredes laterais da sala, bem como em função da instalação do sistema eletroacústico, fornecendo aos ouvintes posicionados nas áreas de audiência mais clareza e definição sonora. Conforme a Tabela 2, o STI de um espaço destinado à fala deve estar acima de 0,6 para uma boa inteligibilidade ou mesmo acima de 0,75 para uma excelente inteligibilidade. Segundo Brandão (2016), valores ótimos de STI fazem com que mesmo as pessoas com dificuldades auditivas possam compreender bem a palavra falada.

#### 4.3.3.2 Utilização do auditório para a música

Conforme os resultados apresentados nas medições e simulações já realizadas no modelo, algumas características acústicas do ambiente precisam ser adequadas ao uso da música, sobretudo em apresentações musicais que necessitam de uma sala com mais vivacidade, como é o caso da música clássica romântica. Assim, para a segunda simulação, as áreas indicadas em amarelo na Figura 57 foram substituídas por superfícies construídas pelo material CONCRET o qual possui coeficiente de absorção já definido na Tabela 9. Com isso, essas superfícies passaram a ser consideradas quase totalmente reflexivas, reduzindo consideravelmente a absorção sonora dessas áreas.

Outra diretriz aplicada ao modelo construído foi a retirada de 89,45 m<sup>2</sup> de cortinas que compunham a coxia do palco, também com o objetivo de reduzir a absorção sonora do ambiente, e consequentemente aumentar o tempo de reverberação da sala.

É importante ressaltar ainda, que, para essa simulação, foram mantidas as superfícies refletoras suspensas acima do palco identificadas na Figura 57 pela cor azul, e que têm o objetivo de aumentar a energia sonora inicial (*early sound*) recebida nas áreas de audiência.

### ▪ Análise das características de reverberação (RT)

Considerando que todas as medidas adotadas foram realizadas na tentativa de adequar o valor do RT às recomendações da literatura no que diz respeito ao uso do espaço para música não amplificada e, considerando que os valores do tempo de reverberação aumentaram consideravelmente em todas as bandas de frequência analisadas, pode-se afirmar que o objetivo de tais medidas foi alcançado.

Os valores médios globais por banda de frequência do parâmetro RT estão plotados na Tabela 19 e ilustrados no Gráfico 16, e a distribuição espacial dos valores médios (500 e 1000 Hz) assumidos por esse parâmetro está ilustrada na Figura 62.

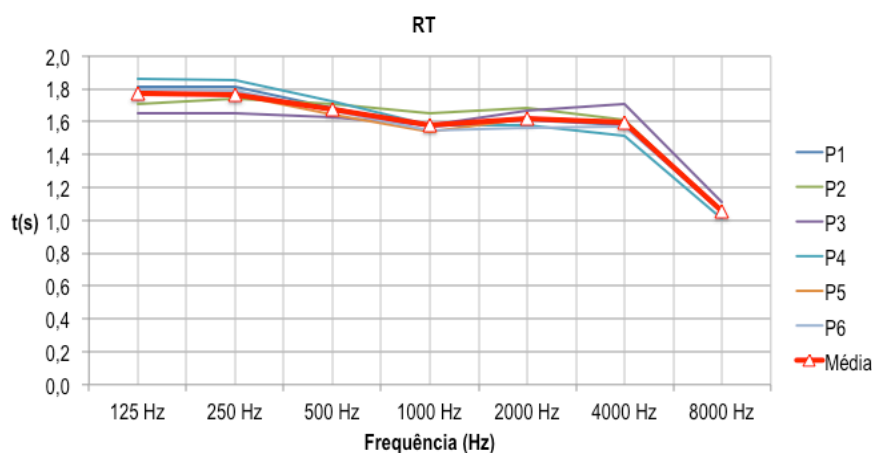
No Gráfico 17 é possível visualizar e comparar os resultados de RT apresentados em cada situação simulada.

Tabela 19 – Valores médios de RT obtidos na simulação, considerando o uso da sala para música.

Ponto de medição	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	RT médio (500 e 1000 Hz)
P1	1,8	1,8	1,7	1,6	1,6	1,6	1,1	1,6
P2	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,1	1,7
P3	1,7	1,7	1,6	1,6	1,7	1,7	1,1	1,6
P4	1,9	1,9	1,7	1,6	1,6	1,5	1,0	1,7
P5	1,8	1,8	1,6	1,5	1,6	1,6	1,1	1,6
P6	1,8	1,8	1,7	1,6	1,6	1,6	1,1	1,6
Média	1,8	1,8	1,7	1,6	1,6	1,6	1,1	

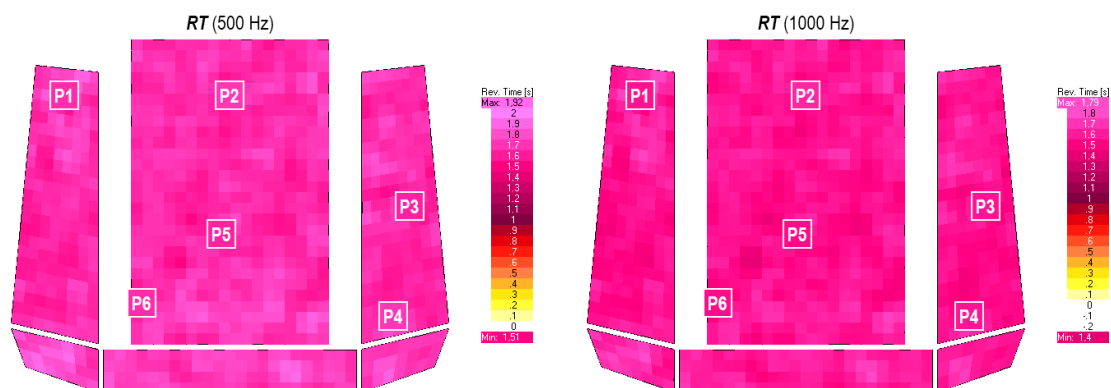
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Gráfico 16 – Curvas dos valores médios globais de RT obtidos através de simulação, considerando o uso da sala para música.



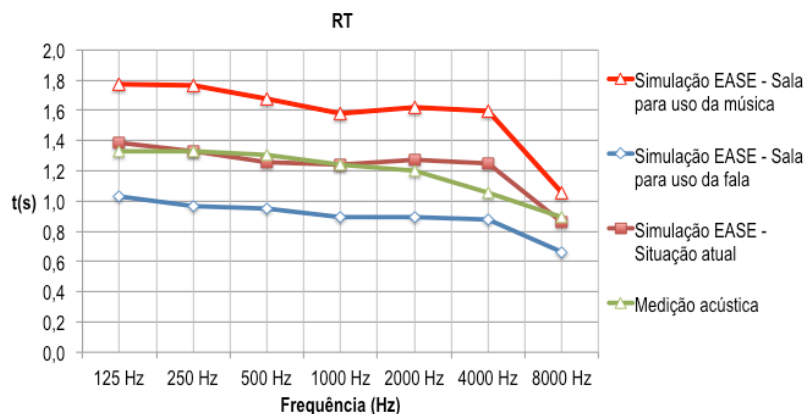
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 62 – Distribuição espacial de RT obtido através de simulação computacional, considerando o uso da sala para música.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Gráfico 17 – Curvas dos valores médios globais de RT obtidos através de medição e simulação, considerando o uso da sala para fala e para música.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

#### ▪ Análise dos parâmetros de clareza e definição (C80, D50 e Ts)

Os valores médios das frequências de 500 e 1000 Hz obtidos nas simulações realizadas no modelo digital construído do AOL (sem ocupação) apresentaram resultados de C80 variando entre +0,1 dB na posição P1 e +2,1 dB nas posições P4 e P5, de D50 variando entre 0,40 na posição P1 e 0,47 nas posições P5 e P6 e de Ts variando entre 110,1 segundos na posição P5 e 123,9 segundos na posição P1 (Tabela 20).

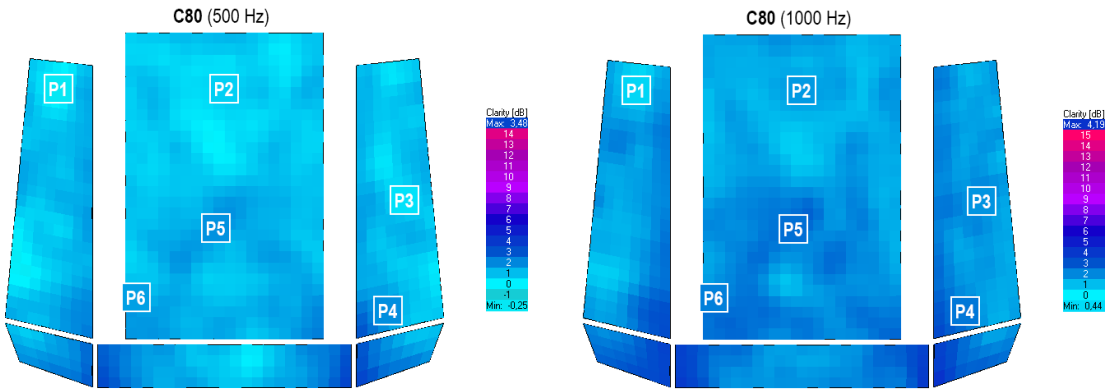
Tabela 20 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) dos parâmetros C80, D50 e Ts obtidos através de simulação.

Ponto de medição	C80 (dB)			D50 (-)			Ts (ms)		
	500 Hz	1000 Hz	Média	500 Hz	1000 Hz	Média	500 Hz	1000 Hz	Média
P1	-0,3	0,5	<b>0,1</b>	0,38	0,42	<b>0,40</b>	129,5	118,3	<b>123,9</b>
P2	0,6	1,7	<b>1,1</b>	0,39	0,46	<b>0,42</b>	125,0	107,9	<b>116,5</b>
P3	0,3	1,8	<b>1,0</b>	0,37	0,44	<b>0,41</b>	132,5	114,0	<b>123,2</b>
P4	1,9	2,3	<b>2,1</b>	0,45	0,47	<b>0,46</b>	122,2	105,0	<b>113,6</b>
P5	1,8	2,5	<b>2,1</b>	0,45	0,49	<b>0,47</b>	115,8	104,3	<b>110,1</b>
P6	1,5	2,1	<b>1,8</b>	0,45	0,49	<b>0,47</b>	120,6	108,9	<b>114,7</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

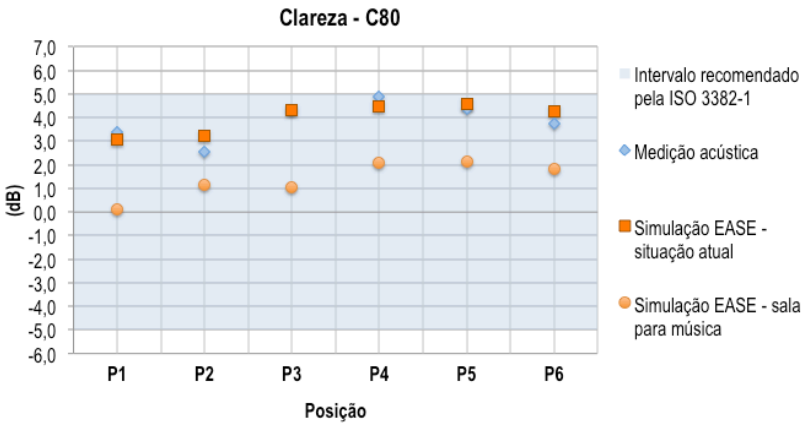
De acordo com a ISO 3382-1 (2009), todos os parâmetros encontram-se dentro do intervalo recomendado pela norma em todas as posições avaliadas. A distribuição espacial dos valores assumidos por esses parâmetros está ilustrada nas Figuras 63, 64 e 65 e os valores médios por banda de frequência (500 Hz e 100 Hz) estão plotados nos Gráficos 18, 19 e 20.

Figura 63 – Distribuição espacial de Clareza (C80) obtida através de simulação, considerando o uso da sala para música.



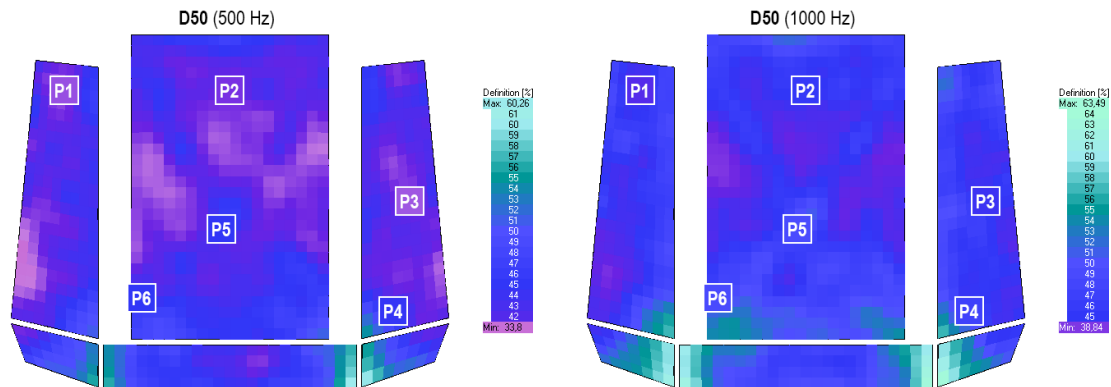
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Gráfico 18 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Clareza (C80) obtidos através de simulação, considerando o uso da sala para música.



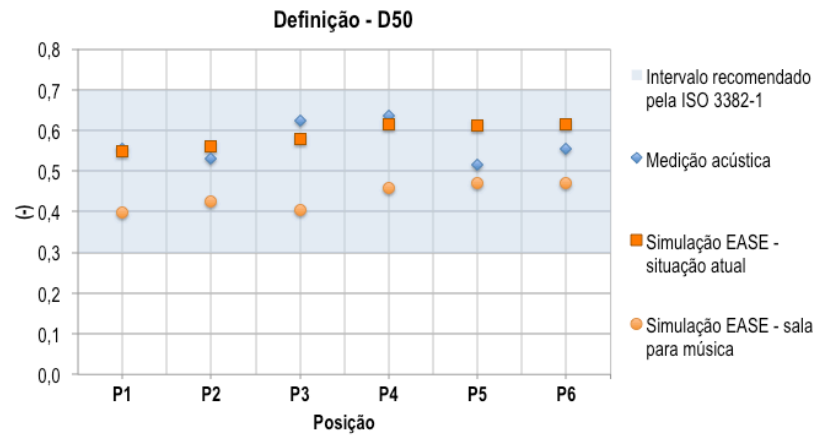
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 64 – Distribuição espacial de Definição (D50) obtida na simulação, considerando o uso da sala para música.



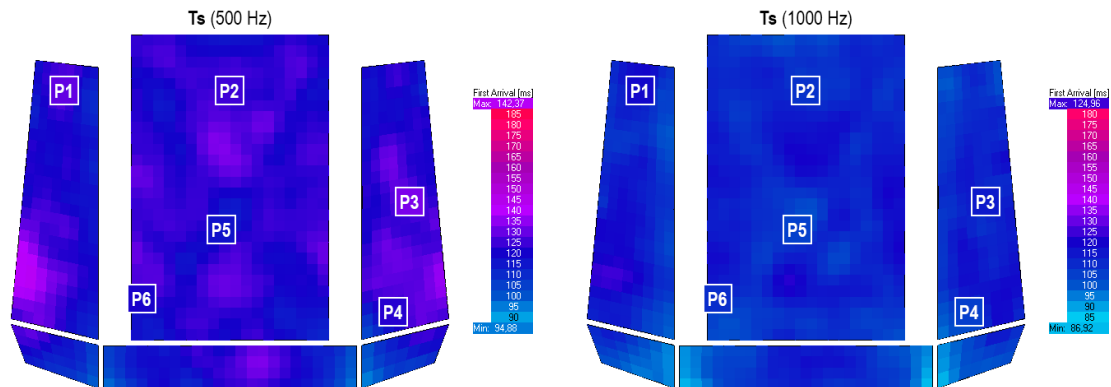
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Gráfico 19 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Definição (D50) obtidos na simulação, considerando o uso da sala para música.



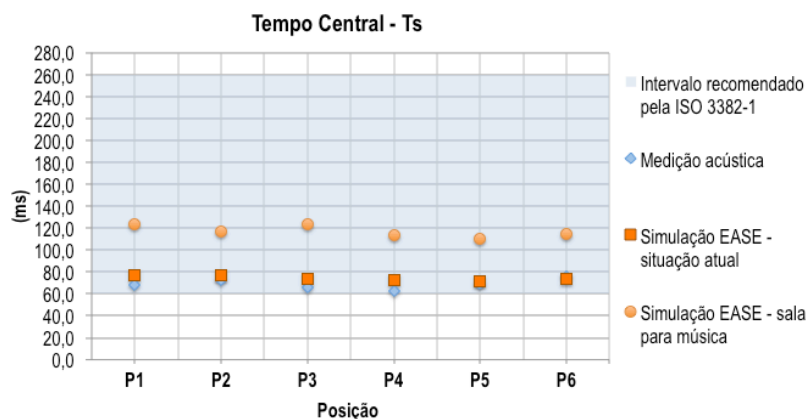
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 65 – Distribuição espacial de Tempo Central (Ts) obtida na simulação, considerando o uso da sala para música.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Gráfico 20 – Valores médios (500 Hz e 1000 Hz) de Tempo Central (Ts) obtidos com simulação, considerando o uso da sala para música.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Com a simulação dessas diretrizes, os novos valores apresentados por esses parâmetros demonstraram que o equilíbrio entre a energia das reflexões primárias e do campo reverberante da sala foi alterado, tornando o Auditório Onofre Lopes um ambiente mais eficiente quando utilizado como um espaço destinado à música.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

Esta pesquisa aprofundou-se no estudo da acústica arquitetônica, com foco na avaliação da qualidade sonora dos ambientes realizada através de medição e simulação computacional de parâmetros objetivos. Dado o conhecimento de acústica de salas, fundamental para criar condições que garantam a melhor propagação possível de uma fonte sonora para um ouvinte situado no ambiente, foi possível verificar os métodos utilizados para essas análises, as normas que regulamentam esses parâmetros acústicos, bem como os estudos acadêmicos que fundamentam as discussões nessa área.

O estudo de caso apresentado sobre as características acústicas do Auditório Onofre Lopes (AOL), localizado na Escola de Música da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (EMUFRN), partiu da hipótese de que as condições acústicas do ambiente não seriam ideais para os tipos de eventos ali realizados, despertando de imediato o interesse na caracterização acústica desse espaço.

Essa hipótese foi comprovada através de medições acústicas, cuja análise foi fundamentada nas características de reverberação e clareza/definição sonora do ambiente. Os resultados das medições e simulações dos parâmetros RT, EDT, C80, D50 e Ts apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12 demonstraram que o auditório possui pouca energia no campo reverberante para ser destinada ao uso da música, e, em excesso, nas condições ideais para o uso da fala.

As simulações realizadas utilizando as diretrizes gerais, as quais consideravam a aplicação de medidas de condicionamento acústico, demonstraram o melhoramento efetivo da qualidade acústica do ambiente, evidenciado através dos resultados dos parâmetros objetivos de caracterização acústica apresentados nas Tabelas 17, 18, 19 e 20.

Em todos os parâmetros simulados no auditório, as diferenças dos valores dos parâmetros objetivos em função da posição do receptor mantiveram-se inferior aos valores de JND, indicando uma boa difusão sonora no ambiente e evitando que essa variação espacial seja perceptível de um assento para o outro.

É importante enfatizar que a elaboração de um projeto acústico para o Auditório Onofre Lopes poderá seguir as linhas de orientação apontadas neste trabalho. No entanto, o dimensionamento adequado de dispositivos acústicos, como por exemplo, sistemas para absorção sonora, superfícies refletoras e sistemas de amplificação eletroacústica, requer um estudo mais aprofundado, no qual diversas soluções técnicas deverão ser analisadas, em relação, principalmente, às diferentes funcionalidades da sala, as quais sinalizam para a



necessidade de considerar a aplicação de sistemas de condicionamento acústico com características variáveis.

Como sugestão para trabalhos futuros, a investigação do fenômeno de espalhamento (*scattering*) pode ser estudado com mais profundidade, diminuindo assim o grau de incerteza referente à determinação dos coeficientes de difusão sonora das superfícies.

Os coeficientes de absorção acústica dos materiais que revestem as superfícies internas da sala podem ser analisados em laboratório, obtendo-se valores mais fiéis à realidade, visto que os métodos de medição utilizando o tubo de impedância e em câmara reverberante apresentam a vantagem de serem matematicamente simples e terem procedimentos normatizados.

A aplicação de outros métodos para a previsão das respostas impulsivas em salas podem ser verificadas, principalmente para baixas frequências, visto que, em diversas situações, o espectro da fonte sonora pode exceder o limite inferior a 125 Hz. Estudos mais extensivos podem ser feitos, com a finalidade de investigar o quanto métodos alternativos podem contribuir para a previsão do campo acústico de salas.

Por fim, é possível realizar um estudo mais aprofundado sobre auralização, utilizando o modelo computacional construído. Isso permitirá que engenheiros e arquitetos, envolvidos na elaboração de projetos acústicos, possam ouvir como soaria uma orquestra na sala, por exemplo, antes mesmo que as modificações sejam realizadas no ambiente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALLOU, G. M. **Handbook for Sound Engineers**. 4th. ed. Burlington: Elsevier Ltd, 2008.
- BARBO, M. N. **Avaliação acústica de um templo católico de grandes dimensões submetido à excitação impulsiva**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2009.
- BARRON, M. **Auditorium Acoustics and Architectural Design**. New York: Spon Press and Taylor & Francis, 2009.
- BAUMANN, D. **Music and Space: A systematic and historical investigation into the impact of architectural acoustics on performance practice followed by a study of Handel's Messiah**. Bern: Peter Lang AG, International Academic Publishers, 2011.
- BERANEK, L. L. **Acoustics**. 2nd. ed. New York: McGraw-Hill, Inc, 1954.
- BERANEK, L. L. et al. Concert Hall Acoustics. **Journal of The Acoustic Society America**, v. 92, n. July, 1992.
- BERANEK, L. L. **Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics and Architecture**. 1st. ed. New York: John Wiley & Sons, 1962.
- BERANEK, L. L. **Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics and Architecture**. 2nd. ed. New York: Springer-Verlag, 2004.
- BIES, D. A.; HANSEN, C. H. **Engineering Noise Control: Theory and practice**. 4th. ed. New York: Spon Press, 2009.
- BISTAFA, Sylvio R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2011.
- BORK, I. A Comparison of Room Simulation Software - The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. **Acustica united with Acta Acustica**. v. 86, p. 943 – 956, 2000.
- BRANDÃO, Eric. **Acústica de salas: projeto e modelagem**. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2016.
- BRÜEL & KJÆR. **DIRAC Room Acoustics Software Type 7841 Manual**. Denmark, 2013.
- CARVALHO, M. A. C. **Caracterização da qualidade acústica da Catedral Metropolitana de Campinas-Brasil**. [s.l.] Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- DOELLE, Leslie. **Environmental Acoustics**. 1st ed. New York. McGraw-Hill Book Company, 1972.
- EVEREST, F. A.; SHAW, N. A. **Master Handbook of Acoustics**. 5th. ed. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc, 2001.
- FIGUEIREDO, F. LEÃO. **Parâmetros acústicos subjetivos: Critérios para avaliação da qualidade acústica de salas de música**. [s.l.] Universidade de São Paulo - USP, 2005.
- FUCHS, H. **Applied acoustics: Concepts, absorbers, and silencers for acoustical comfort and noise control: Alternative solutions - Innovative tools - Practical examples**. [s.l: s.n.]. v. 9783642293
- FUCHS, H. V.; MÖSER, M. **Handbook of Engineering Acoustics**. New York: Springer-Verlag, 2013.

GOMES, M. H. DA A. **Obtenção de parâmetros para a avaliação da qualidade acústica de salas através da técnica MLS e acústica de raios.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 1998.

GUIDORZI, P., BARBARESI, L., D’ORAZIO, D., GARAI, M. Impulse responses measured with MLS or Swept-Sine signals applied to architectural acoustics: an in-depth analysis of the two methods and some case studies of measurements inside theaters. **Energy Procedia**. v. 78, p. 1611 – 1616, 2015.

INTERNACIONAL ELETROTECHINICAL COMMISSION (IEC). **IEC 60268-16: Sound system equipment – Part 16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index.** 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3382-1 Acoustics - Measurement of room acoustic parameters Part 1: Performance spaces.** 2009.

KNUDSEN, V. O.; HARRIS, C. **Acoustical Designing in Architecture.** 1st ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1950.

KROKSTAD, A.; STRØM, S. e SØRSDAL, S. Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. **J. Sound and Vibration**, v. 8, p. 118 – 125, 1968.

KUTTRUFF, H. **Room acoustics.** 5th. ed. Abingdon: Spon Press and Taylor & Francis, 2009.

LONG, M. **Architectural Acoustics.** Cambridge: Elsevier Academic Press, 2006.

MAK, C.M., WANG, Z. Recent advances in building acoustics: An overview of prediction methods and their applications. **Building and Environment**. v. 91, p. 118 – 126, 2015.

OPPENHEIM, A. V. et al. **Signals and Systems.** 2nd. ed. New York: Prentice-Hall, Inc., 1998.

PEREIRA, R. N. **Caracterização Acústica de Salas.** [s.l.] Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

RAICHEL, D. R.; HANSEN, U. J. **The Science and Applications of Acoustics.** 2nd. ed. New York: Springer Science+Business Media, 2003.

ROSSING, T. D. **Springer Handbook of Acoustics.** New York: Springer Science, 2007.

SABINE, W. C. Colleted Papers on Acoustics. 1922.

SAKUMA, T.; SAKAMOTO, S.; OTSURU, T. **Computational Simulation in Architectural and Environmental Acoustics.** Tokyo: Springer Japan, 2014.

SETO, W. W. **Theory and Problems of Acoustic.** New York: McGraw-Hill, Inc, 1971.

VIGRAN, T. E. **Building Acoustics.** New York: Taylor & Francis, 2008.

VORLÄNDER, M. **Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality.** 1st. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

VORLÄNDER, M. Computer simulations in room acoustics: concepts and uncertainties. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 133, p. 1203–1213, 2013.