Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Denilson Riccelli Del-Teto Ramos

ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO PARA BIBLIOTECA DE PLANTA LIVRE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ACÚSTICA.

Belém – PA
2018

Denilson Riccelli Del-Teto Ramos

ANÁLISE DE DESEMPENHO ACÚSTICO PARA BIBLIOTECAS DE PLANTA LIVRE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ACÚSTICA.

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.
Área de Concentração: Análise e Concepção do Espaço Construído na Amazônia.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo.

Belém – PA
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R175 Ramos, Denilson Riccelli
Análise de desempenho acústico para bibliotecas de planta livre através de simulação computacional acústica / Denilson Riccelli Ramos. — 2018
116 f. : il. color

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPGAU), Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Gustavo Melo
Coorientação: Profa. Dra. Elcione Moraes.

1. Ambientes Abertos. 2. Bibliotecas. 3. Simulação Acústica. 4. Condições Acústicas. 5. ODEON Acoustics. I. Melo, Gustavo, *orient.* II. Título

CDD 729.29

Denilson Riccelli Del-Teto Ramos

ANÁLISE DO DESEMPENHO ACÚSTICO PARA BIBLIOTECAS DE PLANTA LIVRE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ACÚSTICA.

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do Título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Pará.

APROVADO EM: 11/05/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo – Orientador
Doutor pela Universidade Federal Santa Catarina, Brasil
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Márcio Santos Barata – PPGAU/UFPA
Doutor pela Universidade Federal do Pará, Brasil
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Alexandre Luiz Amarante Mesquita – PPGEM/UFPA
Doutor pela Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Pará

Prof.ª Dr.ª Elcione Maria Lobato de Moraes – FAU/UFPA
Doutora em Arquitetura pela Universidade Politécnica de Madri, Espanha
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal do Pará

Belém – PA

Maio de 2018

Aos meus familiares

Penha, Herberth, Dilmo, Denize e João Ricardo.

“If you want to find the secrets of
the Universe, think in terms of energy, frequency and vibration.”
Nikola Tesla

AGRADECIMENTOS

Fazer agradecimentos é complicado e um tanto quanto injusto ainda mais nesse último momento quando me debruço sobre a escrita e normalmente me esqueço do mundo, fechado em meu egoísmo, e os nomes que vem à mente são aqueles que estão mais próximos durante a conclusão dessa etapa.

Primeiramente agradeço à Deus, por me conceder equilíbrio e força, durantes as dificuldades e momentos de desespero, me guiando e me fortalecendo para perseverar no caminho.

À minha família, que por mais ausente que eu estivesse em algum momento, sempre acreditaram no meu sonho, e por incentivarem a busca pelo conhecimento e por permitirem que meus estudos fossem realizados.

Agradeço imensamente meu orientador Dr. Gustavo Melo, que vem acompanhando minha jornada desde parte da graduação, quando fui convidado para ser seu bolsista, até hoje, sempre acreditando, se preocupando, aconselhando e me incentivando nos momentos mais difíceis dessa jornada.

Aos integrantes do Grupo de Vibrações e Acústica (GVA) agradeço pelas contribuições a esta dissertação, seja nas discussões em laboratório ou no apoio durante etapas experimentais. Em especial ao Jeferson Bezerra, Gerardo Braga, Thiago Lobato e Amanda Mendes.

À minha amiga de longas datas, Dra. Elcione Moraes, que incentivou meus passos iniciais nessa jornada. Agradeço ainda ao apoio e por sempre ajudar colocando à disposição os bolsistas do LAAC – FAU, para me ajudar em etapas experimentais.

À minha amiga de trabalho e namorada, Lilian Kobayashi, que sem ajuda e disponibilidade, parte do trabalho em etapas experimentais teriam sido difíceis de contornar. Agradeço ainda por todo carinho e compreensão durante os momentos onde me fiz ausente.

Aos meus amigos, Dorival, Brena, Edson, Marco, Laerte e todos os outros que cometo a injustiça de não citar, mas que me apoiaram e se mostraram parte importante dessa conquista se fazendo presentes nas minhas ausências.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido para o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão desta etapa da minha jornada.

RESUMO

As condições acústicas são essências para edifícios enquanto esses forem projetados para o desenvolvimento de atividades humanas, garantindo o desempenho requerido para cada função e preservando condições físicas e psicológicas. Nesse contexto, a biblioteca moderna, apresenta-se como amplo espaço aberto, demandando alta acurácia das condições acústicas, frente aos novos usos agregados a sua função tradicional, pesquisa e estudo. Dada as novas demandas e ao avanço das pesquisas em acústica arquitetônica, investiga-se a relação direta dos elementos arquitetônicos, a nível micro e macro e a resposta acústica de salas. O presente trabalho tem por objetivo avaliar as principais formações acústicas da sala e como essas são diretamente influenciadas por elementos arquitetônicos, através de novas proposições de organização espacial, empregando o software de simulação acústica de salas ODEON *Acoustics* para investigar os parâmetros acústicos como tempo de reverberação, tempo de decaimento inicial, definição e índice de Transmissibilidade da fala. O modelo geométrico computacional foi calibrado através dos parâmetros T_{30}, EDT, D_{50}, obtidos em ensaio experimental para caracterização acústica do Salão Central da Biblioteca Central, Prof. Dr. Clodoaldo Fernando Ribeiro Beckmann, através da normativa nacional NBR 10.152 e ISO 3382:2. Calibrado o modelo computacional base, verificado sua aproximação a sala real foram propostos quatro modelos de reorganização espacial. Os resultados das novas proposições influenciaram diretamente sobre a resposta acústica da sala, garantindo melhorias acústica da mesma ao longo de toda sala. Por fim um modelo ideal de organização espacial é proposto.

Palavras-chaves: Ambientes Abertos; Bibliotecas; Simulação Acústica; Condições Acústicas, ODEON *Acoustics*.

ABSTRACT

The Acoustical conditions are essential to buildings while these are designed to development to human's activities, ensuring the performance necessary for every function and preserving the physical and psychological conditions. In this context, the modern library, has been shown as a large open plan space, required high accuracy of acoustical conditions, beside the new aggregate uses in its traditional function, research and study. Given the new demand and the progress in architectural acoustics research, investigates the straight relation between architectural elements, in micro and macro levels, and the acoustic response of rooms. This research has as objective to evaluate the acoustical parameters in rooms and verify how they are related to architectural elements, through the investigation of new spatial propositions, using the acoustical simulations software, ODEON Acoustics, to investigate parameters as reverberation time, early decay time, definition and speech transmission index. The virtual model had calibrated through the parameters T_{30}, EDT and D_{50}, these are obtained in experiments for acoustical characterization of Central room, in Central Library, Prof. Dr. Cloadoaldo Fernando Ribeiro Beckmann, based in national regulations NBR 10.152 and ISO 3382:2. Calibrated the base computational model and verified the approximation between the real room, it was proposed four new models using different spatial organizations. The results obtained for new propositions shows the influence of architecture elements in acoustical response of rooms, guarantee the better acoustics conditions in all the library room. Lastly an ideal model was suggested.

Key Word: Open-Plan; Libraries; Acoustical Simulation; Acoustical Conditions; ODEON Acoustics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Definição de tempo de reverberação.....23

Figura 2.2: Definição de Intervalo inicial de tempo de atraso.....24

Figura 2.3: Comparação entre valores de STI e AI.....25

Figura 2.4: Comparação entre valores de D_{50} e SI.....27

Figura 2.5: Modelo de biblioteca proposto por Étienne-Louis Boullée, por volta de 1780.....30

Figura 2.6: Planta da Biblioteca Pública do Brooklyn, proposto por Carnegie, por volta de 1905.....30

Figura 3.1: Localização do Objeto de estudo.....38

Figura 3.2: Vista Externa da Biblioteca Central.....39

Figura 3.3: Interior da Biblioteca Central; a) Salão principal; (b) Mezanino; (c) Salão secundário.....40

Figura 3.4: Diagrama para sistema de medição para análise da Resposta Impulsiva.....41

Figura 3.5: Placa de Audio, M-Audio Fast Track Pro.....42

Figura 3.6: Fonte dodecaédrica B&K, modelo 4296.....43

Figura 3.7: Microfone de campo difuso: *Brüel & Kjäer*, tipo 4189.....43

Figura 3.8: Posicionamento de fonte (vermelho) e receptor (azul) para medições em campo.....45

Figura 3.9: Procedimento modelagem computacional.....46

Figura 3.10: Salão de leitura: a) Real; b) Modelo computacional.....47

Figura 4.1: Níveis de pressão sonora contínuos equivalentes, em bandas de 1/1 oitava, medidos para cada receptor R_n ($L_{eq, T, fHz(1/1), X}$).....50

Figura 4.2: Níveis de Pressão Sonora equivalente, máximo e mínimo em Ponderação A, por receptor (R_n), para as zonas encontras, no intervalo de 30 segundos.....51

Figura 4.3: Curva de Avaliação de Ruído (NC), para o objeto de estudo.....51

Figura 4.4: Tempo de Reverberação (T_{20}) considerando as características espaciais encontradas por zonas.....52

Figura 4.5: Tempo de Decaimento Sonoro, para cada receptor (R_n).....52

Figura 4.6: Médias dos valores de Definição (D_{50}), para os receptores (Rn).Figura 7: Médias dos valores de Definição (D_{50}), para os receptores (Rn) 53

Figura 4.7: Modelo geométrico importado para o software ODEON Acoustics.....54

Figura 4.8: Modelo Geométrico, com posicionamento de receptores (R_n) e fontes (S_n) 55

Figura 4.9: Coeficiente de Absorção (α) para superfícies de acervo de livros, segundo a literatura
consultada.....57

Figura 4.10: Analise Numérica para tempo de reverberação da sala analisada, considerando as equações de Sabine, Eyring e Arau-Pauchades.....59

Figura 4.11: Gráficos de T_{20} nas frequências de 125 Hz a 4000 Hz, para as zonas Z1(a), Z2(b) e Z3(c).....60

Figura 4.12: Média totais dos valores de EDT (a) e D_{50} (b) comparados a suas respectivas analises experimentais, nas frequências de 125 Hz a 4000Hz.....61

Figura 4.13: Plantas baixas das configurações de planta baixa propostas, considerando novas configurações de layout, M_0 (a), M_1 (b), M_2 (c), M_3 (d), M_4 (e).....63

Figura 4.14: Modelo virtual para a configuração M_1.....65

Figura 4.15: Modelo virtual para a configuração M_2.....66

Figura 4.16: Modelo virtual para a configuração M_3.....66

Figura 4.17: Modelo virtual para a configuração M_4.....67

Figura 4.18: Gráfico para valores de TR considerando equações de Sabine e Eyring para os modelos propostos.....67

Figura 4.19: Gráfico para valores de T_{30}, considerando medias dos valores obtidos para cada um dos modelos simulados.....68

Figura 4.20: Gráfico para valores de T_{30}, considerando medias totais por receptor, para cada um dos modelos simulados.....69

Figura 4.21: Gráfico para valores de T_{30}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_0, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).....72

Figura 4.22: Gráfico para valores de T_{30}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_1, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).....73

Figura 4.23: Gráfico para valores de T_{30}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_2, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).....73

Figura 4.24: Gráfico para valores de T_{30}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_3, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).....74

Figura 4.25: Gráfico para valores de T_{30}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_4, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).....74

Figura 4.26: Gráfico para valores de EDT, considerando medias dos valores obtidos para cada um dos modelos simulados.....75

Figura 4.27: Gráfico para valores de EDT, para as zonas Z1(a), Z2(b) e Z3(c), considerando medias totais por receptor, para cada um dos modelos simulados.....77

Figura 4.28: Gráfico para valores de EDT, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_0, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).....79

Figura 4.29: Gráfico para valores de EDT, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_1, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).....79

Figura 4.30: Gráfico para valores de EDT, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_2, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).....80

Figura 4.31: Gráfico para valores de EDT, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_3, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).....80

Figura 4.32: Gráfico para valores de EDT, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_4, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).....81

Figura 4.33: Gráfico para valores de D_{50}, considerando medias dos valores obtidos para cada um dos modelos simulados, para frequências de 125Hz a 4000Hz.....82

Figura 4.34: Gráfico para dos valores médios de 500Hz a 1kHz, para D_{50}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_0.....84

Figura 4.35: Gráfico para dos valores médios de 500Hz a 1kHz, para D_{50}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_1.....84

Figura 4.36: Gráfico para dos valores médios de 500Hz a 1kHz, para D_{50}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_2.....85

Figura 4.37: Gráfico para dos valores médios de 500Hz a 1kHz, para D_{50}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_3.....85

Figura 4.38: Gráfico para dos valores médios de 500Hz a 1kHz, para D_{50}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_4.....86

Figura 4.39: Gráfico para dos valores de STI, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_0..... 87

Figura 4.40: Gráfico para dos valores de STI, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_1.....88

Figura 4.41: Gráfico para dos valores de STI, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_2.....88

Figura 4.42: Gráfico para dos valores de STI, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_3.....89

Figura 4.43: Gráfico para dos valores de STI, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_4.....89

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Índices de inteligibilidade e privacidade da fala.....26

Tabela 2.2: Grandezas acústicas agrupadas de acordo com aspectos subjetivos dos ouvintes.....27

Tabela 2.3: Níveis de Pressão Sonora recomendados pela NBR 10152/2017.....35

Tabela 4.1: Características geométricas do modelo virtual.....54

Tabela 4.2: Fontes e Receptores, para cada zona encontrada.....55

Tabela 4.3: Coeficiente de Absorção Sonora e Espalhamento dos materiais dos sistemas construtivos e de revestimento.....56

Tabela 4.4: Coeficiente de Absorção Sonora e Espalhamento para as demais superfícies observadas.....58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AI Índice de Articulação (*Articulation Index*)

BC-UFPA Biblioteca Central da Universidade Federal do Pará

dB Decibel

D_{50} Definição

EDT Tempo Inicial de decaimento (*eatly decay time*)

ITDG Intervalo de atraso inicial (*Initial time delay gap*)

ISO Organização Internacional para Padronização (*International Organization for standardization*)

IEC *International Electrotechnical Commission*

JND Mínima Diferença Perceptível Limiar Diferencial (*Just Noticeable Difference*)

L Nível de Pressão Sonora

$L_{Aeq,\ T/X}$ Nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderada em A integrado durante um tempo T no ponto X

L_{Aeq} Nível de pressão sonora equivalente ponderada em A, representativo de um ambiente

L_{ASmax} Nível máximo de pressão sonora representativo de um ambiente

$L_{eq,T,fHz(1/1),X}$ Níveis de pressão sonora contínuos equivalentes, em bandas de 1/1 de oitava, medidos no ponto X

$L_{eq,fHz(1/1)}$ Níveis de pressão sonora equivalentes, em bandas de oitavas, representativos de um ambiente

NBR Normas Brasileiras

NC critério de ruído (*Noise Criteria*)

NPS Nível de Pressão Sonora

STI Índice de transmissibilidade da fala (*Speech transmission Index*)

SIBI Sistema Integrado de Bibliotecas

T Tempo de Reverberação (*Reverberation Time*)

T_{20} Tempo de Reverberação para um decaimento de 20dB

T_{30} Tempo de Reverberação para um decaimento de 30dB

T_{60} Tempo de Reverberação para um decaimento de 60dB

UFPA Universidade Federal do Pará

α Coeficiente de absorção

δc Fator de Espalhamento

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 18

1.1. INTRODUÇÃO 18

1.2. JUSTIFICATIVA 19

1.3. OBJETIVOS 21

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22

2.1. PARÂMETROS PARA A DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE ACÚSTICA DE SALAS 22

2.1.1. Tempo de Reverberação, T 22

2.1.2. Tempo Inicial de Decaimento, EDT 24

2.1.3. Índice de Transmissibilidade da Fala, STI 25

2.1.4. Definição, D 26

2.1.5. Mínima Diferença Perceptível, JND 27

2.1.6. Níveis de Pressão Sonora, L 28

2.2. BIBLIOTECA, DEFINIÇÃO E HISTÓRICO 29

2.3. O SOM EM AMBIENTES DE PLANTA LIVRE E BIBLIOTECAS 32

2.4. O EFEITO DOS PARÂMETROS ARQUITETÔNICOS NA ACÚSTICA 36

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA 38

3.1. LEVANTAMENTO ARQUITETÔNICO DO OBJETO DE ESTUDO 38

3.2. ANÁLISE ACÚSTICA EXPERIMENTAL DO OBJETO DE ESTUDO 40

3.2.1. Instrumentação 41

3.2.2. Estratégias de medições 43

3.3. SIMULAÇÃO ACÚSTICA 46

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E ANÁLISES 49

4.1. CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO ESTUDO DE CASO 49

4.2. MODELAGEM VIRTUAL E O DESIGN DAS CONDIÇÕES ACÚSTICAS DA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFPA 53

4.2.1. Informações do modelo virtual 53

4.2.2. Posição de fontes e receptores 55

4.2.3. Materiais – Absorção e Fator de Espalhamento 56

4.2.4. Calibração acústica do modelo base 59

4.3. O IMPACTO DE DECISÕES DE *DESIGN* SOBRE PARÂMETROS DE CONFORTO ACÚSTICO 62
4.3.1. Apresentação das configurações de reorganização espacial 62
4.3.2. Análise das configurações propostas 68
4.3.2.1 Tempo de Reverberação, T 68
4.3.2.2 Tempo de Decaimento Inicial, EDT 75
4.3.2.3 Definição, D_{50} 81
4.3.2.4 Índice de Transmissibilidade da Fala, STI 86
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 90
5.1. CONCLUSÕES 90
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS 92
REFERÊNCIAS 94
APÊNDICE A - MAPEAMENTO ACÚSTICO 101

CAPÍTULO 1

1.1. INTRODUÇÃO

Condições acústicas são essenciais às proposições eficazes em arquitetura, logo, a fim de tornar edifícios mais confortáveis, considera-se primordial atender as necessidades humanas, sejam elas, físicas e psicológicas. Assim, objetiva-se alcançar o desempenho requerido por suas funções conforme as recomendações normativas e literária. Portanto, espaços devem ser providos de condições adequadas de conforto para o devido desenvolvimento de atividades físicas e cerebrais dado seus usos, buscando o equilíbrio entre as variáveis que abrangem o conforto ambiental, de modo a evitar a sobreposição de determinadas estratégias em detrimento de outras.

Nesse sentido, diferentes são os fatores norteadores do projeto arquitetônico, tornando-o um campo de atividade multidisciplinar. Os parâmetros ambientais são condicionantes da arquitetura, desde a elaboração do projeto até a execução do mesmo, faz-se responsabilidade do arquiteto compreender o programa de necessidades, possibilitando vínculos e relações entre os diversos elementos que compõem o objeto arquitetônico, garantindo uma organização lógica e funcional para o edifício, e dominar os principais fundamentos pertinentes ao conforto ambiental e, no objeto de interesse, a acústica arquitetônica.

Sendo considerada uma das ciências mais amplas das categorias dos fenômenos, mecanismos, quantidades ou unidades relacionadas ao estudo do som, a Acústica, estuda o comportamento de ondas sonoras e os fenômenos físicos relacionados (BERANEK, 1993). Neste âmbito, como parte de análise do objeto construído, a Acústica Arquitetônica, um importante campo do conhecimento, é um esforço tridimensional, onde o som se propaga conforme as características físicas do recinto. Esta considera ainda três dimensões fundamentais, audibilidade, frequência e tempo, que devem ser analisadas simultaneamente (ERMANN, 2015).

Para Egan (1988), a necessidade de formação técnica básica em Acústica Arquitetônica, é tão importante quanto outras disciplinas relacionadas às variáveis ambientais, esta não deve estar restrita apenas para projetos de salas de concertos ou estúdios de música, necessária enquanto os edifícios forem projetados para serem habitados. Assim, este o estudo deve ser considerado parte importante do projeto arquitetônico, em especial para aqueles que demandem atividades humanas afetadas diretamente pelos sons e suas fontes, um ato de arquitetura como de física, no que tange o desempenho do recinto para o desenvolvimento de atividades humanas.

O consenso recorrente de que a acústica arquitetônica destina-se a programas arquitetônicos de alta acurácia tais como, teatros, cinemas e auditórios, etc., não se restringe, mas encontra-se existente na própria atividade profissional, ao desconsiderar parâmetros fundamentais, como, a influência dos sons do entorno, locação, a tipologia do objeto arquitetônico, o volume, a forma, o tamanho, planejamento e distribuição dos espaços no interior do edifício, o revestimento de superfícies, e outros, tem fundamental importância para a acústica do mesmo (EGAN, 1988). Estas podem corroborar para o aumento de problemas acústicos básicos, os quais comprometerão posteriormente o desempenho humano em desenvolver atividades que exigem alta capacidade de concentração, como a pesquisa e a leitura, essas as principais atividades desenvolvidas em bibliotecas (KANG, 2004).

Logo, demandam estratégias e soluções, que se investigadas podem ser aplicadas diretamente às etapas projetuais, a fim de minimizar o problema do ruído, sejam de ordem externas e internas ou pela transmissão estrutural, possibilitando melhores índices de produtividade, e garantindo a maior concentração por partes dos usuários, preservando assim a qualidade acústica do local (MEISSNER, 2008; SYKES, 2004).

Bibliotecas públicas, como espaços públicos fechados, muito mais do que meras coleções de livros, e espaços de estudo e pesquisa, são importantes componentes de espaços públicos urbanos, desenvolvem uma importante função em bairros, cidades colégios e universidades, como porta de acesso local ao conhecimento, fornecendo condições básicas para um aprendizado continuo, tomada de decisão independente e para o desenvolvimento cultural dos indivíduos e dos grupos sociais, também tem se apresentado como espaço de trabalho transitório (MARKHAM, 2004; MARINO, 2015; UNESCO, 2014).

Markham (2004) destaca para edifícios destinados a função de biblioteca, a necessidade de grandes espaços abertos onde os usuários possam circular, ler, estudar ou simplesmente relaxar, e muitas vezes esses espaços são integrados às áreas de acervo, ou em outras tipologias, separadas. Designada para uma variedade de serviços, a necessidade de conforto acústico tornou-se primordial, mesmo quando essas não são de acesso livre ao usuário, mas compostas por maquinários ruidosos, portanto, cada uma dessas tipologias tem requisitos únicos necessários a serem investigados a fim de promover o conforto acústico.

1.2. JUSTIFICATIVA

Associadas historicamente a ambiente de ordem e silêncio, o *design* das bibliotecas modernas é radicalmente diferente do proposto no passado, agora tais ambientes passam a

serem abertos, tornando-se amplos espaços de convivência comunitária, comum para todas as idades. Estes, de uso público, têm sido desenvolvidos para incluir áreas dedicadas para crianças, adolescentes, estudos colaborativos, acesso à internet, salas multiuso, galerias de exibição, e ainda ambientes destinados a estudo e concentração (MATTERN, 2007; SWALLOW, 2015). Os desafios arquitetônicos envolvidos, são, no entanto, relativamente comuns: atenção as adjacências, o uso mais eficaz do espaço, sendo projetados para suportar fluxos de trabalhos eficientes, ambientes abertos e robustas capacidades de telecomunicação, tornando as operações nelas desempenhadas mais convenientes e eficientes para leitores e funcionários igualmente (BENNETT, 2003).

O resultado das mais variadas atividades dentro do mesmo ambiente, é um misto de graves problemas acústicos, entre eles, Jungsoo Kim (2013) descreve o incremento dos níveis de ruído. Tais instalações, a fim de lidar com as necessidades dos usuários, acabam aumentando os níveis de ruído, ocasionando graves problemas acústicos, especialmente nos ambientes destinados a estudo e salas de leituras (FRANK; ASHER, 2014).

Para bibliotecas, tanto as fontes de ruído externo quanto o interno contribuem para as condições acústicas, sendo para o ruído externo, o trafego, e para ruído interno, vozes de crianças e adolescentes, grupos de discussão, espaços casuais, ruído do piso e maquinário existente, os principais fatores causadores de desconforto. Outro problema agravante é a não atenuação dos sons pelo ambiente, normalmente grandes espaços, por vezes conectados, com baixa absorção sonora, e inúmeras superfícies refletoras, com fechamentos externos de vidro e poucas paredes divisórias (SWALLOW, 2015). Entretanto tais soluções projetuais acabam tendo um custo alto sobre a qualidade da envoltória, que segundo Jungsoo Kim (2013), a distração por ruído e perda da privacidade foram identificados como as principais causas de insatisfação em ambientes de trabalhos abertos.

Como pode ser observada, a variedade de atividades e serviços realizados no interior desses espaços, passam a demandar uma exigência maior no campo da arquitetura e da acústica. Tal integração, a Acústica Arquitetônica, visa a possibilidade de aproveitar melhor os ambientes para um objeto que relacione ambas as disciplinas.

Frente a literatura apresentada para o problema acústico de bibliotecas e as pesquisas recentes destinadas a ambientes internos e salas de planta livre, este estudo busca caracterizar os parâmetros acústicos relacionados a esse tipo de uso, e sua relação com elementos arquitetônicos, tal qual, organização espacial de mobiliário e estações de trabalho, densidade de ocupação do espaço e volume do acervo, e como estes podem influenciar diretamente sobre

as características acústicas, visto que para essa proposição estes encontram como parte integrante do todo.

Assim, nesta dissertação, foca-se em ilustrar os efeitos das decisões arquitetônicas sobre a qualidade acústica, através da análise experimental e simulação acústica, analisando a relação entre os vários parâmetros investigados, identificando potencialidades que possam oferecer novos caminhos para a concepção espacial do objeto de estudo, bibliotecas, e evidenciar as incoerências na lógica de considerar a acústica arquitetônica como um objeto de estudo complementar ao projeto arquitetônico.

1.3. OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é caracterizar acusticamente o salão principal da Biblioteca Central Prof. Clodoaldo Fernando Ribeiro Beckmann, através de medições e simulação computacional, expondo novas configurações organização espacial, e como essas influenciam diretamente parâmetros acústicos, de modo a atender requisitos de qualidade acústica para este recinto.

Como objetivo específicos, considera-se:

- Caracterizar acusticamente a sala em questão, através de medições de nível de pressão sonora e resposta impulsiva, baseada nas NBR 10.152 (ABNT, 2017) e ISO 3382:2 (ABNT, 2017);
- Elaborar o modelo geométrico base da sala utilizando o *Software ODEON Acoustics 10.1 Combined*;
- Calibrar o modelo geométrico da sala a fim se aproximar a resposta computacional à resposta experimental;
- Elaborar novas proposições de reorganização espacial, sobre a modelo base, analisando o impacto das alterações sobre a qualidade acústica do recinto.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Abrangendo os assuntos pertinentes à abordagem teórica relacionada ao que tange os conceitos referente a acústica arquitetônica, apresenta-se neste capitulo seu estado da arte, através de pesquisa bibliográfica e eletrônica. Posteriormente, apresenta-se o aprofundamento de temas pertinentes ao objeto de estudo, ambientes abertos, ao exemplo de bibliotecas, normas e diretrizes nacionais que condicionam o desempenho acústico do edifício.

2.1. PARÂMETROS PARA A DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE ACÚSTICA DE SALAS

Com o desenvolvimento atual de técnicas para a medição e simulação de salas e do estudo de parâmetros mensuráveis que avaliam os atributos acústicos no interior dos recintos, torna-se possível avaliar as condições acústicas de ambientes, entre estes os destinados a alta concentração, através da resposta a um impulso sonoro.

A avaliação dos parâmetros de satisfação nesses ambientes é feita por indicadores padronizados que usam a resposta impulsiva, para assumir valores estáveis para o ruído ambiente. Além do principal parâmetro indicador das propriedades acústicas de um recinto, o Tempo de Reverberação, outros parâmetros, como, taxa de decaimento espacial dos níveis de pressão sonora, o índice de transmissão da fala e níveis de pressão sonora residual, tornam a avaliação mais completa para a característica desses recintos, a medição desses baseia-se em métodos descritos na ISO 3382 (ABNT, 2017).

A seguir, serão apresentados parâmetros como Tempo de Reverberação, Tempo Inicial de Decaimento, Índice de Transmissibilidade da Fala, Definição, considerados determinantes para compreensão da resposta acústica de salas, esses influenciam diretamente outros índices, determinantes para ambientes demandam alto nível de concentração, como inteligibilidade e privacidade da fala.

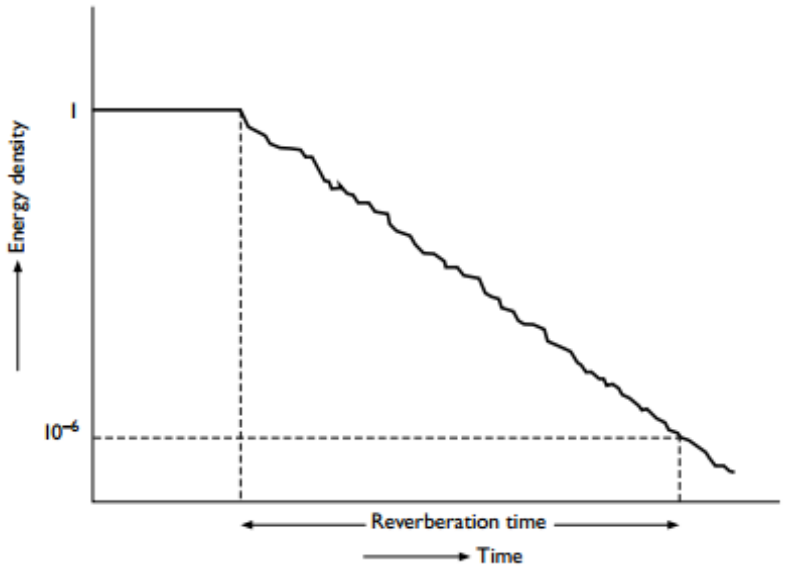
2.1.1. Tempo de Reverberação, T

A reverberação é um fenômeno que desempenha uma importante função em todos os aspectos da acústica do recinto, sendo um dos principais critérios de avaliação quantitativa, ou seja, para verificação da adequação de salas para o desempenho da fala ou música, este é

causado por reflexões sonoras interagindo com os limites do recinto e a transferência de energia para estes limites de acordo com a absorção dessa energia pelas superfícies (MEISSNER, 2007; VORLANDER, 2008). Quando a emissão sonora por uma fonte é interrompida em um dado recinto, o som refletido no interior da sala não se extingue rapidamente, mas sim decai. Em acústica de salas o processo de decaimento sonoro desenvolve uma importante função, este chamado reverberação (KUTRUFF, 2007).

Sendo o Tempo de Reverberação (*reverberation time*, T) descrito como tempo de decaimento especifico, Fig. 2.1, este necessário para haver um decaimento sonoro de 60 dB.

Figura 2.1: Definição de tempo de reverberação.



Fonte: KUTRUFF, 2007.

Usualmente decaimentos sonoros de 60 dB são difíceis de serem alcançados dado o nível de pressão sonora do ruído de fundo, dada essa dificuldade têm-se por convenção utilizar intervalos de decaimentos menores com intervalos de 20 e 30 segundos, denotam-se T_{20} e T_{30} respectivamente.

Através de experimentos, Sabine, pode verificar a relação existente entre a reverberação de uma sala, seu volume e a absorção das superfícies, onde T é apresentada pela equação de Sabine, sendo α « 1:

$$T = 0{,}16 \times \frac{V}{S\alpha} = 0{,}16 \frac{V}{A} \quad (2)$$

Onde V é o volume interno (em m³), S é a área total das superfícies da sala (em m²), α é o coeficiente de absorção das superfícies do recinto. O valor de A é denotado equivalente ao somatório do produto das áreas de superfícies do recinto por seus respectivos valores de absorção, segundo a formula:

$$\alpha = \frac{A}{S} = \frac{1}{S}\sum_{i=1}^{N} S_i\alpha_i \; ; S = \sum_{i+1}^{N} Si; A = \sum_{i=1}^{N} S_i\,\alpha_i. \quad (3)$$

Ou como descrita pela equação de Eyring onde c corresponde a velocidade do som, (340m/s):

$$T = \frac{-24\ln(10)}{c}\ \frac{V}{Sln\,(1-\alpha)} = 0{,}16\frac{s}{m}\ \frac{V}{-Sln(1-\alpha)} \quad (4)$$

2.1.2. Tempo Inicial de Decaimento, EDT

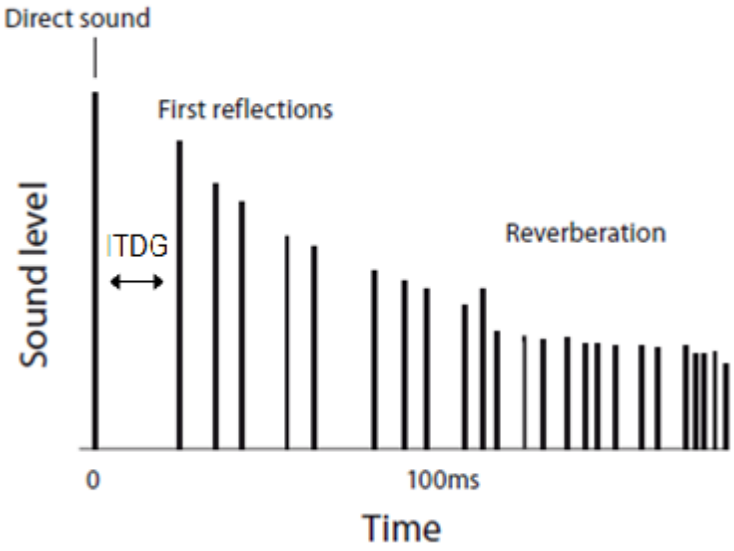
Componente fundamental do Tempo de Reverberação, define-se como a parte inicial da resposta impulsiva de uma sala, determinada pelas reflexões primarias (BRADLEY, 2003).

Segundo Kleiner (2010), essas reflexões iniciais acabam por influenciar diretamente índices de inteligibilidade da fala.

Atualmente tornou-se como a caracterização dos índices iniciais de decaimento sonoro pelo *Early Decay Time* (EDT), onde este é o tempo o qual ocorre o primeiro decaimento de 10dB multiplicado por um fator 6, sendo um valor mais curto que o tempo de reverberação (KUTRUFF, 2009; LONG, 2006).

Outro importante parâmetro oriundo das reflexões iniciais, chama-se Intervalo Inicial de Atraso de Tempo (*Initial Time Delay Gap*, ITDG), Fig. 2.2, inspirado na pesquisa alemã sobre efeito de precedência, sendo de relativa importância para a compreensão do tempo de atraso entre o som direto e a primeira reflexão, importante para o design de salas de concerto (KLEINER, 2014).

Figura 2.2: Definição de Intervalo Inicial de tempo de atraso.



Fonte: BARRON, 2009, adaptado pelo autor.

Logo reflexões iniciais tornam-se importantes componentes a serem estudados na acústica de salas, contrapondo a pratica comum de focar somente no tempo de reverberação como o principal parâmetro no projeto acústico.

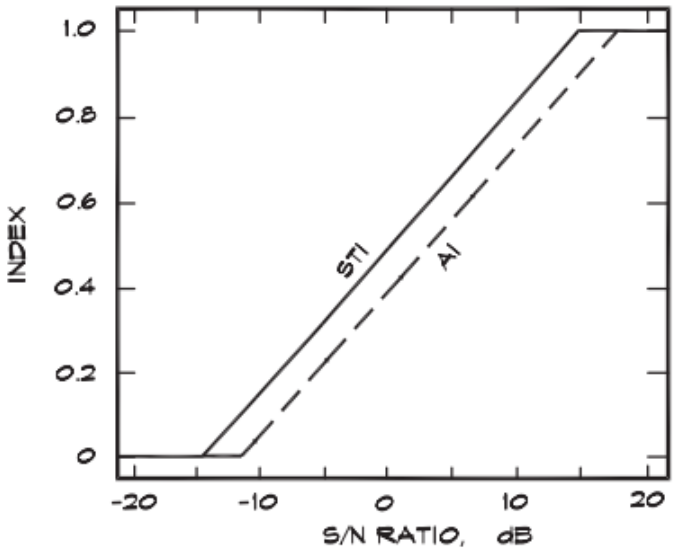
2.1.3. Índice de Transmissibilidade da Fala, STI

Intimamente ligada as reflexões sonoras e as características geométricas do ambiente, o Índice de Transmissibilidade da Fala (*Speech Transmission Index*, STI), é uma métrica que considera um conjunto de condições críticas para a acústica de sala, tais quais, Tempo de Reverberação, reflexões iniciais, Nível de Ruído de fundo, características geométricas, localização de superfícies absorvedoras, reflexivas e difusoras, simplificadamente trata-se da compreensão ou não da fala em salas.

Entretanto, pesquisas evidenciam que tempos de reverberação ideais podem não necessariamente influenciar positivamente sobre a inteligibilidade garantindo índices satisfatórios (HODGSON; NOSAL, 2002).

O índice de transmissão da fala (STI), é semelhante ao *Articulation Index* (AI), Fig. 2.3, ou uma porcentagem de perda de consoante, visto que é uma medição direta da inteligibilidade da fala (LONG, 2006).

Figura 2.3: Comparação entre valores de STI e AI.



Fonte: LONG, 2006.

Para Kleiner (2014), apesar da utilidade do STI em descrever a inteligibilidade da fala, seu problema é a não descrição da qualidade sonora, onde para o mesmo valor de STI, a qualidade subjetiva do som pode variar através de uma ampla gama.

Em termos acústicos, a redução do Índice de Transmissão da fala, é fundamental para ambientes abertos que exijam índices adequados de privacidade da fala, Tab. 2.1, para isso faz-se necessário, a consideração simultânea do mascaramento sonoro, o uso de superfícies verticais que funcionem como barreiras acústicas entre estações de trabalhos, e atenção relativa a superfícies absorvedoras, além de parâmetros como níveis da fala e a distância entre estações de trabalho.

Tabela 2.1: Índices de inteligibilidade e privacidade da fala.

STI	**Inteligibilidade da Fala**	**Privacidade da Fala**
0.00 – 0.05	Muito Ruim	Confidencial
0.05 – 0.20	Ruim	Boa
0.20 – 0.40	Pobre	Razoável
0.40 – 0.60	Razoável	Pobre
0.60 – 0.75	Boa	Ruim
0.75 – 0.99	Excelente	Muito Ruim

Fonte: HILGE, 2001, apud OLUFSEN, 2017, adaptado pelo autor.

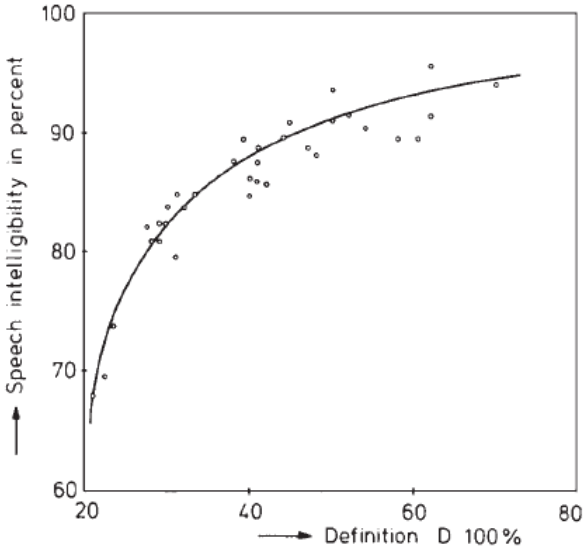
2.1.4. Definição, D_{50}

Uma das primeiras tentativas de relacionar o valor de energia total com inteligibilidade, foi chamada de Definição (*definition*, D). A qual considera a energia útil como a energia direta adicionada da energia refletida que chega no intervalo de 50ms do som direto. Podendo ser descrita como:

$$D5 = \left[\int_0^{50ms}[g(t)]^2dt / \int_0^{\infty}[g(t)]^2dt\right].100\% \quad (5)$$

O parâmetro D_{50} encontra-se intimamente ligado com inteligibilidade silábica, Fig. 2.4, o mesmo considera-se uma medida relativa a inteligibilidade da fala (KUTRUFF, 2009).

Figura 2.4: Comparação entre valores de D_{50} e Inteligibilidade Silábica.



Fonte: KUTRUFF, 2001.

2.1.5. Mínima Diferença Perceptível, JND

Ensaios psicoacústicos conduzidos em salas reais e laboratórios têm apresentado limites distinguíveis à audição humana em diferentes situações. Esses valores dão informações importantes sobre a precisão necessária e simplificação permitida em modelos computacionais dos campos sonoros em salas (VORLÄNDER, 2008).

Tabela 2.2: Grandezas acústicas agrupadas de acordo com aspectos dos ouvintes

Aspectos Subjetivos do ouvinte	**Grandezas Acústicas**	**Número único médio em frequência (Hz)**	**JND**
Nível	G (dB)	500 a 1000	1 dB
Reverberação Percebida	EDT (s)	500 a 1000	5%
Clareza	C80 (dB)	500 a 1000	1dB
Definição	D	500 a 1000	0,05
	TS(s)	500 a 1000	10 ms
ASW	LF	125 a 1000	0,05
LEV	LG(d)	125 a 1000	1

FONTE: VORLÄNDER, 2008, adaptado pelo autor.

Por padrão a ISO 3382-1, apresenta os valores de diferença do limite observável (JND), Tab. 2.3, onde cinco grupos correspondente a aspectos subjetivos do ouvinte, a cada um desses estão associadas grandezas acústicas, relacionadas diretamente uma com as outras. Para aproximações computacionais não se faz necessário calcular e comparar todas as grandezas sendo somente necessário que seja incluída uma grandeza correspondente a aspectos subjetivos do ouvinte (ABNT, 2017, VORLÄNDER, 2008).

2.1.6. Níveis de Pressão Sonora, L

Por um logo período o nível de pressão sonora estacionário ou a densidade de energia que uma determinada fonte sonora produzia em um recinto não era considerado um critério para determinar a qualidade acústica de uma sala pois este depende mais da potência sonora emitida pela fonte e da área de absorção das superfícies internas, tal interpretação alterou-se dada pouca eficácia de parâmetros como Definição e Clareza na análise acústica caso o som seja fraco demais para ser ouvido em volume confortável (KUTRUFF, M, 2009).

A pressão sonora corresponde ao valor da ordem de 20Pa o qual é muito pequeno se comparado com a pressão atmosférica [aproximadamente, 10-5 Pa, sendo o ouvido humano capaz de processar sinais que cobrem cerca de seis ordens de grandeza, justificando sua alta sensibilidade. Portanto, é mais útil empregar o logarítmico da pressão sonora como uma medida de força do som:

$$L = 20log_{10}\left(\frac{Ƥrms}{Ƥ0}\right)\ dB \tag{6}$$

Onde, $Ƥrms$ indica o valor quadrático médio (rms) da pressão, e Ƥ0= 2x10-5 indica a pressão de referência padronizada internacionalmente (KUTRUFF, 2009).

Baseado na norma nacional ABNT NBR 10152:2017 e seus procedimentos técnicos apresentados para a execução de medições de Nível de Pressão Sonora em ambientes internos, alguns parâmetros correspondentes são apresentados para a descrição dos níveis sonoros, dentre eles: nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderada em A integrado durante um tempo T no ponto X ($L_{Aeq,\ T/X}$), nível de pressão sonora equivalente ponderada em A, representativo de um ambiente (L_{Aeq}), nível máximo de pressão sonora representativo de um ambiente (L_{ASmax}), níveis de pressão sonora contínuos equivalentes, em bandas de 1/1 de oitava, medidos no ponto X ($L_{eq,T,fHz(1/1),X}$), níveis de pressão sonora equivalentes, em bandas de oitavas, representativos de um ambiente($L_{eq,fHz(1/1)}$), determinação do nível NC representativo de um ambiente (LNC).

2.2. BIBLIOTECA, DEFINIÇÃO E HISTÓRICO

Historicamente, bibliotecas encontravam-se associadas a igrejas, transformando a aprendizagem secular em uma tradição restrita, onde o progresso da descoberta e do conhecimento, eram, na pior das hipóteses, familiares e intermitentes. Logo, ambientes rígidos e inflexíveis. Sua evolução está diretamente relacionada ao desenvolvimento da sociedade ocidental, da vida social nos últimos séculos, e a maior acessibilidade a informação, leitura e conhecimento (DAHLKILD, 2011; MATTHEWS, 2016).

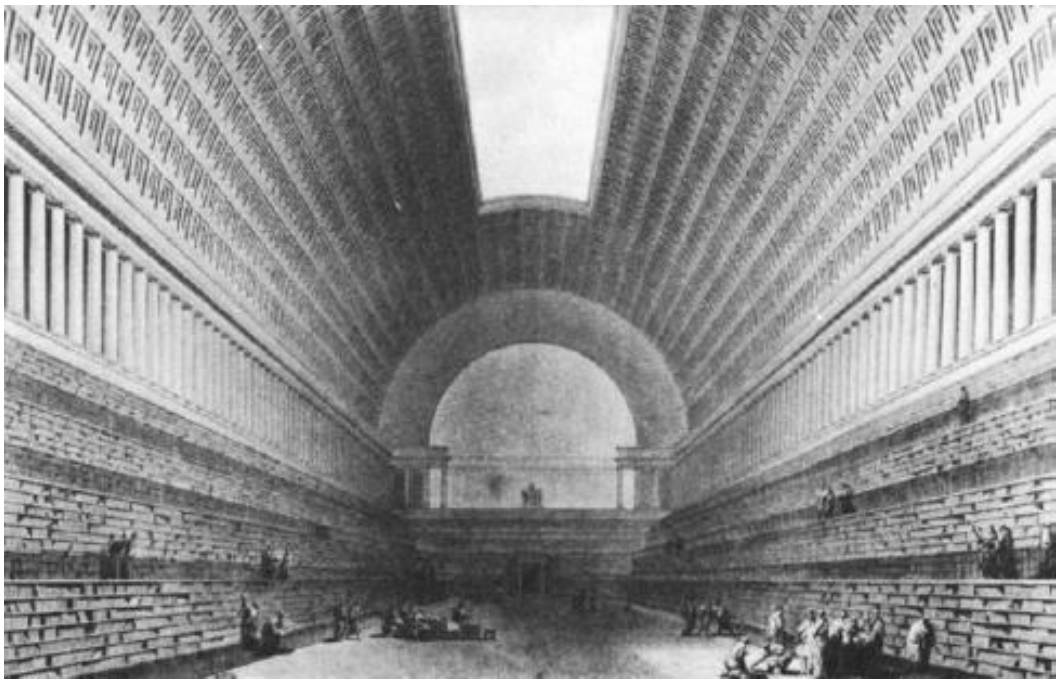
Dentre a gama de possibilidades atuais, a formação da biblioteca origina-se em lugares onde se arquiva material, acervo, garantindo aos leitores ajuda, recursos e instrumentação para facilitação de informações, além de acomodação para estudo e leitura, entretanto esta historicamente era concorrente a função tradicional. Logo com o Iluminismo, surge uma nova noção de bibliotecas públicas e um crescente número de livros públicos e revistas cientificas, literárias e políticas e com a possibilidade de acesso a este material advêm uma demanda crescente de leitores, assim neste período surgiram uma serie proposições para organização da estrutura interna de bibliotecas (DAHLKILD, 2011).

Dentro as várias propostas, o revolucionário projeto da biblioteca de Boullée, Fig. 2.5, sendo considerado um manifesto para uma tipologia que promovesse o acesso ao conhecimento e ao pensamento, requisitos para formar um discurso público esclarecido e crítico. Neste cenário a biblioteca como expressão da tradição iluminista passa a servir um número maior de pessoas e sua organização espacial e seus métodos de distribuição de forma mais estrita e profissional, sua arquitetura torna-se grandiosa e proeminente como a paisagem urbana, com fachadas monumentais em estilos históricos.

Outro estilo de biblioteca foi proposto nas décadas seguintes a 1900, o magnata Andrew Carnegie, apresenta seu modelo Carnegiano, Fig. 2.6, tendo vários níveis, inúmeras coleções de livros e salas separadas, sendo inacessível a uma parcela da população, sendo construída como um “templo do conhecimento”, onde a ordem principal era o silêncio (DAHLKILD, 2011; SWALLOW, 2015).

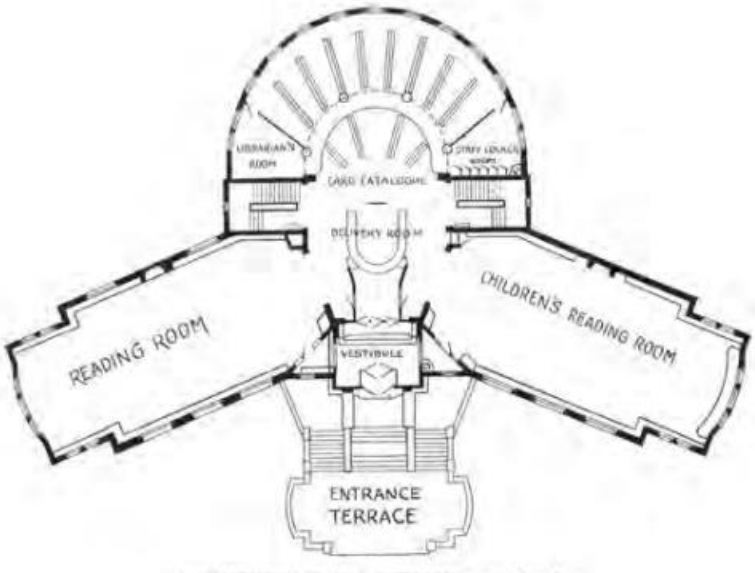
Entretanto com o Pós Segunda Guerra, o design clássico, muita das vezes referido como o proposto por Carnegie, foi desafiado pela presença de vários tipos de tecnológicas, afetando diretamente a organização espacial e a sua função, e assim criando novas demandas, como, espaço para visualização de novas mídias.

Figura 2.5: Modelo de biblioteca proposto por Étienne-Louis Boullée, por volta de 1780.



Fonte: DAHLKILD, 2011.

Figura 2.6: Planta da Biblioteca Pública do Brooklyn, proposto por Carnegie, por volta de 1905.



Fonte: DAHLKILD, 2011.

Frente as novas necessidades espaciais e de usos, desenvolve-se um tipo flexível, onde as soluções podem variar de acordo com a disponibilidade de espaço, recursos e missões, em contrapartida ao modelo das bibliotecas antigas, sendo menos centradas em acervos e coleções. Ambientes com planta livre, tornam-se, portanto, uma parte importante da criação do novo modelo de biblioteca, possibilitando a flexibilidade de layout e a livre circulação e integração das diversas atividades agregadas que acontecem em seu novo interior, a viabilidade do desenvolvimento dos elementos espaciais internos da mesma e o planejamento futuro em um

contexto maior, seja urbano ou institucional, associados ao baixo custo em etapas construtivas em caso de redefinição de espaços (BRADLEY, 2003; DAHLKILD, 2011).

Dentro as novas possibilidades de funções e uso, Marino (2015) define tais como, espaços de trabalhos transitórios, estes podem não ser necessariamente projetados ou dedicados para um determinado uso único, mas seus transeuntes podem escolhe-los temporariamente para trabalhar, logo, tal ambiente acaba por adquirir a função de incubadora criativa e espaço de trabalho, e essa combinação é o conceito de incubadoras espaciais (*spatial incubators*) em seu princípio, e na comunidade acadêmica, muitos estudantes preferem trabalhar em espaços públicos, estando dentro da visão de alguém que pode ajuda-los e se congregaram em áreas muito movimentadas onde eles podem ver e ser vistos (HURT; FINDLEY, 2011; MARINO, 2015).

Na realidade acadêmica, a biblioteca universitária, descrita por Campbell (2017) como, "o coração da universidade", tem sua finalidade e proposta questionada com o passar dos anos. Compreendida como ambiente de acesso a informação, onde estudantes tendem a recorrer quando há a necessidade de informações confiáveis.

Para Adeniran (2011) bibliotecas acadêmicas, tem dois propósitos: ensino e pesquisa, possibilitando suporte ao currículo acadêmico e às pesquisas das faculdades e estudantes com maior enfoque pedagógico, social e tecnológico, sendo necessário estruturar os serviços oferecidos para seus usuários, a fim de garantir sua comodidade. Markham (2004) por sua vez destaca que para edifícios destinados ao tipo de uso em análise, neste trabalho, a necessidade de grandes ambientes abertos onde os usuários possam circular, ler, estudar, trabalhar ou simplesmente relaxar.

A possibilidade de expansão flexível, o aumento da população estudantil e o crescente número de ênfase em estudos, recursos, além das mudanças nos métodos de ensino tiveram um impacto significativo na formação espacial, desafiando o padrão tradicional por uma "biblioteca sem paredes", tornando-se um "espaço aberto" de "acesso aberto", demandando uma maior exigência no campo da Arquitetura e da Acústica, possibilitando um planejamento futuro, não apenas em um contexto urbano, mas também para desenvolver elementos espaciais internos, objetivando melhorias a essas novas demandas (HURT; FINDLEY, 2011; WRIGHTSON; WRIGHTSON, 1999).

Tais alterações culturais apresentadas, proporcionam novas demandas em bibliotecas, essas vem alterando drasticamente a oferta de serviços, tornando-se necessário compreender esses espaços como uma rede complexa de experiências e interseções empreendidas em uma gama de envoltórias físicas.

2.3. O SOM EM AMBIENTES DE PLANTA LIVRE E BIBLIOTECAS

Diante das alterações históricas sofridas, têm-se necessidade de se discutir as novas proposições espaciais e suas demandas em conjunto com os problemas oriundos destas, entre eles o acústico, a partir do momento que se entende a biblioteca enquanto amplo espaço aberto e flexível, destinado as mais variadas experiências. Compreendida, agora, como ambientes de planta livre, têm por definição, segundo a ABNT NBR ISO 3382 – Parte 3: Escritórios de planta livre, espaços destinados a grande quantidade de pessoas, podendo ter um nível variado de NPS – Nível de Pressão Sonora, uma vez que seus usuários podem se encontrar conversando ou em estado de concentração em suas estações de trabalho, independentemente (ABNT, 2017).

A Acústica Arquitetônica, torna-se um importante componente a ser considerado no programa arquitetônico, uma vez que a condição acústica de envoltórias destinadas a ambientes de trabalho impacta profundamente na produtividade humana (SYKES, 2004). Entretanto, para Kang (2004), grande parte da literatura em acústica encontra-se destinada para salas de alta exigência acústica (teatros, cinemas e auditórios, etc.). Em contrapartida, abordagens sociais têm conduzido diversos estudos em espaços públicos abertos, incluindo bibliotecas, estádios, praças abertas, áreas residenciais, hospitais, escolas, ruas históricas, metrôs e outros, apresentados como espaços "não acústicos", passando a requerer determinada atenção para sua paisagem sonora (DOKMECI; KANG, 2010; KANG, 2007; YANG; KANG, 2005).

Diversos estudos anteriores consideram a avaliação acústica em Bibliotecas, entre eles, Markham (2004), em seu estudo *"Acoustic Comfort in Libraries",* investiga a condição acústica de setenta bibliotecas da Universidade de Princeton, através de análise objetiva e subjetiva, apresentando as impressões subjetivas da acústica nesses recintos e quantificando-as, propondo, o que o mesmo chama de "envoltórias acusticamente confortáveis", por fim traça soluções de projeto para os problemas acústicos investigados.

Dokmeci e Kang (2012) apresentam, *"A comparative case study of indoor soundscape approach on objective analyses and subjective evaluations of libraries*, investigando três diferentes bibliotecas em *Sheffield, Reino Unido,* aplicando medições de ruído e gravações, bem como, questionários sócio acústicos para a paisagem sonora interna em espaços públicos, sendo realizadas em diferentes áreas funcionais de cada biblioteca.

Franks e Asher (2014) avaliaram subjetivamente quatro bibliotecas universitárias no Sul da *Florida*, apresentando problemas relatados e as possíveis soluções encontradas para essas bibliotecas.

John Swallow (2015) apresenta em seu estudo *"The Challenges of Modern Library Acoustic"*, o desafio das novas tipologias de bibliotecas em criar ambientes abertos, com uma variedade de usos e serviços, em alcançar parâmetros acústicos mínimos consideráveis para esse uso, apresentando a *Halifax Central Library*, como modelo de sucesso.

Mais recentemente, Rajagopalan (2016), realizou um estudo intitulado *"Acoustic performance of contemporary public libraries: in evaluation of public libraries in Melbourne, Australia"*, investigando a condição acústica de sete bibliotecas públicas, na área metropolitana de *Melbourne*, usando medições objetivas.

Vários problemas acústicos são observados na literatura para bibliotecas e ambientes de planta livre, esses têm naturezas distintas, podem ser apresentados nas seguintes categorias, (1) ruído intrusivo de outro espaço ou atividade; (2) ambientes excessivamente reverberantes; (3) pouca privacidade da fala ou problemas de distração (CHEVRET, 2014; EBISSOU et al., 2015; HAAPAKANGAS et al., 2014; PIERRETTE et al., 2015, SWALLOW, 2015).

A literatura apresenta os ruídos intrusivos como sons que não desejados no interior do recinto, como exemplos incluem-se, conversas em salas adjacentes, atividades não relacionadas com o uso do recinto, sistemas de condicionamento de ar, maquinários e outros. Parte dos sistemas de condicionamento de ar e maquinários, podem se tornar fontes de distração, afetando diretamente o ruído de fundo de bibliotecas, principalmente se a fonte emitir um ruído irregular ou cíclico, alterando abruptamente os níveis de pressão sonora (MARKHAM, 2004).

Para Wrightson (1999), uma das principais formas de controle de ruídos intrusivos pode ser através do isolamento acústico adequado entre recintos e em equipamentos, e em outras situações, a disposição de ambientes, a fim de se criar barreiras, não permitindo atividades incompatíveis, pode ser uma interessante estratégia a fim de minimizar esses efeitos.

O alto nível de reflexão do som, em bibliotecas, devido ao uso inadequado de materiais de revestimento, pode resultar em uma acústica muito pobre dependendo do uso da sala, a partir do momento que essas passam a interferir sobre o ruído de fundo da sala na capacidade de compreensão e privacidade a fala, tais ambientes são ditos altamente reverberantes (RAJAGOPALAN, 2016; SALTER, 2002; WRIGHTSON, 1999). Logo, como resposta a esse efeito indesejável, a incorporação e distribuição de materiais absorvedores deve ser considerado no projeto de ambientes de leitura.

Os problemas não se limitam apenas as queixas referentes ao aumento de ruído e altos níveis de reflexão do som, mas também têm sidos associados à diminuição da satisfação do ambiente, estresse, incapacidade de concentração e outros tais como a falta de privacidade (HAAPAKANGAS, 2014; KERANEN, 2013; VIRJONEN, 2009, WANG, 2002). Ao mesmo

tempo que os usuários desses recintos podem se encontrar em estados de concentração diferentes, todos estes serão afetados pelos níveis sonoros das atividades ao redor, essas por sua vez podem diminuir a capacidade de concentração. Tal condição, acaba por comprometer a acústica do recinto, reduzindo a produtividade do usuário, uma vez que ruídos intrusivos podem ser indesejados para um ouvinte, em estado de concentração, mas desejável para o orador, comprometendo a privacidade da fala, e a falta desta, vai contra a confidencialidade parcial ou total de conversas (ABNT, 2017).

Desta forma, Salter (2002), em seu livro *Acoustics for Libraries,* considera responsabilidade de planejadores, usuários, arquitetos, engenheiros, e outros envolvidos com o projeto assegurar que as necessidades acústicas do projeto sejam corretamente delineadas, sendo estas:

- Ruído do entorno, incluindo o controle do ruído transmitido pela vizinhança;
- Estabelecimento de normas para ambiente, considerando seu uso, incluindo ainda um limite para o ruído de ventilação excessiva;
- Considerações para acústica de salas;
- Isolamento sonoro entre os vários ambientes;
- Controle da vibração de equipamentos mecânicos;
- Considerações para sistemas áudio/visual;

Em âmbito nacional, a fim de prever melhor acurácia acústica em salões de leitura, órgãos nacionais, como a Fundação Biblioteca Nacional (2010), apresenta como estratégia para adoção do controle de ruído de qualquer natureza, a seguinte recomendação, “existem meios de reduzir, ao mínimo, os ruídos dentro da biblioteca, seja por tratamento acústico ou por disposição adequada do layout. Prever o isolamento da sala de leitura de qualquer atividade de natureza ruidosa, tais como: sala de reuniões, sala infantil, oficinas, etc” (Fundação Biblioteca Nacional, 2010).

Outro órgão de regulamentação normativa, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017), sob a NBR 10152 – Níveis de ruído para o conforto acústico, estabelece apenas níveis de pressão sonora em ponderação A verificados *in situ*, sendo recomendado para bibliotecas de 40 a 45dB e para ambientes de planta livre de 45 a 50dB, Tab. 2.3, não sendo incluído outros para parâmetros para a real avaliação de ruído nesses ambientes.

Entretanto para Markham (2004), somente a medição do nível de ruído de fundo é insuficiente para caracterizar adequadamente o conforto acústico de uma biblioteca, sendo necessário haver uma métrica objetiva mensurável que corresponda à impressão subjetiva de

conforto acústico. Logo, o Índice de Articulação (AI), uma função sinal-ruído, resultado da relação geométrica existente entre o som emitido da fonte e o receptor, e as superfícies do recinto, quantifica efetivamente índices de distração da fala, tendo como valor sugerido de AI de 0,20 a menor, correspondendo a relativa "liberdade de distração", atingindo melhores índices de privacidade da fala.

Tabela 2.3 – Níveis de Pressão Sonora recomendados pela NBR 10152

Finalidade de uso	**Valores de referência**		
	RLAeq (dB)	**RLASmax (dB)**	**RLNC**
Culturais e lazer			
Bibliotecas	40	45	35
Escritórios			
Escritórios coletivos (open plan)	45	50	40

Fonte: ABNT (2017), adaptado pelo autor.

Portanto, verifica-se a ineficiência das normativas e recomendações por parte dos órgãos nacionais, uma vez que poucos são os parâmetros e orientações a serem tomados objetivando a qualidade acústica nesses recintos.

Nesse sentido os vários parâmetros acústicos acabam por interagir de modo complexo, visto que parte das reclamações apresentadas na literatura para esses ambientes relata o os sons distantes podem ser ainda mais perturbadores. Logo, maior deve ser a investigação da privacidade da fala em distancias maiores, uma vez que as queixas de privacidade da fala não se restringem apenas ao discurso emitido no posto de trabalho, mas do discurso oriundo de distancias maiores, sendo menos relevante para o ouvinte em sua estação de trabalho (VERVOORT, 2015).

Assim as condições acústicas para esses ambientes devem ser consideradas como um todo em vez de estudadas parcialmente com ênfase somente nos ambientes de trabalho, uma vez que níveis de concentração por atividade tendem a ser distintos, agravando mais a questão da acústica em todo o recinto, devido ao caráter subjetivo demandado pela atividade desempenhada (KERENEN, 2013).

2.4. O EFEITO DOS PARÂMETROS ARQUITETÔNICOS NA ACÚSTICA

Em ambientes fechados, elementos arquitetônicos e/ou as funções e uso, afetam diretamente a paisagem sonora do recinto, esta é definida pelas as ações dos usuários, que por sua vez atuam como fontes e receptores do som, determinados por características individuais como atitude, personalidade e outras, e pelo ambiente construído, este agindo principal entidade, consequentemente, envoltórias fechadas devem ser cuidadosamente projetadas com a inclusão necessária de recursos acústicos, uma vez que a organização formal, e as relações entre espaços e padrões de circulação do espaço interior são fundamentais para analisar as formações acústicas no recinto, assim, a paisagem sonora é a função predefinida do espaço e seus usuários, e os elementos arquitetônicos e detalhes do recinto (DOKMECI; YILMAZER, 2012).

Compreende-se o recinto como um espaço limitado por um sistema de paredes, piso e teto, fatores esses determinam parâmetros internos como, volume, forma da sala, materiais de revestimentos, elementos que influenciam sobre a qualidade acústica do som produzido internamente (NOWOSWIAT; OLECHOWASKA, 2010).

Para Pavlovic e Mijic (2005), a resposta acústica de determinado recinto é influenciada por duas propriedades, a forma geométrica do recinto e as propriedades reflexivas das superfícies internas. Considerando seus efeitos no campo sonoro essas características podem ser reconhecidas em nível macro e micro. A nível macro, encontram-se os atributos onde as dimensões são maiores que o comprimento de onda sonora, e envolve a forma volumétrica do recinto. Em nível micro, os atributos são de tamanhos iguais ou menores que os comprimentos de onda. Estes influenciam as características de interação entre a energia sonora e superfícies das extremidades, e ainda tem impacto na direção da distribuição de energia propagada. Sendo a influência dessas características geométricas na acústica de sala fisicamente explicada pela reflexão de energia sonora através das superfícies do recinto (PAVLAVIC; MIJIC, 2007).

Nowoswiat (2010), confirma o impacto da forma sobre a acústica do recinto, em salas cúbicas de similar capacidade, absorção acústica e campos sonoros isotrópicos, proporção do comprimento para a largura de projeção apresentaram-se como fator substancial na formação da acústica das salas, sendo a geometria e seus coeficientes, parâmetros diretamente responsáveis pela alteração do tempo de reverberação.

A influência das propriedades geométricas na resposta acústica de determinada sala pode ser quantificada pelo desvio dos valores de medição de tempo de reverberação. Esses preditos através do modelo matemático estático clássico proposto por Sabine e/ou Eiring, os quais o desvio pode ser consequente dos fatores não visualizados na teoria estatística, como

forma geométrica e espalhamento (PAVLOVIC; MIJIC, 2005). Estes também tendem a flutuar dependendo da densidade de ocupação do espaço de trabalho, facilitando o fenômeno do mascaramento sonoro (CHEVRET, 2016).

A acústica geométrica aplica-se, na melhor das hipóteses, a geometrias cúbicas com grandes dimensões em relação ao comprimento de onda. Nesta teoria, fenômenos como difração são negligenciados, uma vez que a propagação em linha reta é o principal elemento de analise (MEISSNER, 2008).

Pavlavic (2007) seu estudo, através do método de simulação computacional por traçado de raios, apresenta provas sobre a influência das características geométricas na absorção da sala, revelando ainda que o aumento de superfícies de espalhamento (elementos refletores) em salas com diferentes formas pode atuar diretamente na variação do tempo de reverberação, concluindo que o comportamento do campo sonoro em uma determinada sala reage conforme a mudança de espalhamento em sua geometria básica. Os resultados também ressaltam a influência da geometria em nível macro e micro, e sua influência não pode ser observada separadamente, revelando ainda que um determinado aumento do fator de espalhamento em salas de diferentes geometrias pode apresentar variações em seu tempo de reverberação, ainda que mantendo a mesma qualidade de absorção nas superfícies da sala.

Portanto a resposta acústica de uma determinada sala pode ser descrita como um grupo de parâmetros derivados da resposta impulsiva da mesma, influenciados diretamente pelas características físicas da sala, e sua relação mútua.

CAPÍTULO 3

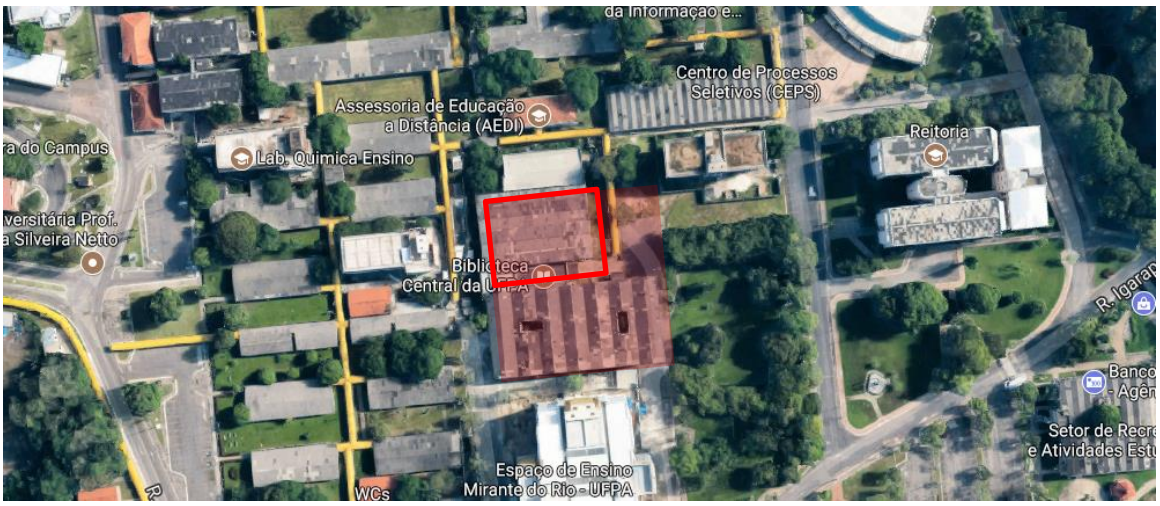
METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa estruturou-se em investigar a arquitetura e parâmetros acústicos do objeto de estudo, garantindo os objetivos apresentados. Inicialmente conduziu-se a pesquisa buscando investigar e classificar o objeto arquitetônico, a fim de compreender seus atributos formais, como parte fundamental da acústica local. Conseguinte, aplicou-se medições experimentais *in situ*, a fim de se caracterizar acusticamente o objeto de estudo, para posteriores fases de calibração do modelo computacional e simulações acústicas, garantindo os objetivos apresentados.

3.1. LEVANTAMENTO ARQUITETÔNICO DO OBJETO DE ESTUDO

Para o desenvolvimento deste estudo, o material desta pesquisa corresponde as análises dos respectivos salões de acervo e estudos da Biblioteca Central, Prof. Dr. Clodoaldo Fernando Ribeiro Beckmann, Fig. 3.1, situada no campus Guamá, da Universidade Federal do Pará, localizada à avenida Perimetral, em Belém, capital do Estado do Pará.

Figura 3.1: Localização do Objeto de estudo



Fonte: Google Maps, 2017, adaptado pelo autor.

Tendo como objetivo principal "dotar a universidade de um órgão central de bibliografia e documentação" (Guia da Biblioteca Central, 1988), a Biblioteca Central é um órgão suplementar subordinado a Reitoria. A Biblioteca Central da UFPA, Fig. 3.2, teve seu funcionamento em dois endereços antes de se estabelecer no campus universitário do Guamá, em novembro de 1972. Recebeu o nome oficial de Biblioteca Central, em fevereiro de 1972 e teve seu nome alterado em 2005, passando a se chamar, Biblioteca Central, Prof. Dr. Clodoaldo

Fernando Ribeiro Beckmann, sendo responsável pela coordenação técnica das 37 bibliotecas que compõem o Sistema de Bibliotecas (SIBI), englobando as bibliotecas dos campis Belém e dos demais municípios adjacentes (BC-UFPA, 2017).

Figura 3.2: Vista externa da Biblioteca Central

Fonte: BC-UFPA, 2017.

Anos após sua inauguração a Biblioteca Central, como comumente chamada, busca acompanhar o desenvolvimento cientifico e tecnológico com o objetivo de assegurar uma base consolidada de suporte aos programas de ensino, pesquisa e extensão, tendo como finalidade reunir, organizar e disseminar as informações, além ainda de oferecer ao longo das décadas promoções a fim de atrair os usuários da comunidade acadêmica (RIBEIRO, 2015)

Seu acervo encontra-se protegido por um sistema eletromagnético antifurto, totalizando cerca de 900 mil volumes, nos suportes impresso, digital, eletrônico, *online*, distribuído entre as 37 Bibliotecas do SIBI/UFPA e disponível para acesso pelo *software Pergamum*, para função de gerenciamento dos serviços técnicos e da rede de bibliotecas, disponibilizando seu catálogo de acervo para consultas *online*. Sua organização encontra-se dividida em: Acervo Geral, Obras de Referência, Coleção Amazônia, Teses e Dissertações defendidas na UFPA e em outras instituições, Obras Raras, Fitas Cassetes, Filmes em rolo, DVD e CDR, Obras em braile, Coleções Especiais, periódicos impressos e Bases de dados, todos esses organizados pelo

sistema de classificação decimal em que os assuntos seguem uma ordem lógica e filosófica de temas e subtemas (BC-UFPA, 2017).

A Biblioteca Central como parte do SIBI, é composta por diversos espaços destinados ao uso misto, acervo e leitura, sendo usada pela comunidade universitária. O salão em análise apresenta cerca de 3/4 da área total da biblioteca, caracterizado como grande ambiente de planta livre (*large open-plan*), separados em Acervo Geral de Livros, que compreende a área de literatura suporte aos cursos disponibilizados pela Universidade e a área de estudo, Fig. 3.3.

Figura 3.3: Interior da Biblioteca Central; a) Salão principal; (b) Mezanino; (c) Salão secundário

(a)

(b)

(c)

3.2. ANÁLISE ACÚSTICA EXPERIMENTAL DO OBJETO DE ESTUDO

Inúmeros são os parâmetros objetivos para a validação acústica de ambientes, segundo a literatura especializada. Tais parâmetros como, tempo de reverberação, nível de pressão sonora residual, tempo de decaimento inicial, e outros, quantificam experimentalmente a resposta acústica do recinto. Entretanto, para cada tipo de uso e especificidade a literatura e normativa, considera quais os parâmetros ideais para avaliar determinada condição.

Baseado nas normativas nacionais, ABNT NBR 10152: 2017 Acústica – Níveis de Pressão Sonora em ambientes internos a edificações e ABNT NBR ISO 3382-2 Acústica –

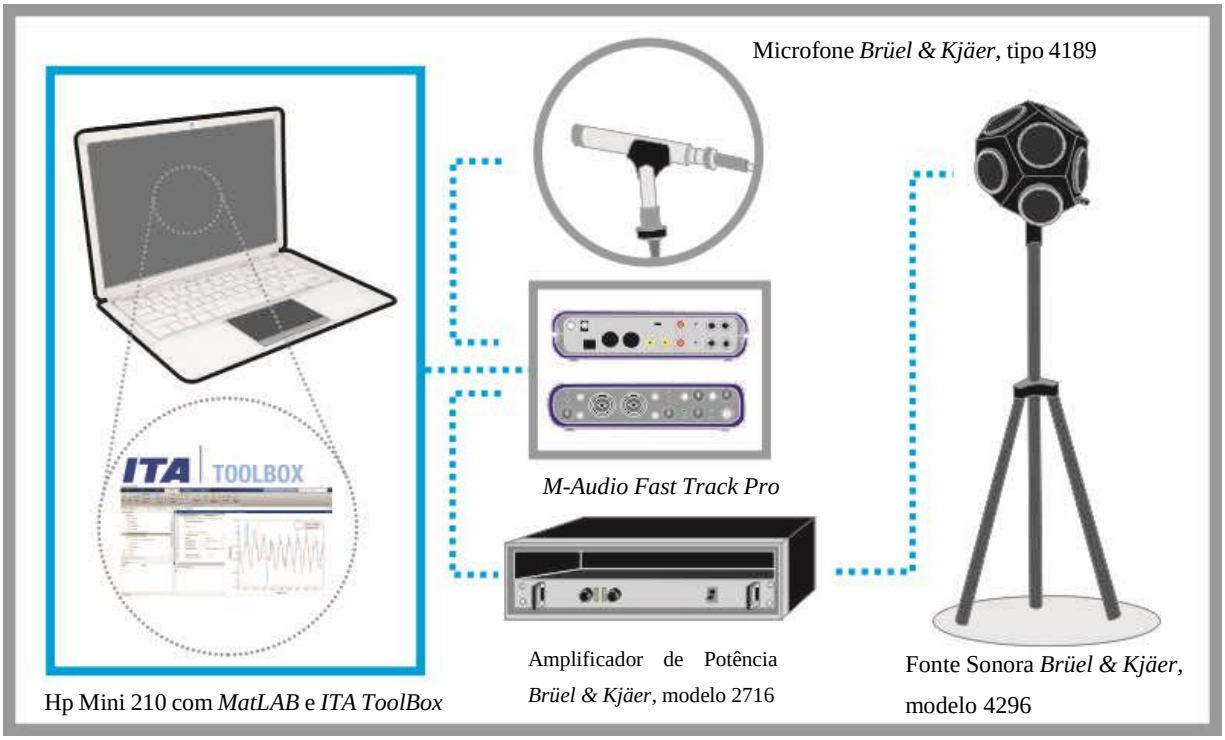
Medição de parâmetros de acústica de salas, Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns, aplicou-se essas para avaliação acústica das salas em análises.

As medições da resposta impulsiva, foram conduzidas, nas três principais áreas e de maior fluxo de circulação, da Biblioteca Central da UFPA, durante os dias 6 e 7 de dezembro de 2017, das 15:00 às 18:00 horas. Realizadas no ambiente mobiliado, sem ocupantes internos exceto as pessoas autorizadas para o experimento. O sistema de condicionamento de ar encontrava-se em funcionamento, conforme previsto pela norma ISO 3382-3(ABNT, 2017), as condições térmicas da sala se encontravam a 52% de umidade e a temperatura interna a 26,9º. Para medições complementares a Resposta Impulsiva, realizaram-se medições de ruído de fundo ao termino do experimento do dia 7 de dezembro de 2017.

3.2.1. Instrumentação

As medições de campo acústico serão realizadas de acordo com a ABNT NBR ISO 3382 – 2: 2017, A Fig. 3.4, apresenta o sistema de medição usado para análise da Resposta Impulsiva.

Figura 3.4: Diagrama para sistema de medição para análise da Resposta Impulsiva



Lista de equipamentos:

- Computador de Medição: Computador de uso pessoal Hp Mini 210 com *MatLAB* e *ITA ToolBox*;
- Microfone de campo difuso: *Brüel & Kjäer*, tipo 4189;

- Placa de Áudio: *M-Audio Fast Track Pro*;
- Amplificador de Potência*: Brüel & Kjäer*, modelo 2716
- Fonte Sonora Dodecaédrica Omnidirecional: *Brüel & Kjäer*, modelo 4296;
- Sonômetro de precisão: Modelo Solo, fabricante 01 dB.

A ferramenta ITA *Tool-box*, desenvolvido pelo *Institute of Technical Acoustics* da universidade RWTH em Aachen, tem como função ser uma interface para a obtenção da resposta impulsiva integrada através de ruídos de sequências de comprimento máximo (MLS), através da função *Rooms Acoustics*, desenvolvida para o *MatLab*, fornecendo os seguintes parâmetros monoaurais conforme a norma ISO 3382: Tempo de Reverberação (EDT, T_{20}, T_{30}), Definição (D_{50}) (DIETRICH, et al. 2014).

O sistema encontrava-se conectado à placa de áudio M-Audio Fast Track Pro, Fig.3.5, a partir deste havia a conexão com o computador portátil Hp 210 e a ferramenta ITA Tool-Box.

Figura 3.5: Placa de Áudio, M-Audio Fast Track Pro

Através da interface do ITA *Tool-Box* o controlador emitia um sinal-ruído para a fonte dodecaédrica B&K, modelo 4296, Fig. 3.6, essa conectada ao amplificador de potência B&K, modelo 2716, este ligado a placa de audio.

Figura 3.6: Fonte dodecaédrica B&K, modelo 4296

O sinal-ruído por sua vez era recebido no microfone de campo difuso, Fig. 3.7, conectado a placa de áudio, e a Resposta Impulsiva apresentada no *notebook* e salva para posteriores análises.

Figura 3.7: Microfone de campo difuso: *Brüel & Kjäer*, tipo 4189

3.2.2. Estratégias de medições

A ABNT NBR ISO 3382 – Parte 2: Tempo de Reverberação em salas comuns, descreve o procedimento necessário, e o método para avaliar a Resposta Impulsiva da sala em questão.

Para esta parte da normativa, encontra-se especificado três níveis de exatidão de medição: inspeção, engenharia e precisão, sendo a principal diferença entre elas o nível de acurácia de resultados. Nestas a quantidade de posições de medições e tempo de exposição de medição, são determinantes para o resultado (ABNT, 2017). Neste trabalho considera-se o método de precisão, esta apropriada para medições de alta exatidão.

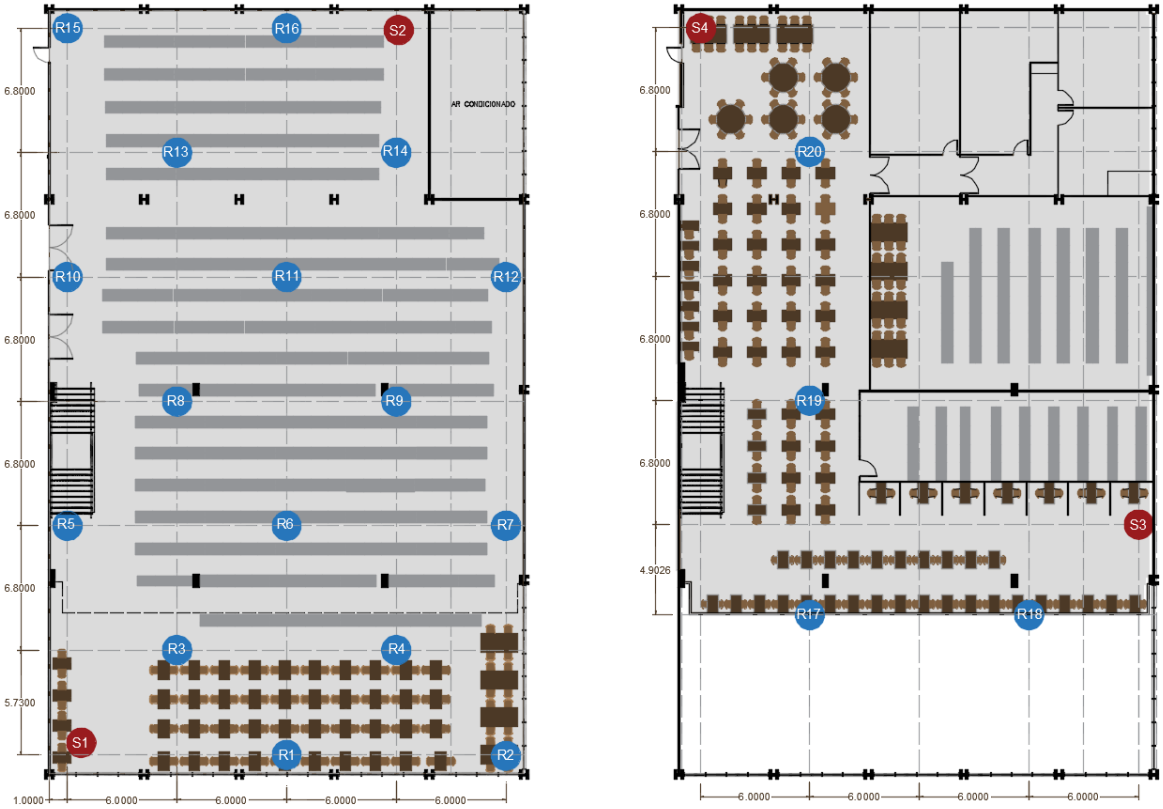
As medições foram realizadas no acervo geral, no piso térreo e no segundo nível, uma vez que estes são interligados, em condição vazia, desocupado, conforme recomenda a normativa. Para esta seguiu-se as recomendações propostas pela norma NBR ISO 3382-2, onde:

- Número de combinações fonte-microfone superior a 12, sendo no mínimo 2 posições de fonte para 3 posições de receptores;
- Previsão das principais influências prováveis de causar diferenças no tempo de reverberação do recinto;
- Para salas que não exista uma posição normal de fonte, convém que uma das posições esteja em um dos cantos da sala.
- A locação de ponto de medições no recinto convém que exista um distanciamento mínimo de 2 metros entre os pontos, e cerca de um quarto do comprimento da onda de qualquer superfície refletora (ABNT, 2017).

Seguindo as recomendações propostas, a fonte sonora omnidirecional, foi locada em 4 posições, sendo duas delas, as posições S1 e S4, a 1.50 metros de altura, e as fontes S2 e S3, locadas no nível do piso.

O plano retangular do recinto foi dividido em uma malha de 13,60 x 12,00 m, contabilizando 20 pontos receptores (microfone), Fig. 3.8, a distância mínima de 1,2 m de altura do piso, ajustada sob tripé. Entretanto dada a particularidade do objeto em estudo torna-se necessário, realocar alguns desses pontos reduzindo a distância entre superfícies verticais, uma vez que a área de acervo possui um distanciamento menor que o indicado pela normativa, e compreender a formação acústica entre estes é de fundamental importância para, possíveis estratégias posteriores.

Figura 3.8: Posicionamento de fonte (vermelho) e receptor (azul) para medições em campo



Através da ABNT NBR 10.152:2017 – Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações, avalia-se níveis de pressão sonora (NPS) visando a preservação da saúde e do bem-estar humano. Como recomendação normativa, os seguintes procedimentos devem ser seguidos:

- O sonômetro deve atender à IEC 61672, sendo classe 1;
- Os filtros de 1/1 de oitava devem abranger as bandas de 63 Hz a 8 kHz;
- Os pontos de medição devem ser distribuídos de modo a representar melhor o campo sonoro do recinto;
- As medições devem ser executadas em pelo menos três pontos de medição distribuídos pelo ambiente. Para ambientes com áreas superiores a 30m², um ponto de medição deve ser aumentado a cada 30m²;
- Os pontos de medição devem se situar pelo menos a 1m das superfícies, sendo no mínimo 0,7m entre pontos.

Baseado nessas recomendações, as medições foram realizadas nos mesmos pontos definidos para a medição da Resposta Impulsiva, sendo o tempo mínimo de medição de 30s.

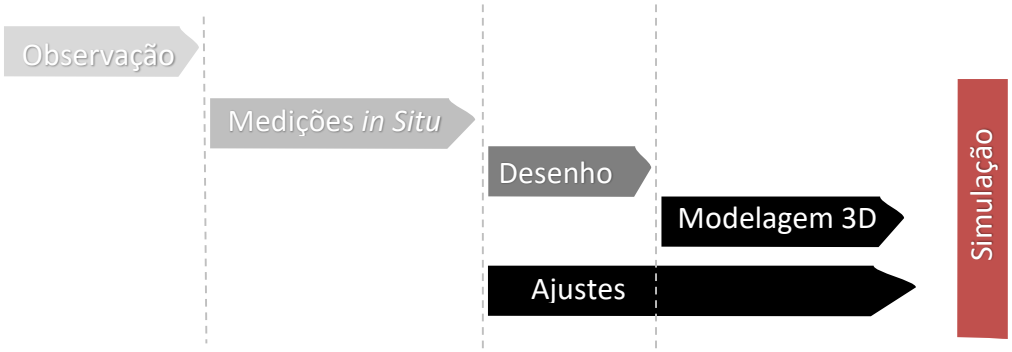
Os resultados obtidos nessa etapa metodológica serão apresentados no capítulo 4.

3.3.SIMULAÇÃO ACÚSTICA

Para elaboração de modelagem computacional, utilizou-se a base do levantamento físico-cadastral cedida pela Prefeitura do Campus, esta verificada para a atualização de eventuais alterações. Sendo o modelo 3D criado em formato .DWG, por intermédio de *Computacional Aided Design* , no *software* AutoCAD, usando técnicas de modelagem 3D, seus elementos compostos por 3D face, e calibração e simulação acústica no *software* ODEON 10.1 *Combinated*, licenciado para o Grupo de Vibrações e Acústica – GVA/FEM.

O modelo computacional foi elaborado seguindo a base atualizada, fotografias, observações e medidas, como observado no diagrama da Fig. 3.9. Na simulação acústica, detalhes de acabamento e elementos decorativos, influenciam diretamente nos resultados e tempo de processamento, entretanto o grau de refinamento da modelagem geométrica não implica diretamente na inserção desses detalhes no modelo, mas sim na consideração de princípios acústicos básicos, para tal deve ser considerado a resposta acústica da simulação, bem como o tamanho da superfície, devem ser de ordem maior ao comprimento de onda (VORLANDER, 2010, 2013).

Figura 3.9: Procedimento modelagem computacional

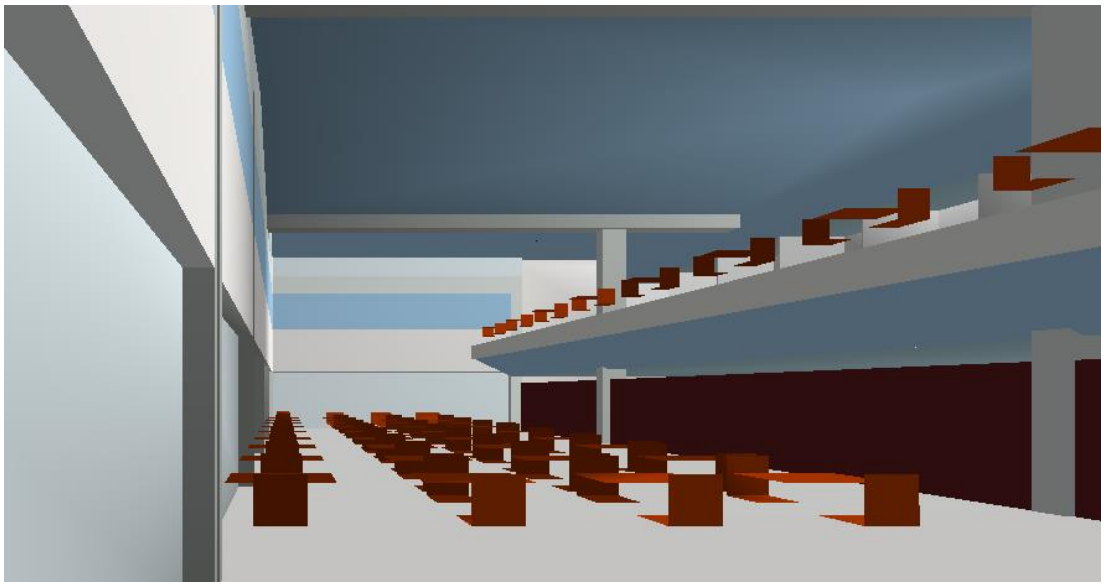


O uso de simulação computacional na análise das propriedades acústicas de um espaço durante o processo de *design* prova-se prático e confiável, podendo ser adotado como ferramenta integrante ao processo de projeto arquitetônico (ZUHRE SU GUL, 2013).

A aplicação da modelagem computacional e simulação acústica, Fig. 3.10, viabiliza comparar e analisar os diferentes elementos formais, suposições básicas relacionadas a características acústicas desses, e aos materiais empregados e sua distribuição, considerando todo e qualquer erro de precisão e dimensionamento dos modelos de modo a evitar qualquer extremo de precisão entre os modelos.

Figura 3.10: Salão de leitura: a) Real; b) Modelo computacional

(a)



(b)

Pesquisas conduzidas por Vorländer(1995) e Bork (2000, 2005), intituladas *Round Robin*, tiveram como enfoque análises comparativas entre os vários programas de simulação acústica, buscando definir um grau de acurácia e comparar o nível de precisão entre os programas com análises, experimentais de salas reais. Dentre os *softwares* analisados o

ODEON *Acoustics*, apresentou-se uma ferramenta eficaz e com alto grau de acurácia, garantindo maiores aproximações entre modelos computacionais de simulação acústica e salas reais.

O *Software* ODEON *Acoustics*, baseia-se no método hibrido de simulação acústica. Tal método de simulação fundamenta-se nos melhores aspectos entre métodos tradicionais, como o de fonte-imagem e traçado de raios, a fim de se obter resultados mais precisos com tempo de cálculo reduzido (CHRISTENSEN, 2009). Seu principal objetivo fornecer predições acerca da resposta impulsiva e/ou tempo-energia, usado para calcular atributos como T, T_{30}, D_{50} e outros, a simulação de acústica geométrica é comumente usada para apresentar as características de sala em médias e altas frequências (SAVIOJA; SVENSSON, 2015).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, apresenta-se os resultados obtidos através da análise experimental e simulações acústicas das configurações propostas. Inicialmente é apresentado a caracterização acústica do objeto de estudo através dos parâmetros acústicos investigados e suas respectivas avaliações através das normativas e literatura. Posteriormente são apresentadas as etapas que compõem a simulação acústica computacional, através da calibração de modelo, e conseguinte apresentam-se as novas proposições de configuração espacial para o salão principal da Biblioteca Central da UFPA. Por fim, são feitas as análises dos resultados das simulações acústicas obtidos pelo *software ODEON acoustics*, caracterizando a influência das proposições sobre parâmetros como T_{30}, T_{20}, EDT, D_{50} e STI, esses apresentados pela norma ABNT 3382 para a caracterização acústica de sala e calibração do modelo computacional.

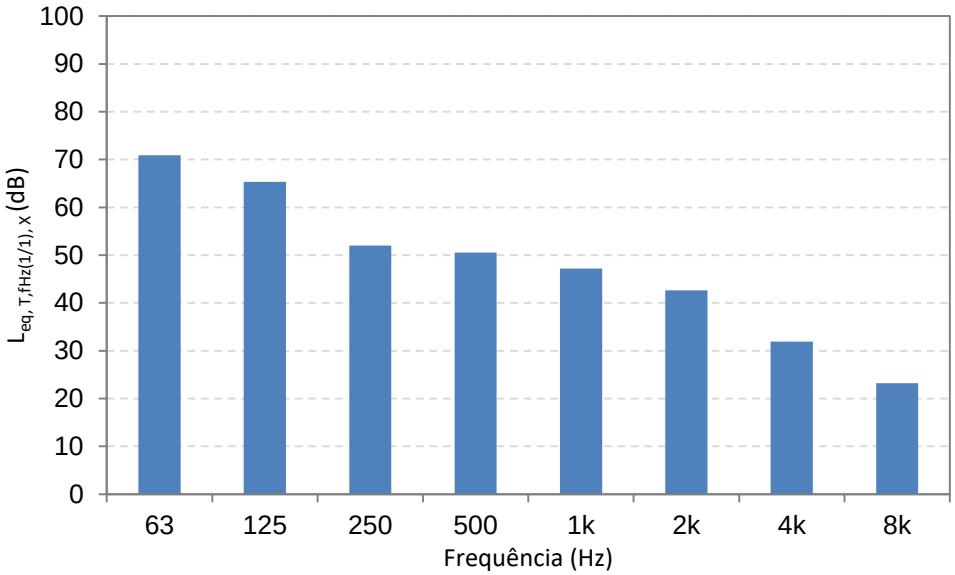
4.1. CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DO ESTUDO DE CASO

A qualidade acústica é fundamental para ambientes que requerem alta concentração, uma vez que influencia diretamente sobre parâmetros subjetivos de produtividade. Logo, a caracterização acústica do objeto de estudo em questão é fundamental para avaliar as condições acústicas do recinto, através de parâmetros objetivos mensuráveis, que possam funcionar como guia para a busca de estratégias e correções de problemas, e servir de base comparativa para etapas de calibração do modelo computacional.

Para avaliação da qualidade acústica na Biblioteca em estudo, foram realizadas medições do ruído ambiente, conduzidas seguindo as recomendações apresentadas pela NBR 10.152 (ABNT, 2017), conforme descrito no Capítulo 3.

A Fig. 4.1 apresenta os níveis de pressão sonora contínuos equivalentes, em bandas de 1/1 de oitava, medidos para cada ponto receptor R_n, sob condições normais de funcionamento de HVAC, uma vez que o sistema de condicionamento de ar encontra-se sempre ligado para conservação do acervo, a fim de se caracterizarem os níveis de pressão sonora em função do espectro nas condições de uso do recinto, possibilitando verificar em qual faixa de frequência dominante o som se encontra.

Figura 4.1: Níveis de pressão sonora contínuos equivalentes, em bandas de 1/1 oitava, medidos para cada receptor R_n ($L_{eq,\ T,fHz(1/1),\ X}$).



Considerando a distinção entre zonas analisadas, acervo, área de estudo e mezanino, para a biblioteca, a Fig. 4.2 apresenta níveis de pressão sonora equivalente, máximo e mínimo em ponderação em A, para os pontos de receptores R_n, no intervalo de 30 segundos. Baseados na avaliação da NBR 10.152 (ABNT, 2017), sendo de aproximadamente o L_{aeq} para as zonas Z1 e Z3 de 50 a 60dB já para a zona Z2, valores entre 30 e 50 dB, são observados, Fig. 18, enquanto o limite recomendado pela normativa é de 40 dB.

A curva de avaliação de ruído (NC), Fig. 4.3, apresenta a representação em um plano cartesiano, considerando o limite de ruído para cada atividade, e nesta observam-se os dados obtidos para a biblioteca analisada.

Figura 4.2: Níveis de Pressão Sonora equivalente, máximo e mínimo em Ponderação A, por receptor (R_n), para as zonas encontras, no intervalo de 30 segundos.

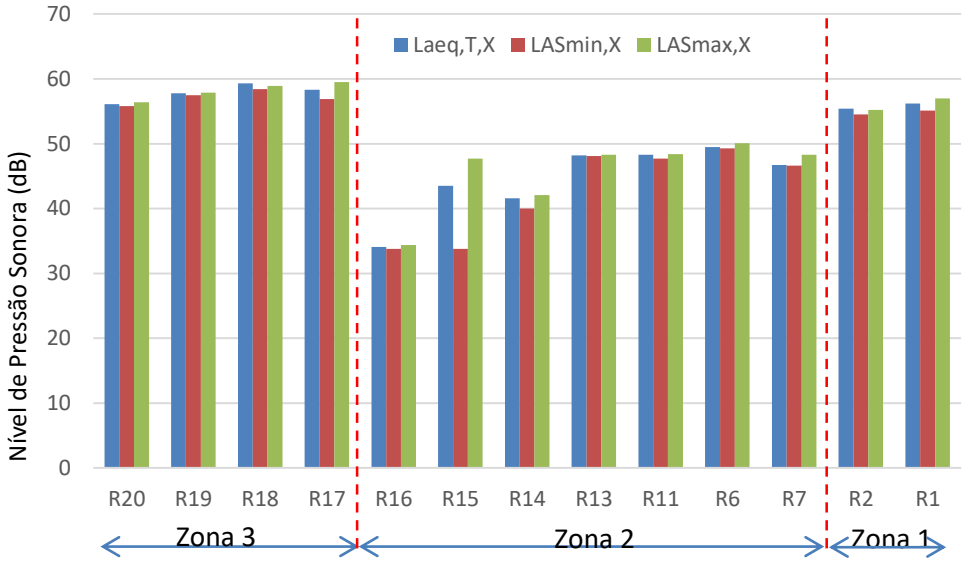
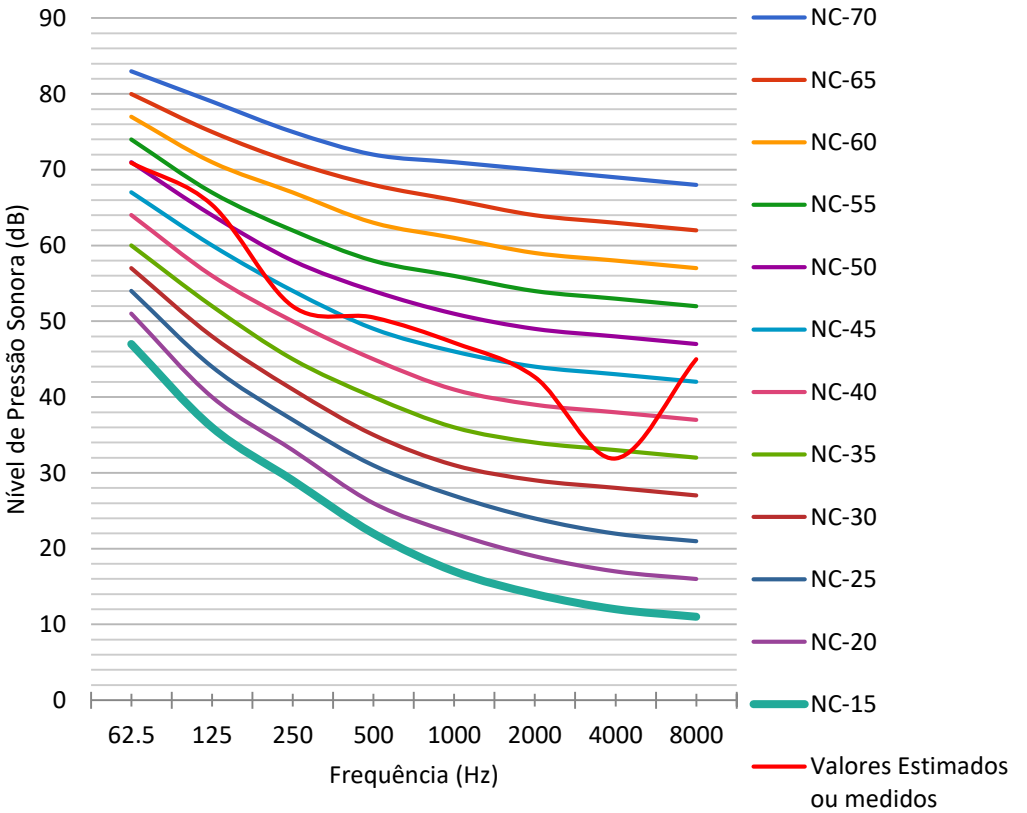


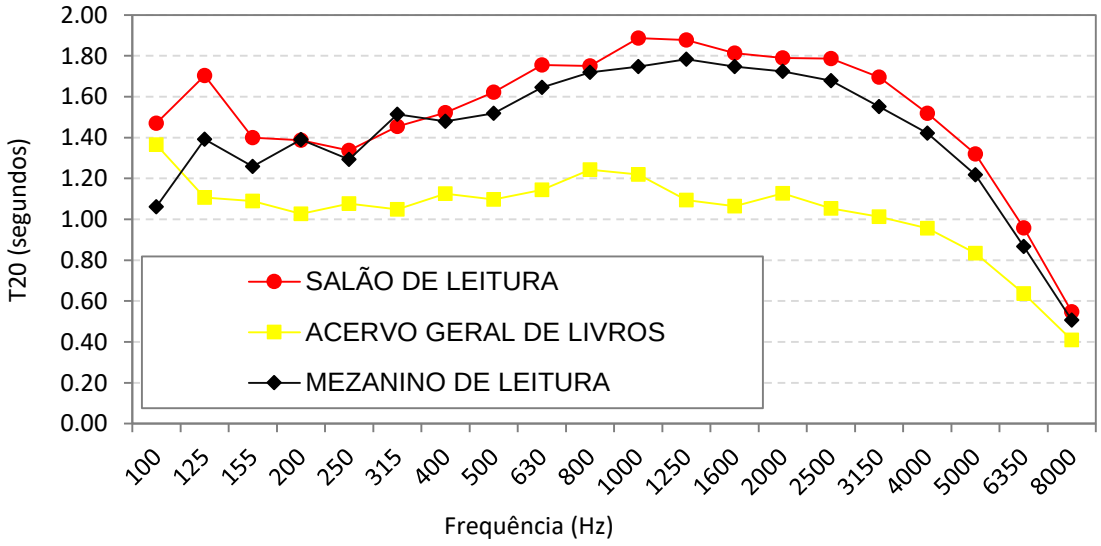
Figura 4.3: Curva de Avaliação de Ruído (NC), para o objeto de estudo.



A caracterização mais detalhada do recinto é obtida através da Resposta Impulsiva, onde se objetiva a medição de parâmetros acústicos de salas, baseado na ABNT 3382 -2, conforme descrito no Capítulo 4.

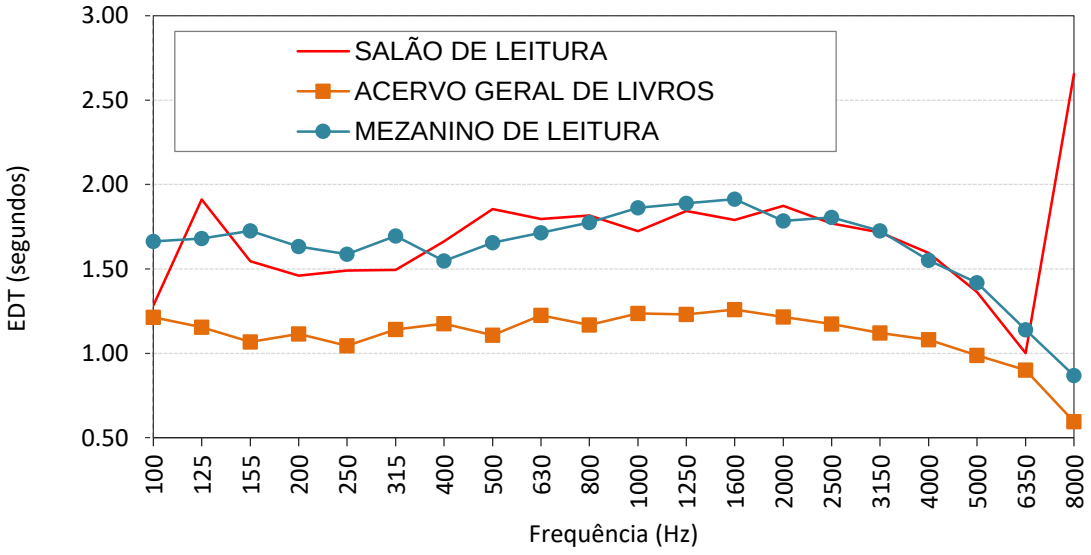
A Fig. 4.4 apresenta as curvas de valores médios de tempo de reverberação para as bandas de frequência de 100 a 8000 Hz, medidos para os 20 receptores, considerando cada uma das zonas analisadas. Nessa figura, percebe-se a influência das superfícies absorvedoras sob a área de acervo (zona 2), as quais levaram ao decaimento dos valores de T_{20} para todas as faixas de frequência.

Figura 4.4: Tempo de Reverberação (T_{20}) considerando as características espaciais encontradas por zonas.



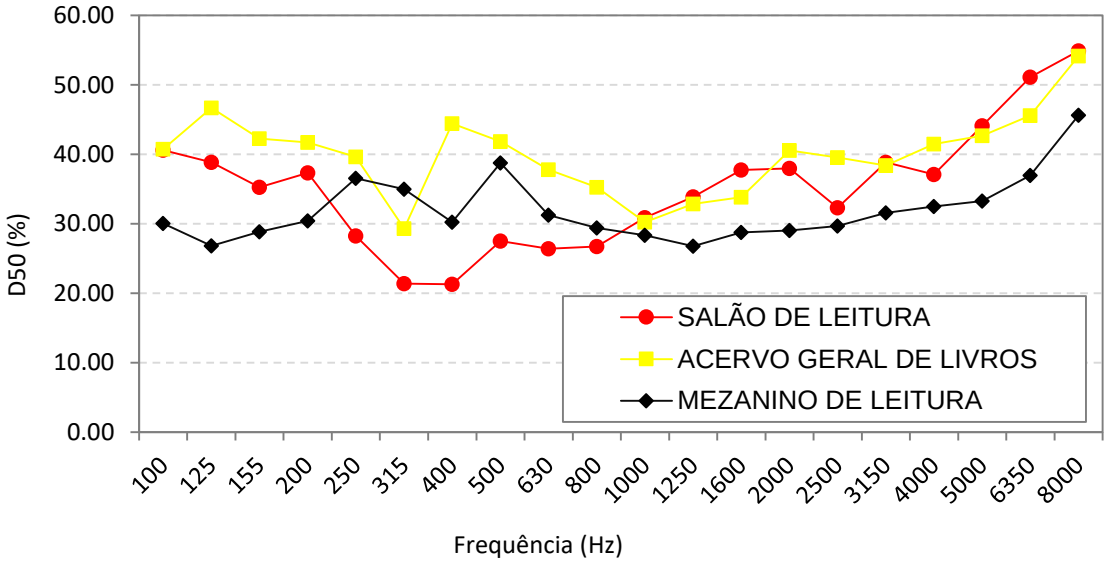
Ainda como caracterização relativa às características físicas da sala, os valores médios de EDT (ver Fig. 4.5) considerando as medições de cada emissão de fonte (S_n) para cada receptor (R_n) analisado.

Figura 4.5: Tempo de Decaimento Sonoro, para cada receptor (R_n).



A definição sonora percebida, na sala, expressa em valores de D_{50}, constitui-se um importante parâmetro a ser analisado, uma vez que está intimamente associada a índices de privacidade da sala. A Fig. 4.6 apresenta os valores de D_{50} para a média total de emissões da fonte, para cada receptor.

Figura 4.6: Médias dos valores de Definição (D_{50}), para os receptores (R_n).



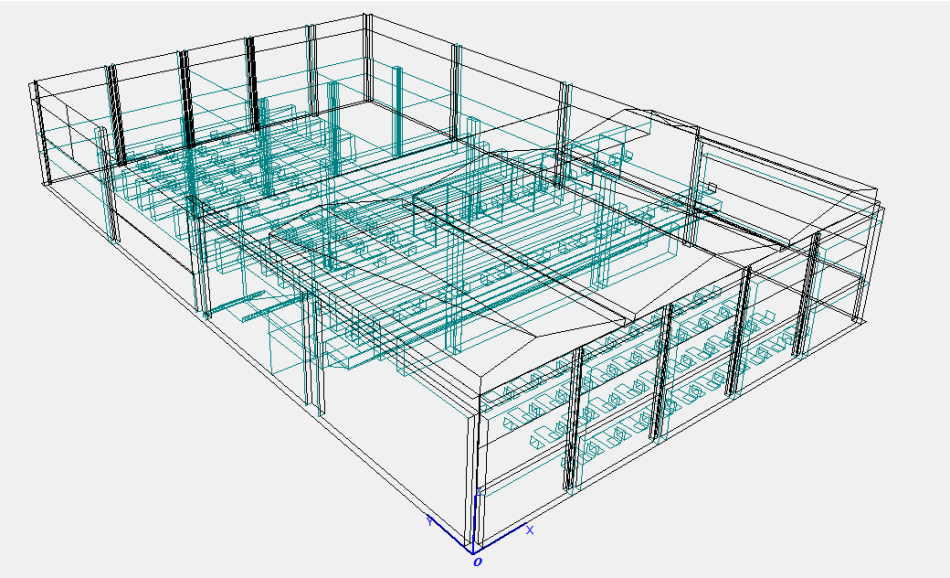
A partir da caracterização acústica do objeto de estudo, tornam-se possíveis etapas de validação do modelo computacional, com as aproximações necessárias entre os parâmetros para seguimento da pesquisa.

4.2. MODELAGEM VIRTUAL E O DESIGN DAS CONDIÇÕES ACÚSTICAS DA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFPA

4.2.1. Informações do modelo virtual

O modelo acústico do acervo geral da Biblioteca Central da UFPA foi obtido através de modelagem 3D em *Computacional Aided Design* – CAD, conforme descrito no Capítulo 3, sendo apresentado com um grau considerado de detalhamento. Contudo, embora comum em modelagens e visualizações arquitetônicas, acaba apresentando erros significativos, uma vez que do ponto de vista da acústica e dos princípios físicos aplicados à absorção e dispersão, elementos com detalhes inferiores a 0,5m acabam sendo "invisíveis" acusticamente (VORLÄNDER, 2008). A Fig. 4.7 mostra o modelo geométrico base criado para o desenvolvimento da pesquisa.

Figura 4.7: Modelo geométrico importado para o software ODEON Acoustics.



O presente estudo foca no comportamento acústico dos mais variados elementos e características espaciais que possam influenciar a acústica do recinto, portanto, objetivou-se fazer simplificações geométricas considerando as recomendações apresentadas, mas sem que essas descaracterizassem arquitetonicamente o objeto de estudo. Estudos anteriores (PELZER; VORLÄNDER, 2010; VORLÄNDER, 2013) evidenciaram a necessidade de um modelo apropriado para uma resposta otimizada. Em contrapartida a isso, o nível de detalhamento do modelo geométrico influencia diretamente no tempo de processamento.

A Tab. 4.1 apresenta os principais dados descritivos do modelo geométrico base do Acervo Geral da Biblioteca Central da Universidade Federal do Pará.

Tabela 4.1: Características geométricas do modelo virtual.

Características Geométricas	
Total de Superfícies	1463
Dimensões (m)	42,2 x 26,3 x 7,69
Volume (m³)	8547,8
Área Total das Superfícies (m²)	9042,3
Área Acervo (m²)	1813,6

4.2.2. Posição de fontes e receptores

A fim de analisar a resposta impulsiva do modelo virtual e compará-la com a análise experimental, apresentada na seção 4.1, foram identificadas três zonas, com características espaciais e físicas distintas, que podem produzir diferenças no comportamento acústico do recinto. Assim, a fim de se obter melhor caracterização acústica das zonas identificadas, foram determinados 20 pontos de receptores e 4 pontos de fontes, posicionados estrategicamente ao longo da sala, considerando os mesmos pontos apresentados durante o ensaio experimental.

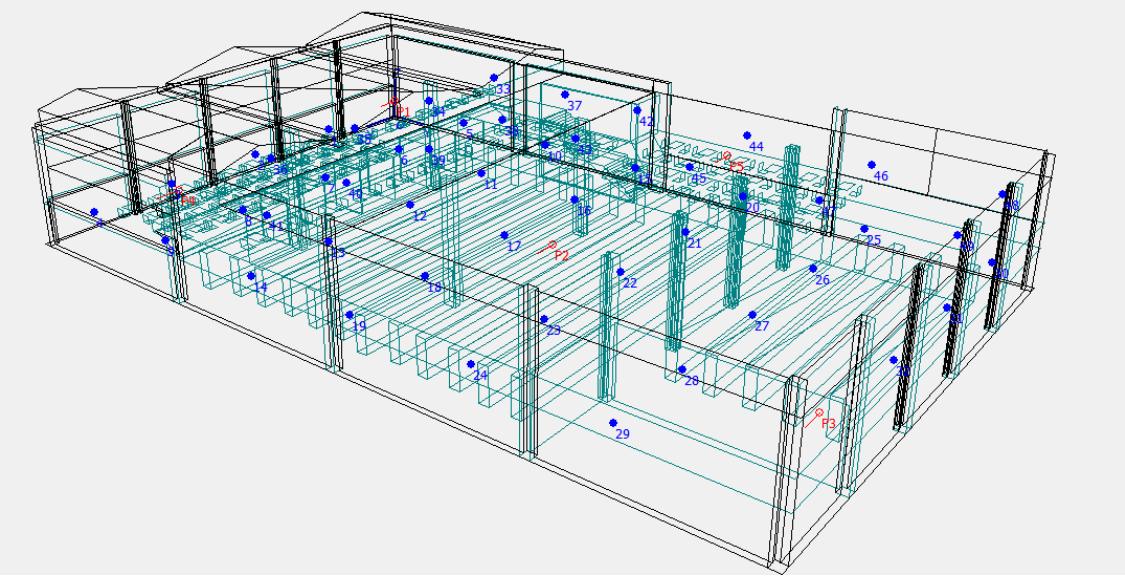
As zonas identificadas são: Acervo, Salão de Leitura, Mezanino de estudo. Essas se encontram associadas as posições de fontes e receptores (ver Tab. 4.2).

Tabela 4.2: Fontes e Receptores, para cada zona encontrada.

	Zona 1 (Salão de Leitura – S1 e S3)	**Zona 2 (Acervo – S2)**	**Zona 3 (Mezanino – S4)**
Receptores (Rn)	1- 2- 3- 4 – 17 - 18	5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15-16	19 - 20

A Fig. 4.8 apresenta o posicionamento dos pontos de fonte e receptor no modelo virtual. Os pontos de fonte S1 e S4 foram posicionados a 1,5 m acima do solo, enquanto os pontos S2 e S3 ficaram no mesmo nível do piso no qual se encontravam. Os pontos de receptores foram posicionados a 1,2 m acima do solo. Tais recomendações foram realizadas de acordo com a ISO 3382 – 2: 2017, garantido aproximações metodológicas e sistemáticas entre análise experimental e computacional, reduzindo a chance de erros.

Figura 4.8: Modelo geométrico, com posicionamento de receptores (R_n) e fontes (S_n).



4.2.3. Materiais – Absorção e Fator de Espalhamento

Apresentado as configurações geométricas para análise computacional, Sessão 4.2.1, a investigação dos materiais, etapa para validação acústica do modelo virtual, é fundamental para a resposta do campo acústico do mesmo, uma vez que parâmetros de reverberação, tais como EDT (*Early Decay Time*) e T (*Reverberation Time*), são numericamente dependentes do coeficiente de absorção (α). Estudos evidenciam maiores aproximações da resposta entre simulação computacional e análise experimental, desde que sejam fornecidas todas as características acústicas de cada superfície, o fator de espalhamento (δ_c) e coeficientes absorção (α) (GOMES; VORLÄNDER; GERGES, 2004).

As análises de dados foram conduzidas pela categorização das superfícies após inspeção visual, sendo considerados inicialmente somente os sistemas construtivos de fechamentos e revestimentos (ver Tab. 4.3). Para coeficientes de absorção de sistemas construtivos tradicionais apresentados nas diversas literaturas, pequenas são as distorções entre os coeficientes observados, o que não compromete as análises futuras, visto que apresentam tendências e comportamentos similares paras as faixas de frequências em análises, bandas de oitava de 125 Hz a 4 kHz. Por conseguinte, o fator de espalhamento se faz necessário no design acústico de salas e determinante para predições acústicas (VORLÄNDER; MOMMERTZ, 2000), sendo necessário atribuir a cada superfície seu respectivo coeficiente, dependendo das irregularidades de cada uma dessas. A Tab. 4.3 também apresenta os respectivos valores de espalhamento recomendados, segundo o manual do *software* ODEON (CHRISTENSEN, 2009).

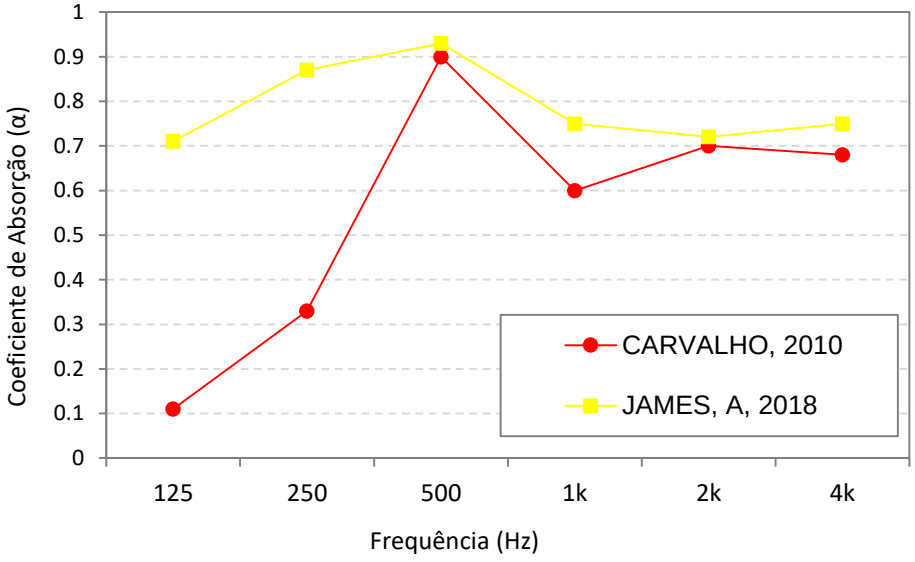
Tabela 4.3: Coeficiente de Absorção Sonora e Espalhamento dos materiais dos sistemas construtivos e de revestimento. (Continua)

Área (m²)	Material	125	250	500	1k	2k	4k	δ_c
2016,4	Piso Cerâmico (CARVALHO, 2010)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
1513,7	*Plasterboard on frame, 9.5 mm boards, 100 mm empty cavity* (COX; D'ANTONIO, 2005)	0,11	0,13	0,05	0,03	0,02	0,03	0,02
1191,3	*Plywood paneling, 1 cm thick* (COX; D'ANTONIO, 2005)	0,28	0,22	0,17	0,09	0,1	0,11	0,02
685,7	*Painted plaster surface* (COX; D'ANTONIO, 2005)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

616,4	*Smooth concrete, painted or glazed* (COX; D'ANTONIO, 2005)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,005
175,2	*Single pane of glass, 3 mm* (COX; D'ANTONIO, 2005)	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
91,02	*Plywood on battens fixed to solid backing* (COX; D'ANTONIO, 2005)	0,3	0,2	0,15	0,13	0,1	0,08	0,02
54,2	*22mm chipboard, 50 mm cavity filled with mineral wool* (COX; D'ANTONIO, 2005)	0,12	0,04	0,06	0,05	0,05	0,05	0,02
2,7	100% *absorbent*	1	1	1	1	1	1	

Outras superfícies investigadas apresentam uma flutuação entre coeficientes de absorção, variando de literatura para literatura. A exemplo dessa variação, o coeficiente referente a estantes de livros (ver Fig. 4.9), pouco referenciado na literatura, corresponde a cerca de 30% da área de superfície total, do qual se observa uma oscilação de valor em baixa frequência. Tal variabilidade de resultado entre parâmetros pode ser justificada, primeiramente, pela não exatidão na descrição das superfícies que compõem o recinto (CHRISTENSEN; NIELSEN; RINDEL, 2008). Deduz-se que essa diferença de resultado pode se apresentar devido ao material, ao volume de livros por acervo, tipo de estrutura, e outras características que possam influenciar diretamente sobre a absorção do material em questão.

Figura 4.9: Coeficiente de Absorção (α) para superfícies de acervo de livros, segundo a literatura consultada.



Para superfícies restantes com coeficientes de absorção "desconhecidos", tais como cadeira, mesa e outros (ver Tab. 4.4), fez-se necessário calcular previamente a resposta impulsiva da sala, a fim de testar os diversos valores de α apresentados pela literatura, uma vez

que são diversas as informações relacionadas a esses itens e compará-los com a análise experimental, através do método de "tentativa e erro", demandando um maior tempo para validação computacional do modelo geométrico, sem fazer uso de algoritmos genético, somente disponível em versões mais atuais do *software* ODEON, que possibilitam validar o modelo com exatidão questionável, variando coeficientes de absorção, a fim de se terem respostas impulsivas próximas ao ensaio experimental (CHRISTENSEN; KOUTSOURIS; RINDEL, 2014).

Tabela 4.4: Coeficiente de Absorção Sonora e Espalhamento para as demais superfícies observadas.

Material	125	250	500	1k	2k	4k	δ_c
Estante Livro (CARVALHO, 2010)	0,11	0,33	0,9	0,6	0,7	0,68	0,3
Chairs, lightly upholstered concert hall chairs, average.	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55	0,6
Cadeira de madeira, simples vazia, ou pequena mesa (BISTAFA, 2006)	0,01	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06	0,02

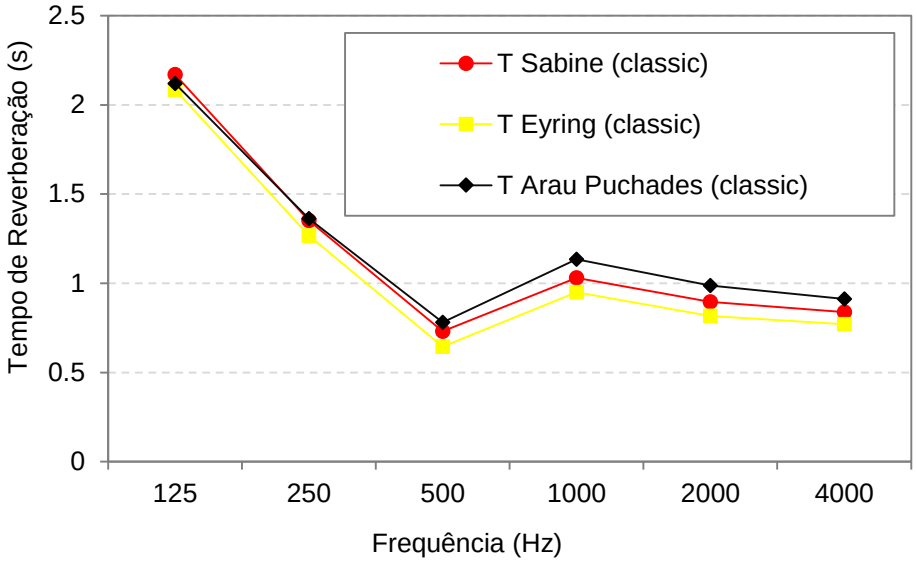
No entanto, há um discussão relacionada à "adequação" de dados de entrada desses coeficientes, de modo que os tempos de reverberação ou outros efeitos se assemelhem com exatidão às analises experimentais, uma vez que o objetivo da simulação computacional deve ser independente de fatores de ajuste, somente baseado nos dados físicos e bancos de dados com as propriedades do material, visto que se os dados corretos forem usados, a solução de problemas acústicos ainda assim será adequada (VORLÄNDER, 2010).

Como etapa inicial do processo de calibração do modelo computacional, a análise de parâmetros de estimativa rápida (*quick estimate*), a partir do *software* Odeon (CHRISTENSEN, 2009), permite obter os valores prévios para Tempo de Reverberação a partir das equações de Sabine, Eyring e Arau Puchades, assumindo a condição de campo difuso para a sala simulada (ver Fig. 4.10). É possível observar uma alta distorção entre valores propostos por estimativas numéricas, que desconsideram parâmetros de dispersão com a resposta obtida através de estimativas globais, evidenciando a importância dos coeficientes de espalhamento para a aproximação entre simulação computacional e experimentos.

Entretanto, somente a partir de uma análise que não considere a sala como campo difuso é possível obter valores aproximados à resposta impulsiva da mesma, e isto é feito através de estimativas globais (*global estimate*) (CHRISTENSEN, 2009), passando a considerar a

dispersão relativa a cada superfície da sala, sendo observada uma variação significativa entre métodos.

Figura 4.10: Análise Numérica para tempo de reverberação da sala analisada, considerando as equações de Sabine, Eyring e Arau-Pauchades.



Nessa fase de calibração, estimam-se parâmetros referentes à reverberação, como T_{20} e T_{30}, a fim de se obterem aproximações numéricas entre medições experimentais e etapa de simulação computacional, o que demandou um elevado tempo até alcançar os coeficientes de absorção e espalhamento mais adequados.

4.2.4. Calibração acústica do modelo base

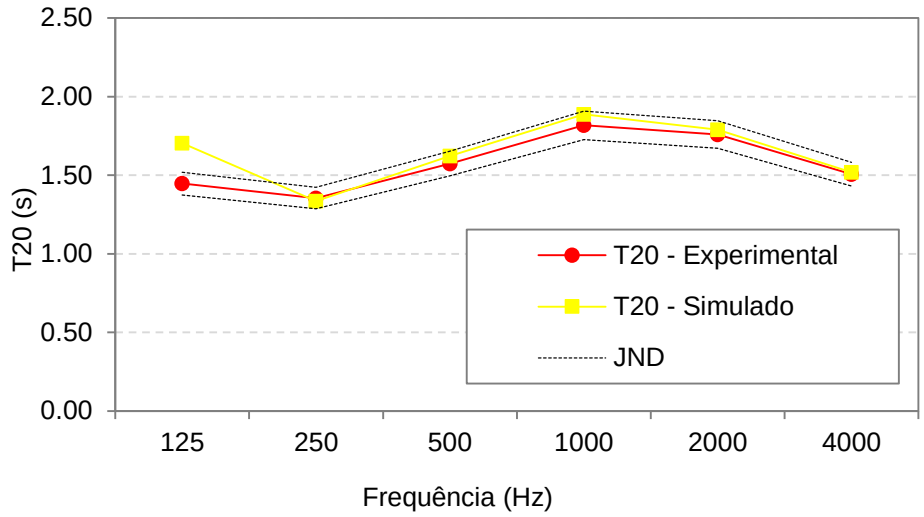
Como procedimento para validação acústica do modelo computacional adequado para as análises posteriores, essa etapa consiste na relação entre parâmetros medidos e simulados, a fim de garantir um erro médio, baseado nos valores reportados dentro do número limiar diferencial (JND) (ABNT, 2017; CHRISTENSEN, 2009).

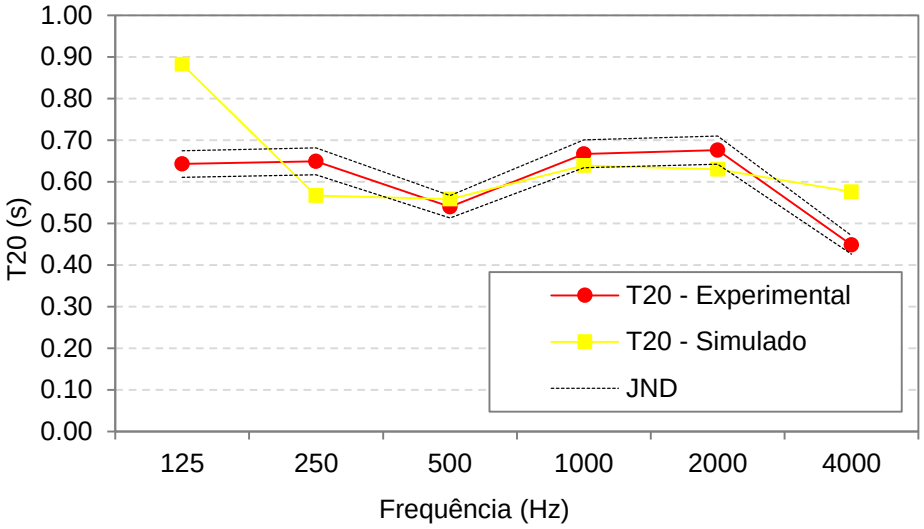
Logo, fez-se necessário analisar variações volumétricas, considerando reduções geométricas no mobiliário da biblioteca.

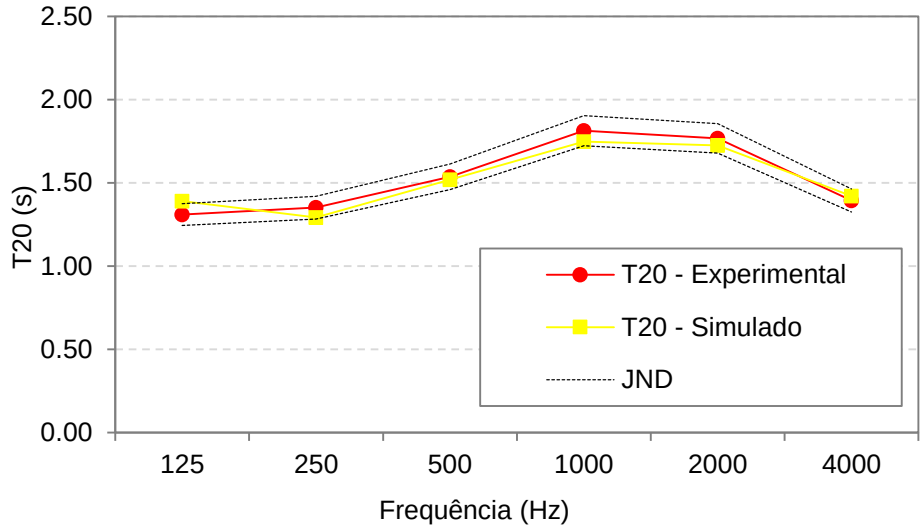
A partir dos diversos parâmetros obtidos nas simulações, existem grupos de grandezas que devem ser analisados, não sendo, entretanto, necessário calcular os valores de todos eles, mas apenas a análise de pelo menos uma grandeza (ABNT, 2017). Referente à característica física da sala, o erro médio global de parâmetro T_{20}, Fig. 4.11, considerando a resposta impulsiva observada nas zonas definidas anteriormente, a partir dos resultados experimentais

comparados ao modelo numérico, observa-se a variação de JND de 2%, para as frequências de 500 a 1000 Hz.

Figura 4.11: Gráficos de T_{20} nas frequências de 125 Hz a 4000 Hz, para as zonas Z1(a), Z2(b) e Z3(c).



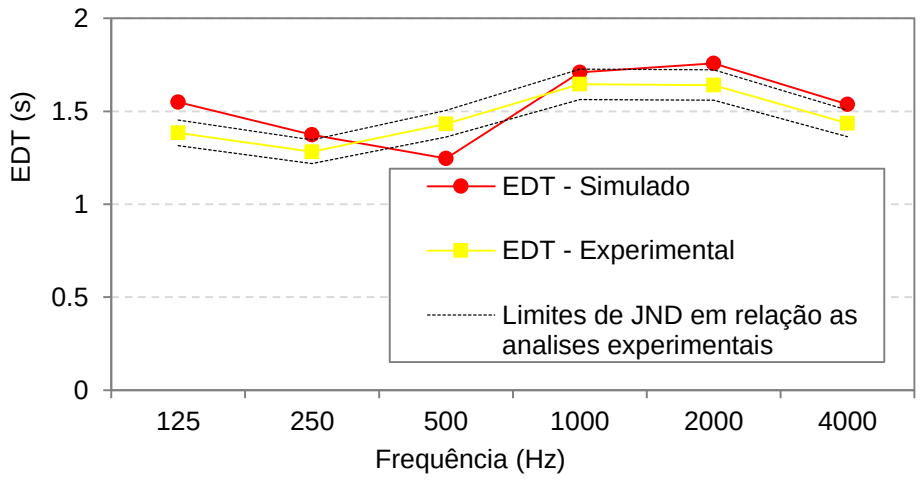




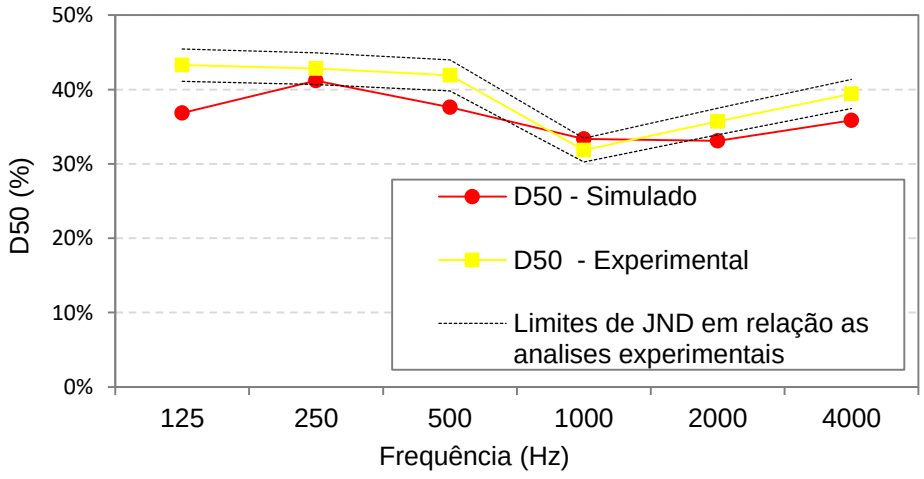
Distorções apresentadas em frequências inferiores a 500 Hz evidenciam a dificuldade em se obterem respostas coerentes e aproximadas à analise experimental em softwares que se baseiam em métodos híbridos de traçado de raios e fonte-imagem. Incertezas computacionais essas dadas pela não reprodução satisfatória de certos fenômenos característicos em frequências mais baixas.

Uma vez completo o ajuste para as características físicas da sala, é possível analisar outras grandezas, tais quais o Tempo de Decaimento Inicial (EDT), referente à reverberação percebida pelo ouvinte, em segundos, e a Definição (D_{50}) referente à clareza sonora percebida para a fala, em percentual. A Fig. 4.12, apresenta as respectivas médias totais dessas grandezas analisadas e comparadas à análise experimental, e seus respectivos intervalos de JND.

Figura 4.12: Média totais dos valores de EDT (a) e D_{50} (b) comparados aos respectivos valores medidos, nas frequências de 125 a 4000 Hz.



(a)



(b)

4.3. O IMPACTO DE DECISÕES DE *DESIGN* SOBRE PARÂMETROS DE CONFORTO ACÚSTICO

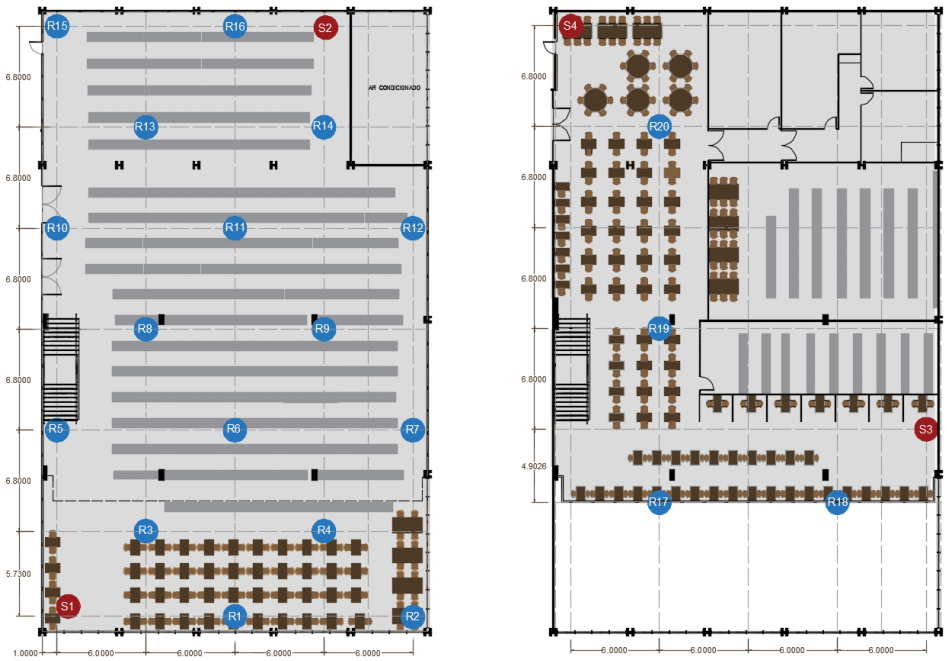
Caracterizado o modelo base, referente a aproximações entre o modelo virtual e análise experimental, é possível tomá-lo como base para possíveis reconfigurações do ambiente sob estudo, a fim de se investigar o impacto das decisões design interno do recinto sobre os parâmetros acústicos de salas.

4.3.1. Apresentação das configurações de reorganização espacial

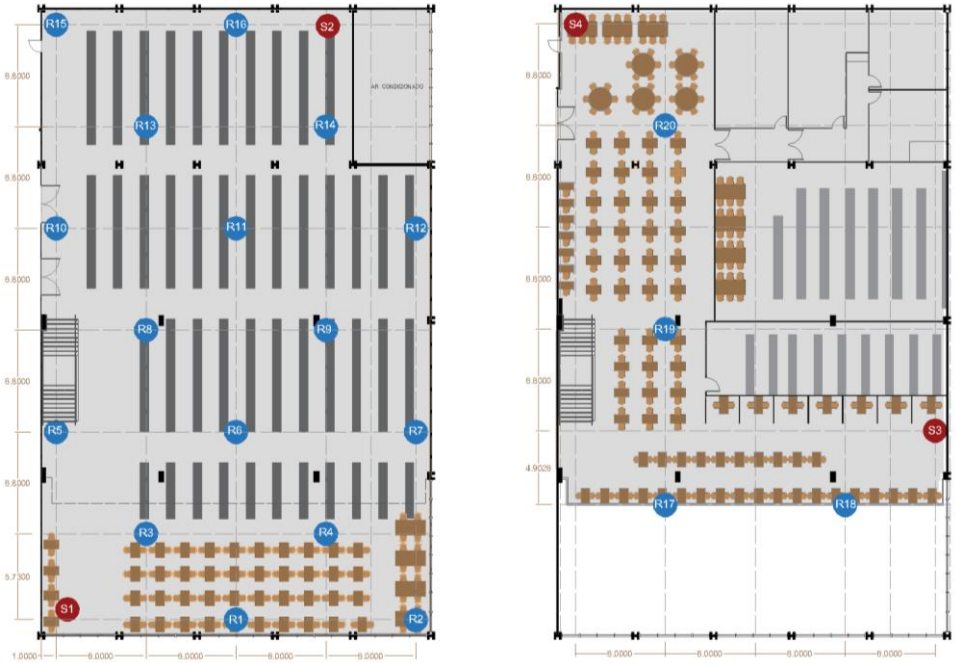
Caracterizada como ambiente *open-plan*, a biblioteca contemporânea é passível da flexibilidade de *layout*, o que possibilita, dentro da mesma, a criação de novos espaços. Partindo do pressuposto de que salas *open-plan* podem ser organizadas conforme a necessidade de uso, serão apresentadas propostas de reconfiguração de espaço interno, tomando como base organizações espaciais comumente usadas para modelos históricos de biblioteca.

As novas configurações propostas, representadas na Fig. 4.13, tomam como base o modelo M_0, previamente calibrado. As proposições aqui apresentadas consideram aproximadamente o número de superfície e todos os elementos usados no modelo original, a fim de garantir características da acústica geométrica, mantendo a confiabilidade dos resultados gerados.

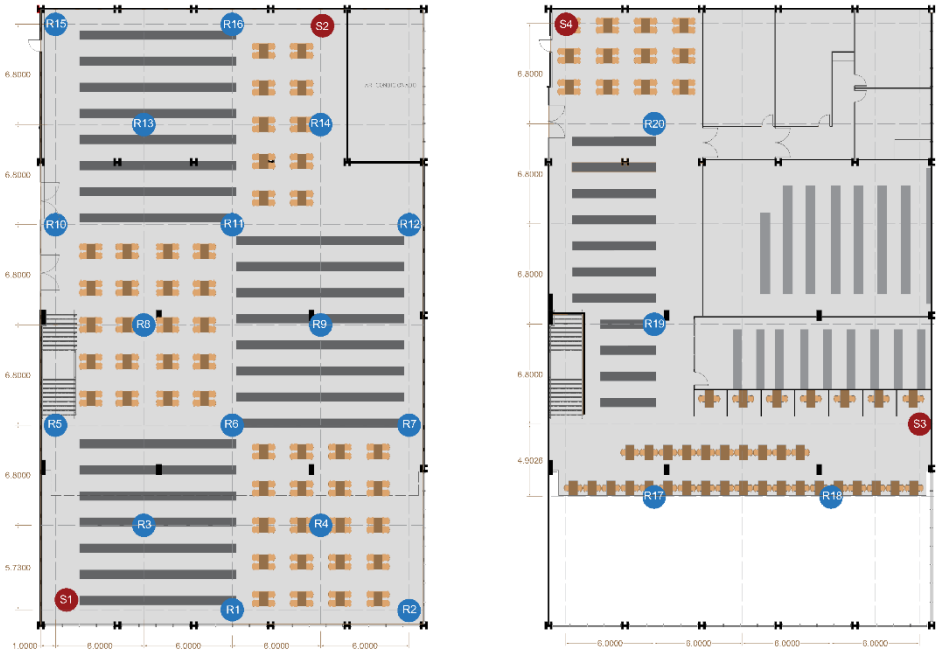
Figura 4.13: Plantas baixas da configuração base, M_0 (a), e das configurações propostas M_1 (b), M_2 (c), M_3 (d), e M_4 (e).



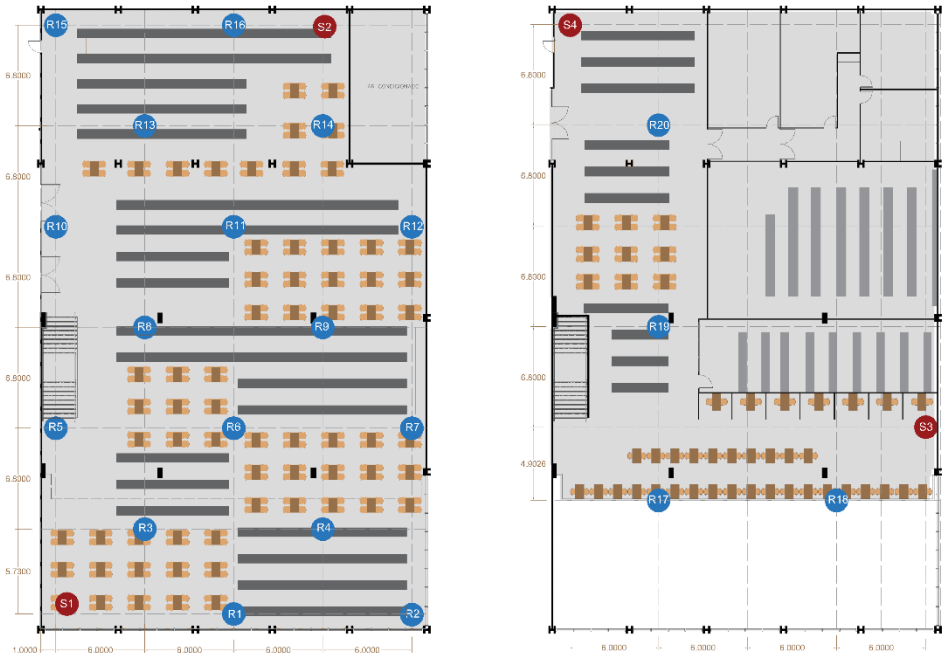
(a)



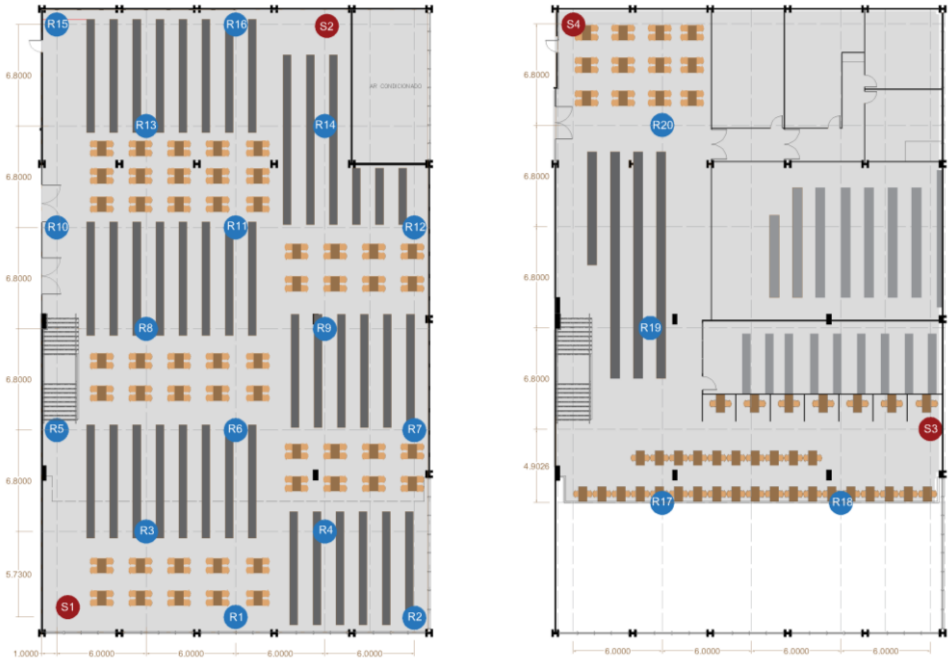
(b)


R15
R16
S2
R13
R14
R10
R11
R12
R8
R9
R5
R6
R7
R3
R4
S1
R1
R2
S4
R20
R19
S3
R17
R18

(c)


R15
R16
S2
R13
R14
R10
R11
R12
R8
R9
R5
R6
R7
R3
R4
S1
R1
R2
S4
R20
R19
S3
R17
R16

(d)



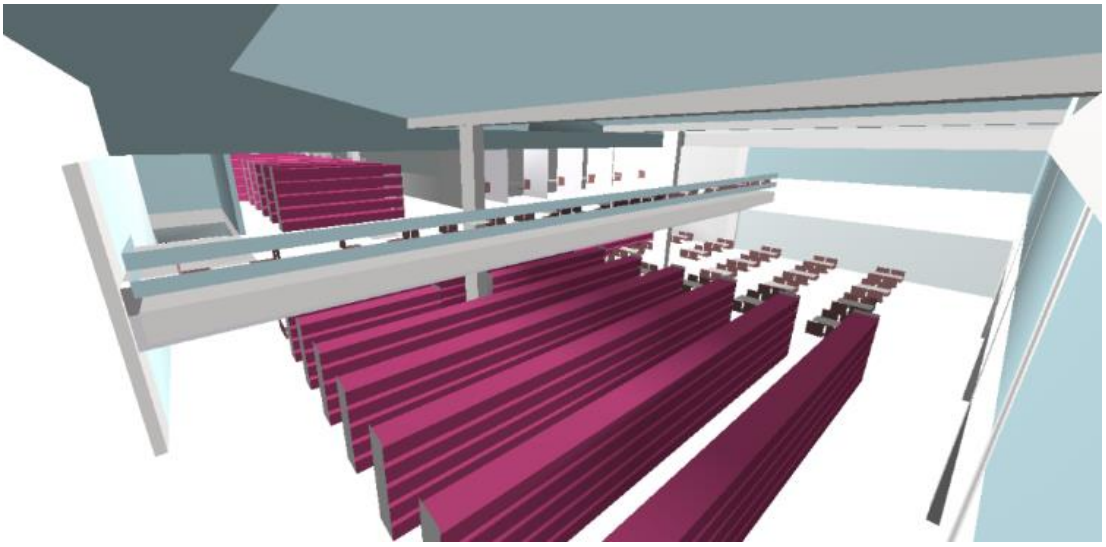
(e)

Configuração 1 (M_1): Modelo similar a M_0, Fig. 4.13 (b), com área de acervo isolada, apenas alterando a orientação das estantes de livros, direcionando-as para as áreas de estudo, e possibilitando a circulações entre blocos de acervo. Apresenta espaços para uso bem distintos e segregados, assemelhando-se ao modelo tradicional de biblioteca, como a proposição de Carnegie. A Fig. 4.14, apresenta o modelo virtual no *software* ODEON para análise da proposição M_1.

Figura 4.14: Modelo virtual para a configuração M_1

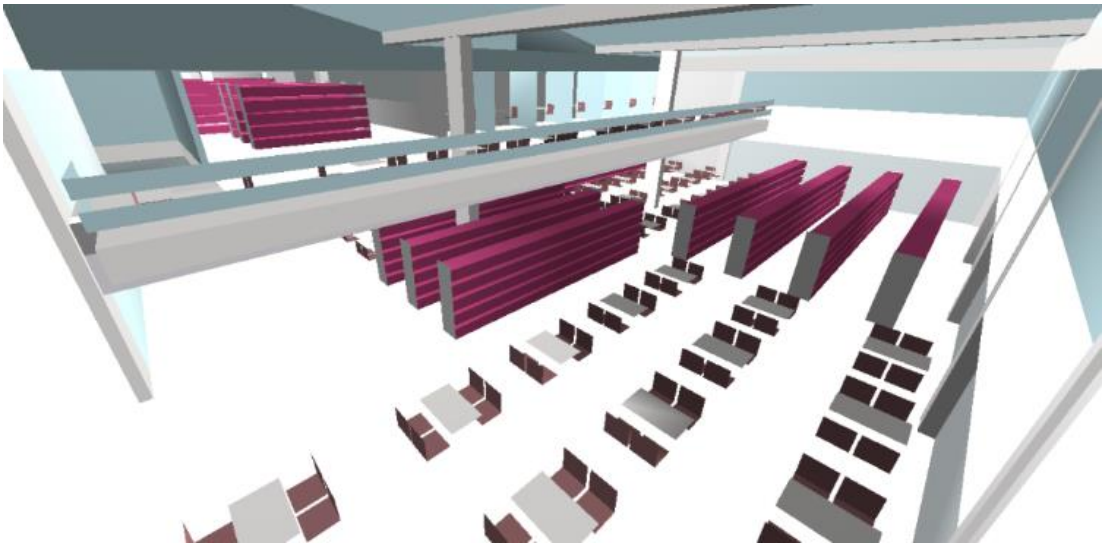
Configuração 2 (M_2), Fig 4.13 (c): Apresenta a divisão do acervo em 4 blocos, o que possibilita a criação de 5 áreas destinadas a estudo, alterando sua função e criando pequenas subdivisões em seu interior, “restritas” por blocos de acervo, criando áreas para leituras especializadas, setorizadas por área de conhecimento. A Fig. 4.15, apresenta o modelo virtual no *software* ODEON para análise da proposição M_2.

Figura 4.15: Modelo virtual para a configuração M_2



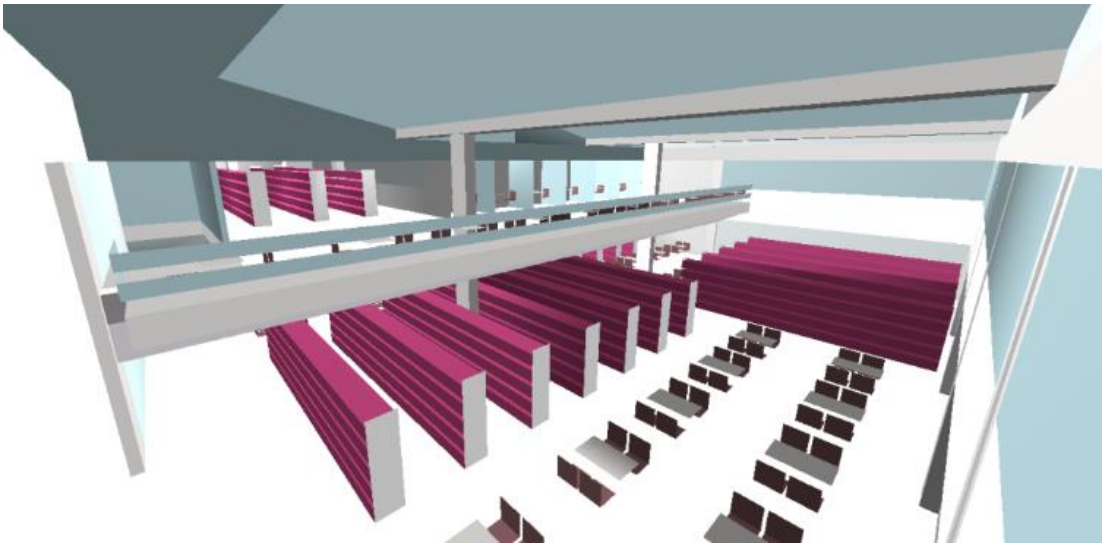
Configuração 3 (M_3), Fig. 4.13 (d): Partindo do princípio das bibliotecas contemporâneas, onde se criam amplos espaços visíveis e sociáveis, seja para trabalhar ou estudar, de circulação livre e fluida entre suas dependências e acervo, redistribui-se o acervo ao longo da sala, criando pequenos espaços para transeuntes, divididos por 8 blocos de acervo e criando-se 7 áreas de convivência, com acesso integrado entre as mesmas. A Fig. 4.16, apresenta o modelo virtual no *software* ODEON para análise da proposição M_3.

Figura 4.16: Modelo virtual para a configuração M_3



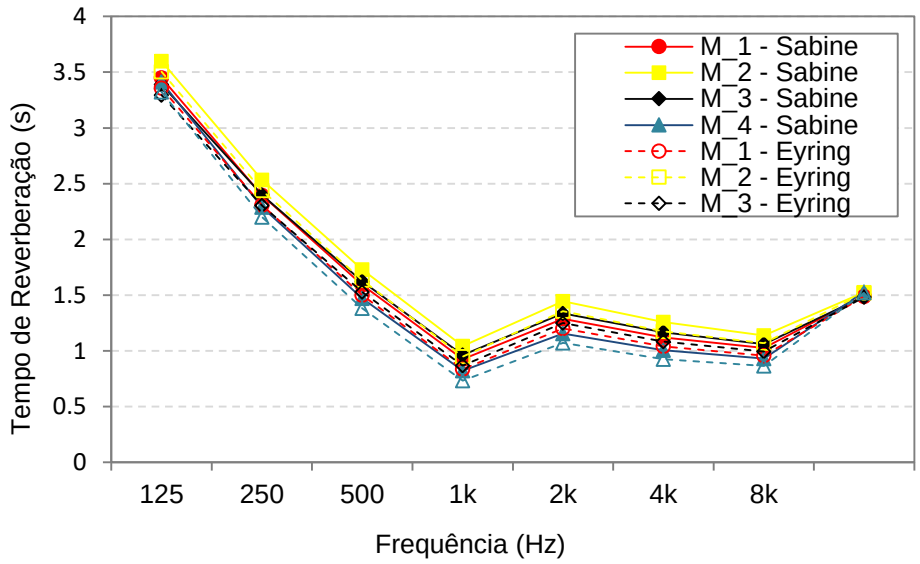
Configuração 4 (M_4), Fig. 4.13 (e): Modelo similar ao proposto em M_3, entretanto alterando a orientação das estantes de livros, direcionando-as para as áreas de estudo, possibilitando, assim, maior circulação entre as áreas de convivência criadas. A Fig. 4.17, apresenta o modelo virtual no *software* ODEON para análise da proposição M_4.

Figura 4.17: Modelo virtual para a configuração M_4



Definidas as configurações dos modelos, verificaram-se os tempos de reverberação (T), considerando as equações de Sabine e Eyring, para cada uma das proposições, como garantia de que não havia distorções de números de superfícies e variações de coeficientes de absorção e espalhamento entre os modelos, conforme observado na Fig. 4.18.

Figura 4.18: Valores de T, considerando as equações de Sabine e Eyring para os modelos propostos.



Ainda que sejam consideradas todas as características físicas das superfícies entre os modelos, a proposição de diferentes organizações tende a influenciar diretamente sobre o tempo de reposta impulsiva da sala e o T numérico.

Para estudo do efeito referente a cada uma destas novas configurações de espaço, foram calculados parâmetros acústicos relacionados às propriedades físicas da sala e às percepções dos ouvintes, como descrito a seguir.

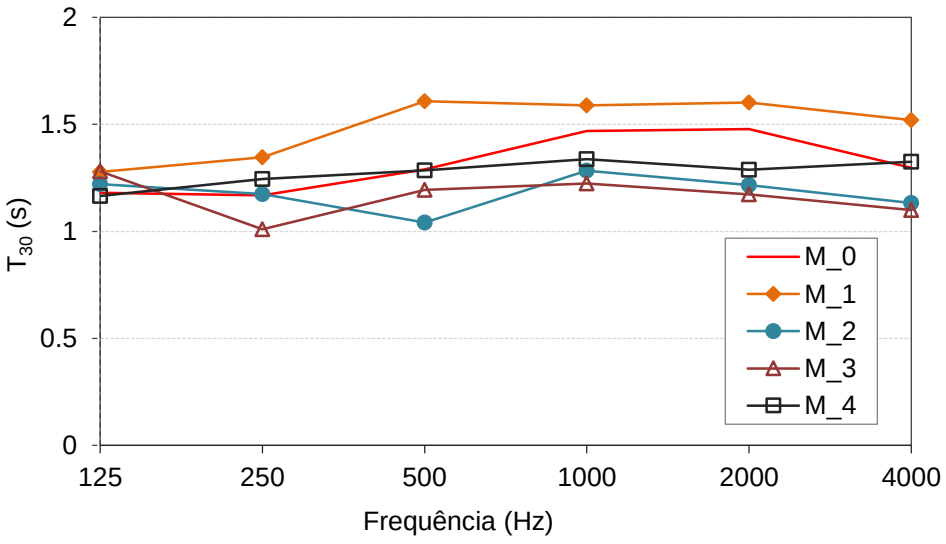
4.3.2. Análise das configurações propostas

A seguir serão apresentados os resultados dos parâmetros simulados para as configurações de modelo propostas. A partir dos resultados obtidos na simulação da configuração M_0, foi analisado o desempenho de cada uma das configurações propostas, através dos dados obtidos pela resposta impulsiva para cada ponto receptor relacionado ao posicionamento, e através de mapeamento acústico em malhas de alta resolução, uma vez que tal ferramenta se faz efetiva para a análise e comparação dos parâmetros acústicos descritos numericamente com seu comportamento espacial para as diversas proposições de *layout* do recinto.

4.3.2.1 Tempo de Reverberação, T

Sendo o tempo de reverberação (T_{30}) o parâmetro referente às características físicas da sala, a Fig. 4.19 refere-se à média total dos pontos de fonte (S_n) para cada um dos modelos investigados, a fim de se analisar a resposta acústica da mesma.

Figura 4.19: Valores de T_{30}, considerando médias dos valores obtidos para cada um dos modelos simulados.

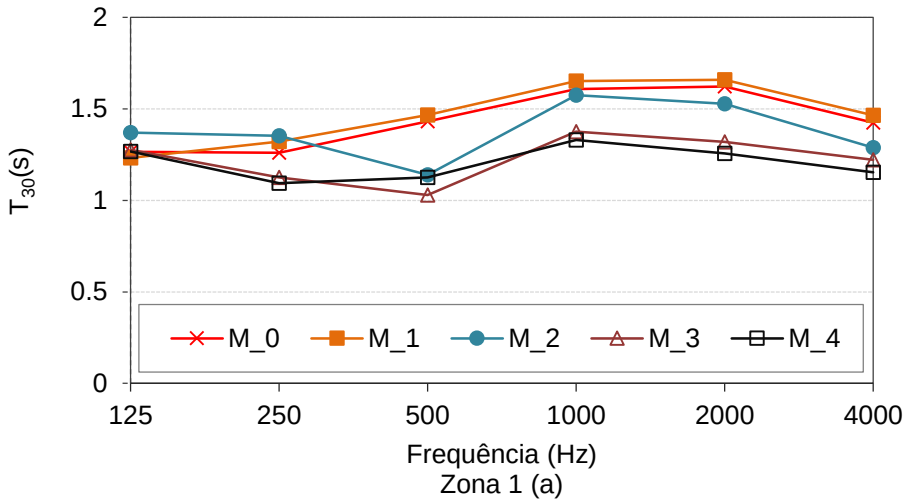


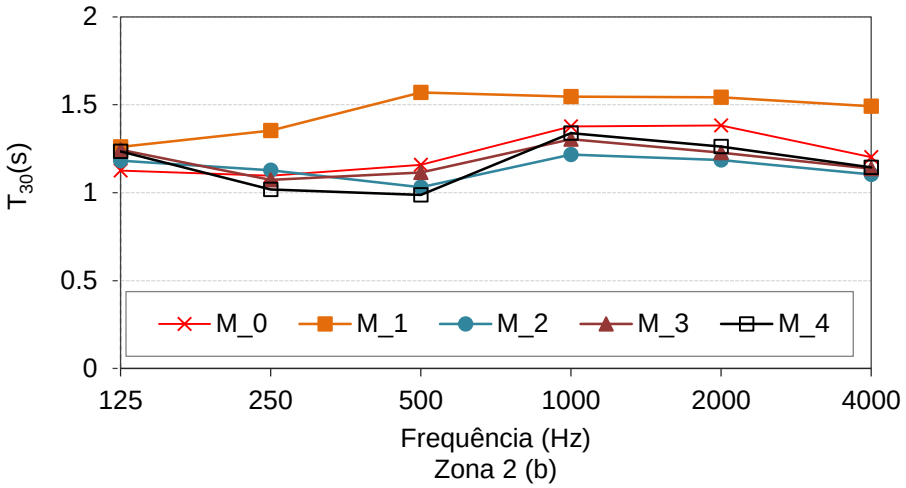
Distorções significativas em M_1 são observadas na faixa de frequência de 500 Hz a 4 kHz, se comparado com modelo M_0. Evidencia-se que tal estratégia incrementa aproximadamente 0,3 s, ao tempo necessário para decaimento sonoro total da sala, o que corresponde a cerca de 25% do JND em 500 Hz.

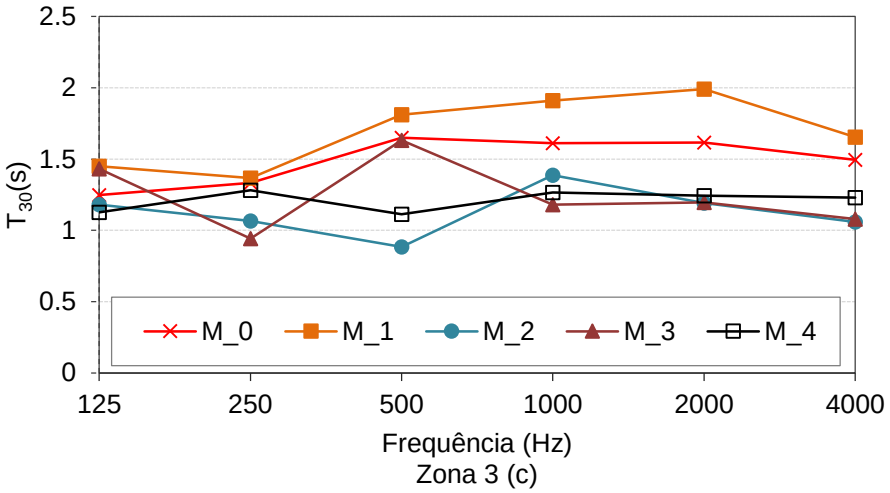
Para M_2 e M_3, valores menores de T_{30} na faixa de frequência de 250 Hz a 4 kHz são observados, tomando por base M_0. Entretanto, para M_2, foi maior o decaimento de T_{30} em 500 Hz: 0,29 s, correspondendo a 23% do JND. Para M_4, menores variações foram observadas, com T_{30} em 500 Hz aproximadamente igual a M_0.

Para os modelos M_2 e M_3, verifica-se uma tendência para com os valores do tempo de reverberação, se comparado com as análises através das equações citadas. Essas características ratificam que o comportamento acústico do recinto é diretamente influenciado pela distribuição de superfícies absorvedoras e o volume de espalhamento ao longo da mesma, conforme observado por Bistafa et al. (2000), somado ainda a orientação das estantes, dispostas no mesmo sentido em ambos os modelos. Logo, para redução do tempo de reverberação pode-se tirar proveito do próprio mobiliário interno. A Fig. 4.20 apresenta os valores de T_{30} para cada uma das zonas anteriormente identificadas.

Figura 4.20: Valores de T_{30}, considerando médias totais por receptor, para cada um dos modelos simulados.







Para T_{30} nas zonas que apresentam os mesmos sistemas construtivos, observa-se para a zona 1, Fig. 4.20 (a), menores variações em M_1, e M_2 para faixas de frequência de 1 a 4 kHz, se comparado a M_0, sendo em 500 Hz o decréscimo de T_{30} correspondente a 32% do JND para M_2. Os modelos M_3 e M_4 apresentam para a zona 1 maiores flutuações para todas as faixas de frequências estudadas, o que evidencia que a distribuição de um volume de absorção ao longo da sala pode contribuir para o decréscimo do tempo de reverberação, se comparado à maior concentração do volume de absorção em uma única área (M_2) ou para nenhuma absorção (M_0 e M_1). Em M_1, variações significativas em T_{30} são observadas para as zonas 2 e 3, Fig. 17 (b) e (c), respectivamente, considerando o rearranjo do acervo em Z2.

Para zona 2, Figura 4.20 (b), reduções de aproximadamente 8% do JND são observadas em M_2, M_3 e M_4 a 1 kHz. Esse decréscimo em T_{30} indica maior absorção por parte das

superfícies absorvedoras (acervo) para áreas acusticamente afetadas por sistemas construtivos acusticamente reflexivos.

Na zona 3, Figura 4.20 (c), verificou-se a maior flutuação de T_{30} entre modelos, ainda que observado um decaimento no tempo de reverberação para M_2, M_3 e M_4. Para essa zona, é possível observar que para a frequência de 500 Hz, a variação de T_{30} refere-se mais à distribuição de superfícies absorvedoras ao longo da zona do que à orientação da mesma, como observa-se na comparação entre M_2 e M_3.

Observa-se haver uma tendência relativa para o acréscimo do tempo de reverberação quando há um único bloco de absorção, e esta tende a variar conforme a orientação das superfícies de absorção. Entretanto, esse acréscimo pode ser justificado pelo mascaramento da média de alguns valores elevados de receptor. Outra justificativa para esse comportamento pode ser dada pelo método de cálculo utilizado pelo software e sua incerteza.

Considerando a resposta percebida de T_{30} pelo receptor (R_n), para frequências de 500 Hz e 1 kHz, verificam-se distorções que possivelmente mascaram as médias totais apresentadas anteriormente. Nos gráficos das figuras 4.21 a 4.25, é possível observar como a distribuição espacial de elementos ao longo da sala pode influenciar diretamente sobre a resposta perceptível do mesmo, considerando um receptor (R_n) qualquer.

Na Fig. 4.21 (a) e (b), para M_0, observa-se maior distorção de T_{30} para receptores situados na zona Z2, receptores R7 à R16, uma vez que esses se encontram situados entre as superfícies de verticais do acervo. Para esta disposição observa-se ainda menores valores de T_{30} para emissão do sinal-ruído referente a fonte S2, essa característica se justifica pela alta densidade de superfícies verticais absorvedoras locadas em uma única zona próximo a fonte.

Na Fig. 4.22, o gráfico (a), para o modelo M_1, apresenta maior aumento do T_{30} em 500 Hz, considerando somente a alteração das superfícies verticais, mantendo o acervo em uma única área, principalmente para os receptores de R7 a R16. Essa flutuação é ainda maior considerando a emissão sonora da fonte S2. Já para outras fontes e receptores, é observada uma menor variação do parâmetro analisado.

Para tal comportamento, é possível concluir que a alta concentração de superfícies verticais absorvedoras, o próprio acervo acaba por funcionar como barreira acústica, entretanto, dependendo diretamente da sua orientação ao longo da sala.

Para as demais configurações propostas, M_2, M_3 e M_4, Figuras 4.23, 4.24 e 4.25, respectivamente, observa-se um decréscimo de T_{30} por receptor, para todas as relações de fonte.

Em M_2 observa-se um maior decaimento no tempo de reverberação, considerando S2, para todos os receptores. Para M_3, a distribuição apresentada reduziu de modo uniforme T_{30}

sem criar pontos com excesso de absorção, sendo possível observar ainda a relação existente entre a distribuição de superfícies absorvedoras ao longo da sala e a flutuação do tempo de reverberação total na sala, conforme evidenciado anteriormente. Em M_4, somente a alteração na orientação de acervo, comparado ao modelo M_3, apresentou uma distorção maior de valores entre os receptores analisados, logo, a distribuição de superfícies verticais absorvedoras pelo recinto, e a orientação do mesmo, apresenta-se como um fator a ser considerado durante a proposição de espaços.

Figura 4.21: Valores de T_{30}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_0, nas frequências de 500 Hz (a) e 1 kHz (b).

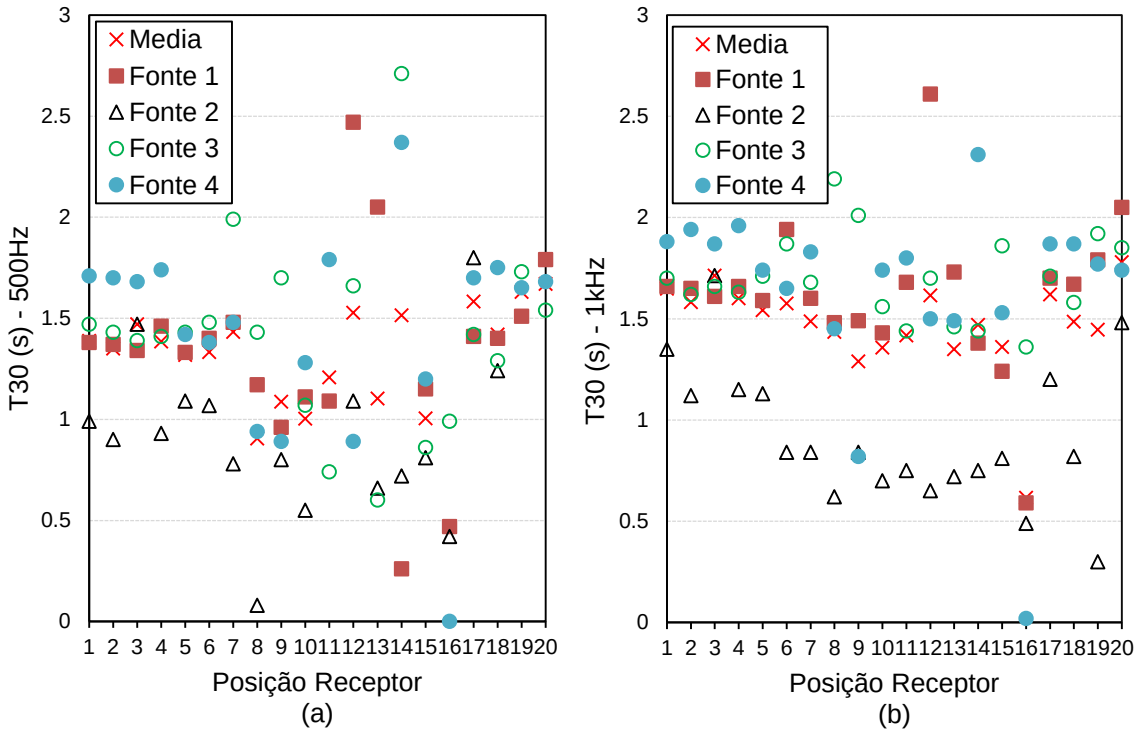


Figura 4.22: Valores de T_{30}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_1, nas frequências 500 Hz (a) e 1 kHz (b).

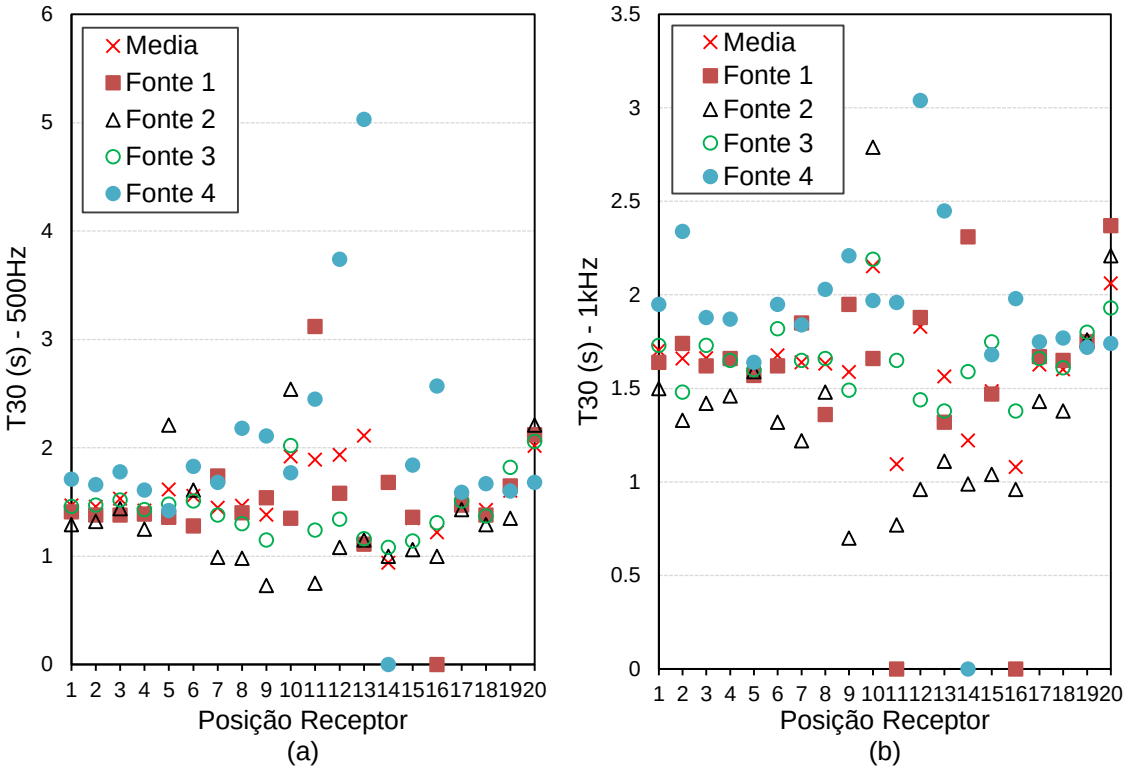


Figura 4.23: Valores de T_{30}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_2, nas frequências de 500 Hz (a) e 1 kHz (b).

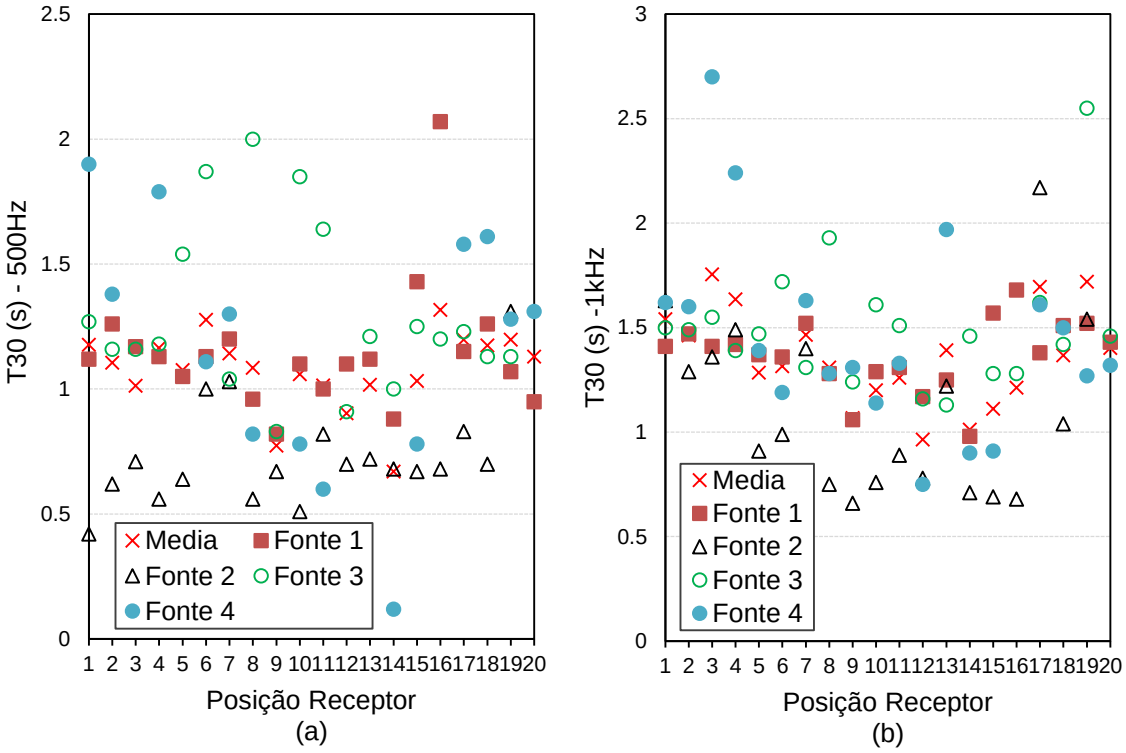


Figura 4.24: Valores de T_{30}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_3, nas frequências de 500 Hz (a) e 1 kHz (b).

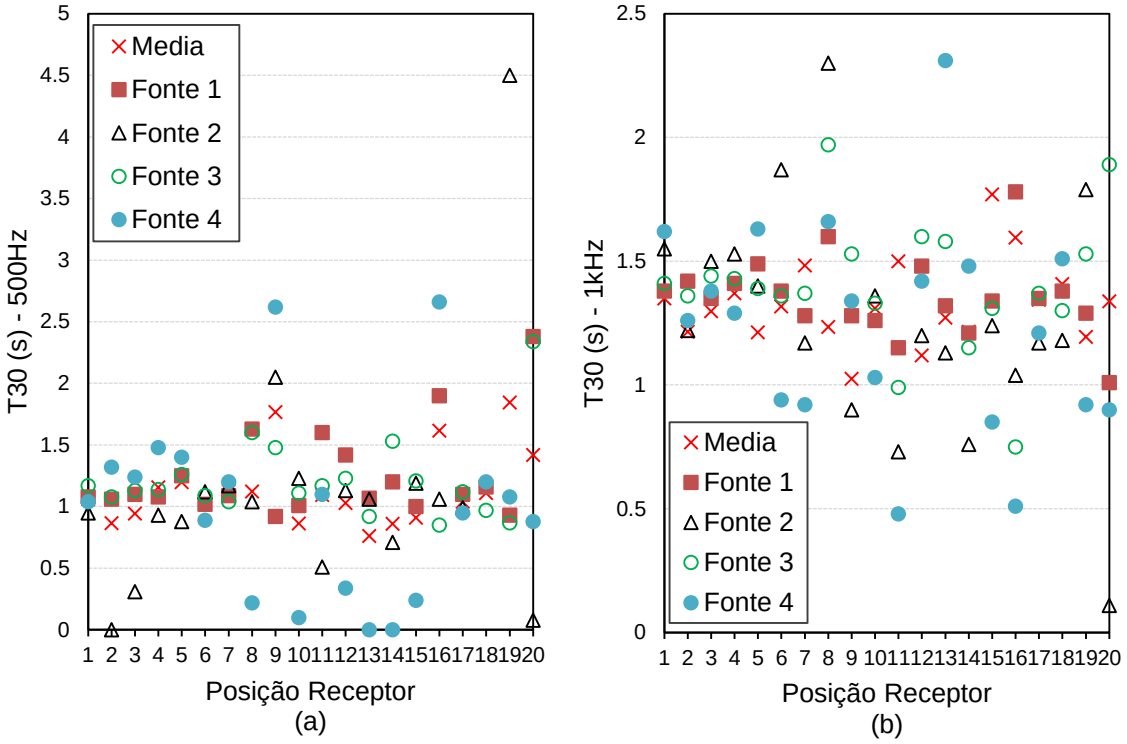
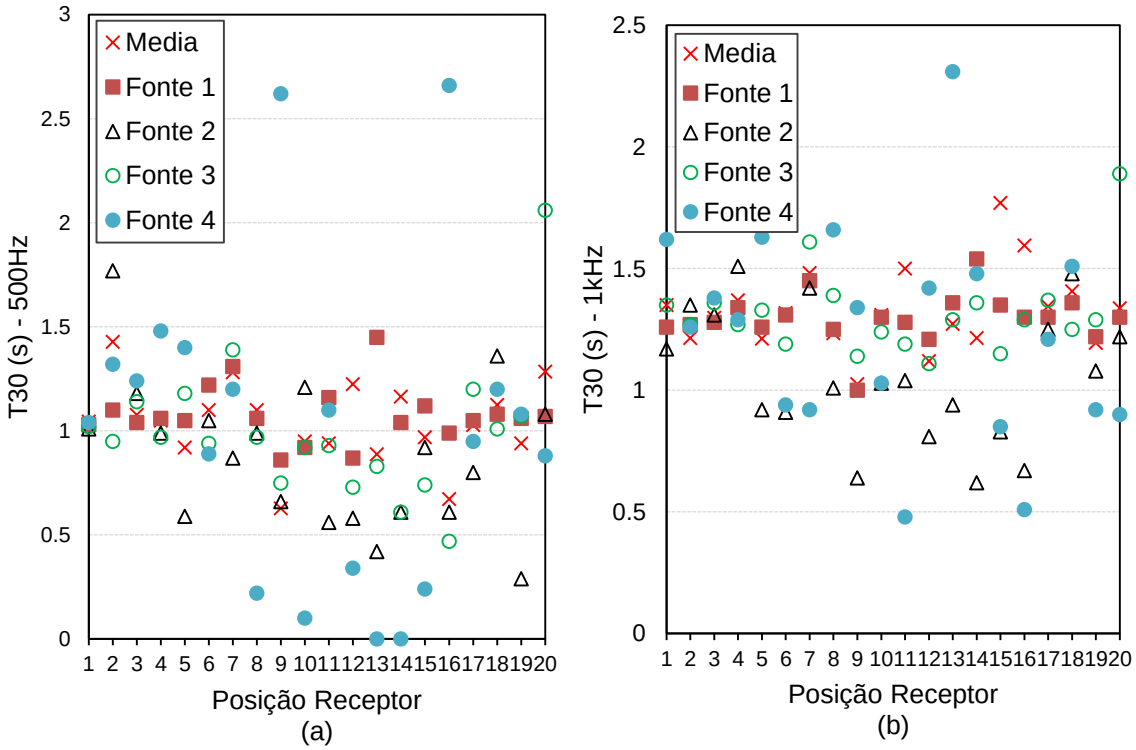


Figura 4.25: Valores de T_{30}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_4, nas frequências de 500 Hz (a) e 1 kHz (b).



Com base em observações feitas é possível concluir que o espalhamento sonoro de uma superfície, para sala vazia na presença de mobiliário, é fator fundamental na resposta impulsiva

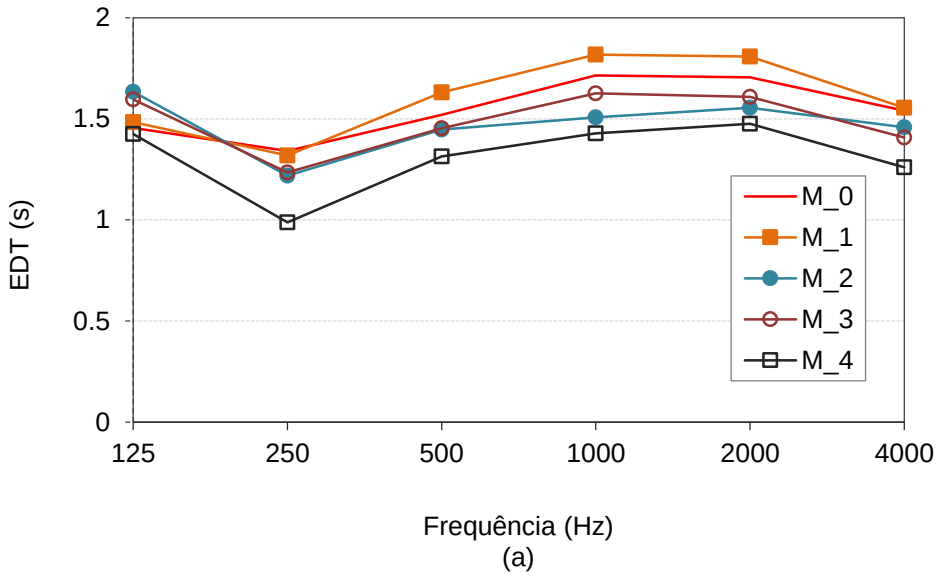
da sala e no design acústico da mesma conforme evidenciado em estudos anteriores por BISTAFA et al. (2000) e VORLÄNDER e MOMMERTZ (2000). E, considerando o volume de espalhamento das superfícies, como evidenciado nos modelos M_0 e M_1, há uma maior concentração de superfícies difusoras por uma única área, essas não necessariamente influenciam diretamente sobre os valores de T_{30}. Logo, confirmam-se os experimentos de Fitzroy (1959) e Bistafa et al. (2000), onde se pode observar que, para salas onde há uma distribuição não uniforme de superfícies absorvedoras, como apresentado em M_2, M_3 e M_4, principalmente se essas se localizarem em um plano vertical.

Destaca-se ainda que previsões numéricas de T tendem a sofrer maiores flutuações para cada disposição de superfície absorvedora no recinto, logo, a reposta impulsiva da sala em ensaios experimentais, tende a ser diferente do que a apresentada nas equações para Tempo de Reverberação.

4.3.2.2 Tempo de Decaimento Inicial, EDT

Sendo o Tempo de Decaimento Inicial (EDT) referente às reflexões iniciais e diretamente relacionado à reverberação percebida pelo ouvinte, contribui na impressão sonora direta, e acaba sendo um importante parâmetro a ser analisado dada a sua influência a inteligibilidade da fala (VORLANDER, 2008). A Fig. 4.26, apresenta a média total para fontes sonoras (S_n), para cada um dos modelos propostos.

Figura 4.26: Valores de EDT, considerando as médias dos valores obtidos para cada um dos modelos simulados.



(a)

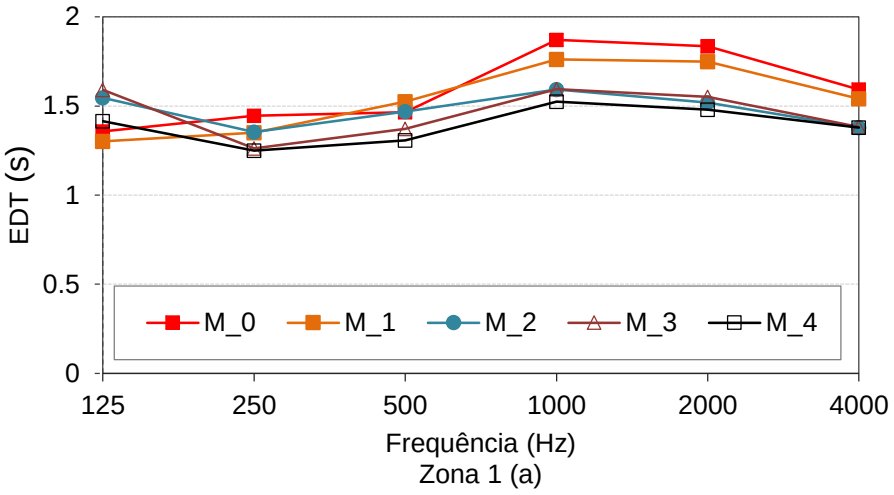
Observando a Fig. 4.26, nota-se que a configuração proposta para M_1, considerando somente a alteração na orientação do acervo, tende a aumentar os valores de EDT em relação à configuração M_0 para frequências de 500, 1000 e 2000 Hz. Tal variação é de aproximadamente 0,18 s na faixa de 500 Hz, cerca de 12% do JND. Para M_2 e M_3, valores menores aproximados de EDT são observados para a frequência de 500 Hz, sendo para 1000 e 2000 Hz, maiores flutuações observadas. Em M_4, menores valores de decaimento inicial são percebidos em comparação às outras configurações, apresentando 1,35 s, uma variação de 7% do JND se comparado a M_0. Análises prévias dos valores globais de EDT demonstram uma tendência na variação de valores, considerando as alterações propostas, essa influenciando diretamente na percepção do receptor, uma vez que afeta a fração de energia sonora inicial. Logo, análises preliminares sobre valores globais podem concluir que as disposições das superfícies verticais influenciam sobre os decaimentos iniciais percebidos pelo receptor Rn, uma vez que essas podem funcionar como barreiras para emissões diretas.

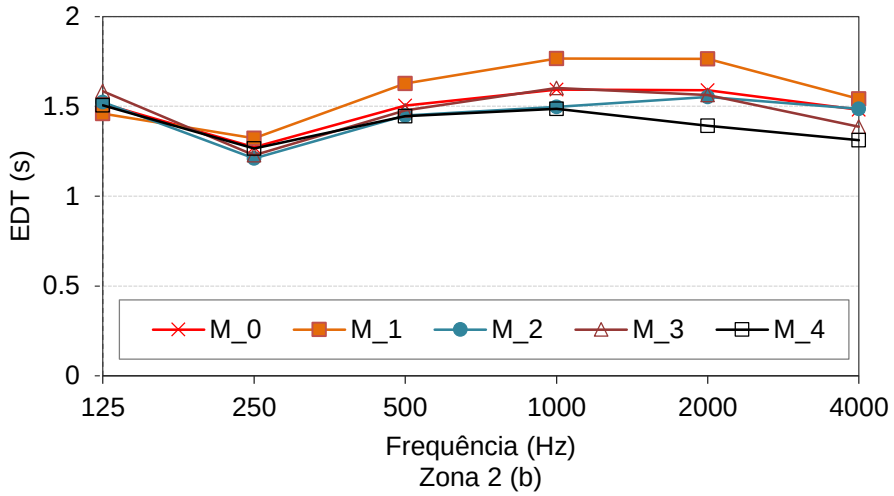
Considerando as características físicas de cada zona apresentada anteriormente, e a influência sobre os receptores, a Fig. 4.27 apresenta valores de EDT para cada uma dessas zonas, nas frequências de 125 a 4000 Hz. Na Zona 1, Fig. 43 (a), o modelo M_0 e M_1 apresentam maiores valores de EDT, considerando que ambos têm a mesma configuração de layout, a diferença observável entre eles tende a ser resultado do reposicionamento do acervo. A configuração M_2 apresenta valores aproximados a M_0 em 500 Hz, o que indica que independente da nova proposta de layout para essa zona, o reposicionamento de acervo em Z1 pouco influência sobre o decaimento da energia sonora inicial da mesma. Configurações M_3 e M_4 apresentam significativa redução no tempo de decaimento inicial, considerando a reconfiguração de layout proposta.

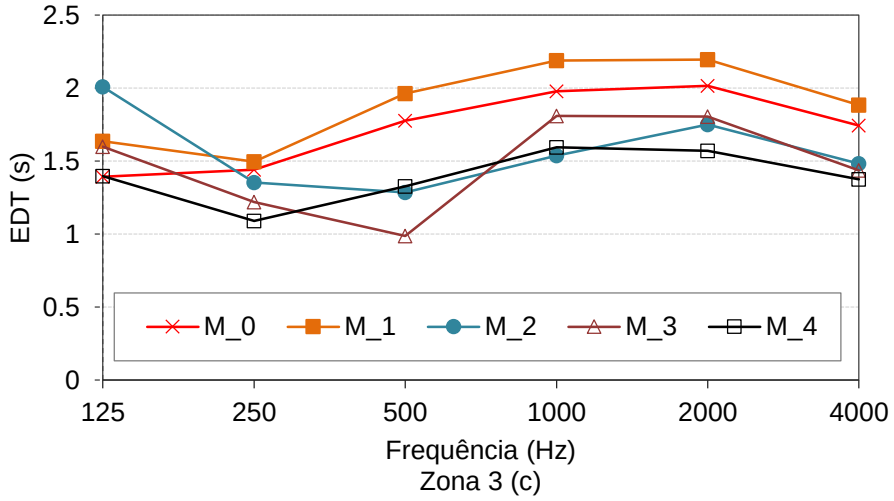
Para a zona 2, Fig. 4.27 (b), maiores variações de EDT em todas as faixas de frequência são observadas na configuração M_1 se comparado a outros modelos. Demais configurações M_0, M_2, M_3 e M_4 apresentam valores similares para EDT, seguindo a mesma tendência para todas as frequências.

Maiores distorções são apresentadas na zona 3, Fig. 4.27 (c), perceptíveis reduções no tempo de decaimento inicial é observado para M_2, M_3 e M_4, sendo em M_3 o maior decaimento observado de cerca de 45% de JND se comparado ao modelo M_0.

Figura 4.27: Gráfico para valores de EDT, para as zonas Z1(a), Z2(b) e Z3(c), considerando medias totais por receptor, para cada um dos modelos simulados.







Considerando a análise por receptor, (ver Figura 4.28 a 4.32) é possível analisar individualmente a influência das características físicas próximas a cada receptor, uma vez que essa relação é fundamental para reflexões iniciais.

Para a proposição M_0, Figura 4.28 (a) e (b), observa-se uma flutuação considerável para os receptores em análise. Para as fontes S1, S3 e S4, considerando que essas estão distantes das superfícies verticais absorvedoras, acabam por sofrer influência direta das superfícies de fechamento do recinto, logo, nesses se verificam maiores valores dado a influência direta das superfícies de fechamento do recinto estas altamente reflexivas. Para valores de EDT referentes a fonte S2, menores flutuações são observadas, essas decorrentes da distância e posicionamento do receptor entre superfície vertical.

Para o modelo M_1, Figura 4.29 (a) e (b), um comportamento similar a M_0 foi observado, entretanto maiores flutuações em valores da fonte S1 puderam ser observados. Para essas configurações observa-se que a concentração de superfícies verticais em uma única área pouco altera na distribuição uniforme de EDT, tal comportamento similar é observado para a proposta M_2, Figura 4.30 (a) e (b) considerando que mesmo com a distribuição de acervo sobre área total, a grande densidade de superfície vertical ainda contribui sob a flutuação não uniforme do tempo de decaimento inicial.

Maior distribuição do tempo inicial de decaimento sonoro é observado para proposição M_3, Figura 4.31 (a) e (b), considerando todas as fontes, logo o tempo de decaimento inicial tende a reduzir igualmente ao tempo de reverberação uma vez que a distribuição de acervo ao longo da sala em pequenos blocos tende a influenciar sob a distância de superfícies e pontos.

Para o modelo M_4, Figura 4.32 (a) e (b), observa-se um decaimento nos valores de EDT, entretanto, maior flutuação entre os resultados são apresentados por receptor. Logo, evidencia-se a influência da orientação das superfícies absorvedoras sobre a reverberação percebida pelo usuário.

Figura 4.28: Gráfico para valores de EDT, considerando a posição do receptor (Rn) para o modelo M_0, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).

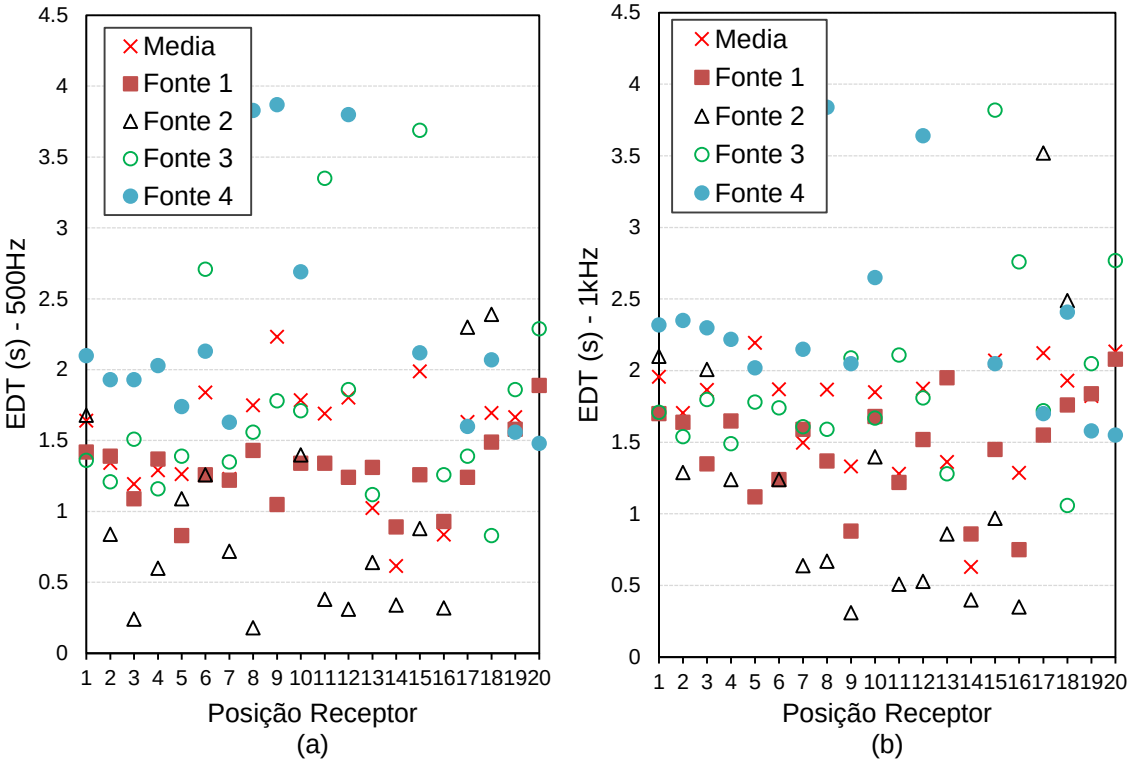


Figura 4.29: Gráfico para valores de EDT, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_1, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).

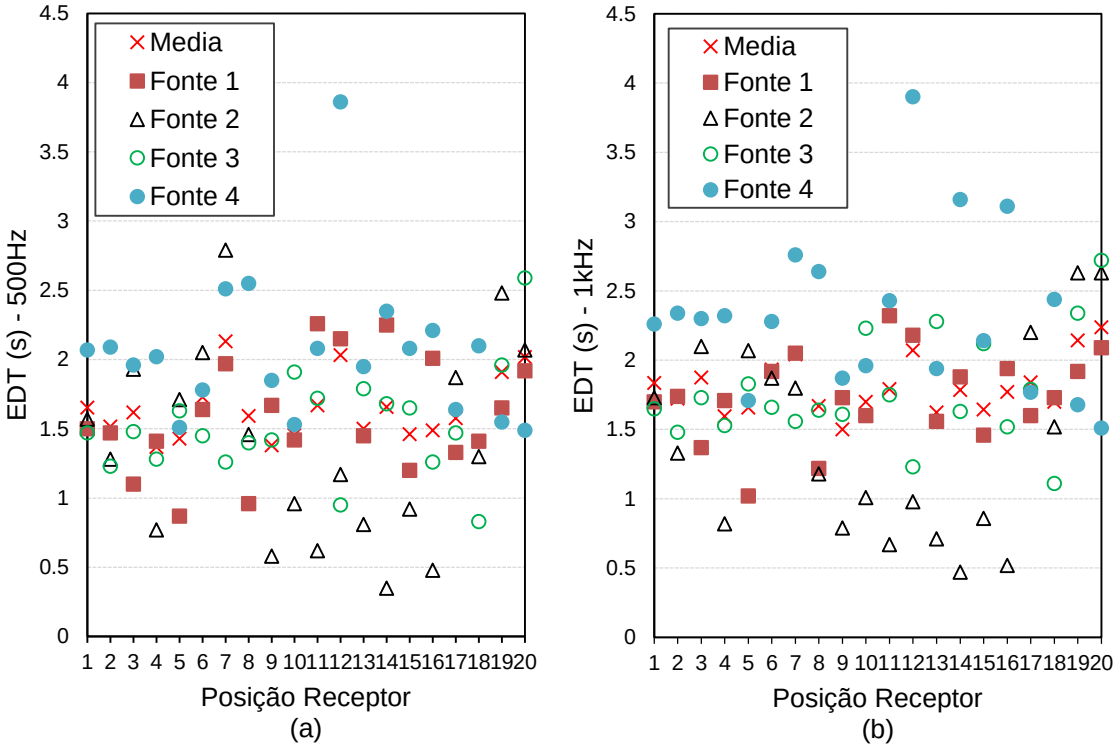


Figura 4.30: Gráfico para valores de EDT, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_2, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).

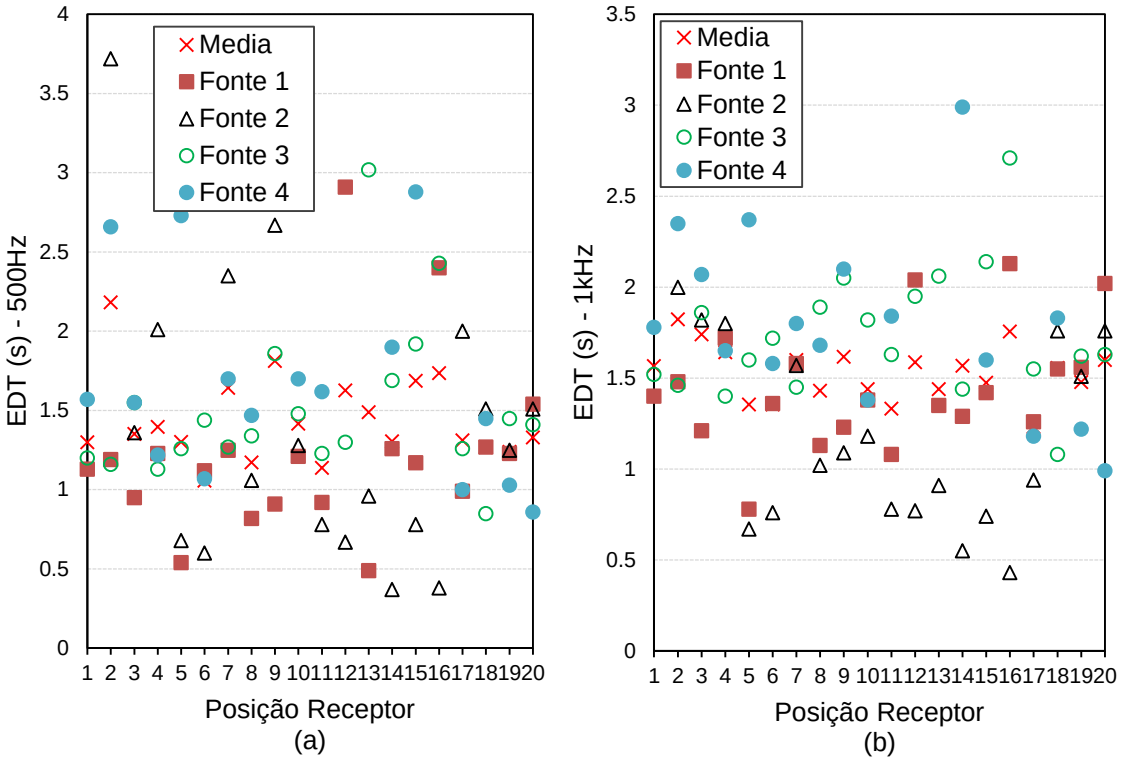


Figura 4.31: Gráfico para valores de EDT, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_3, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).

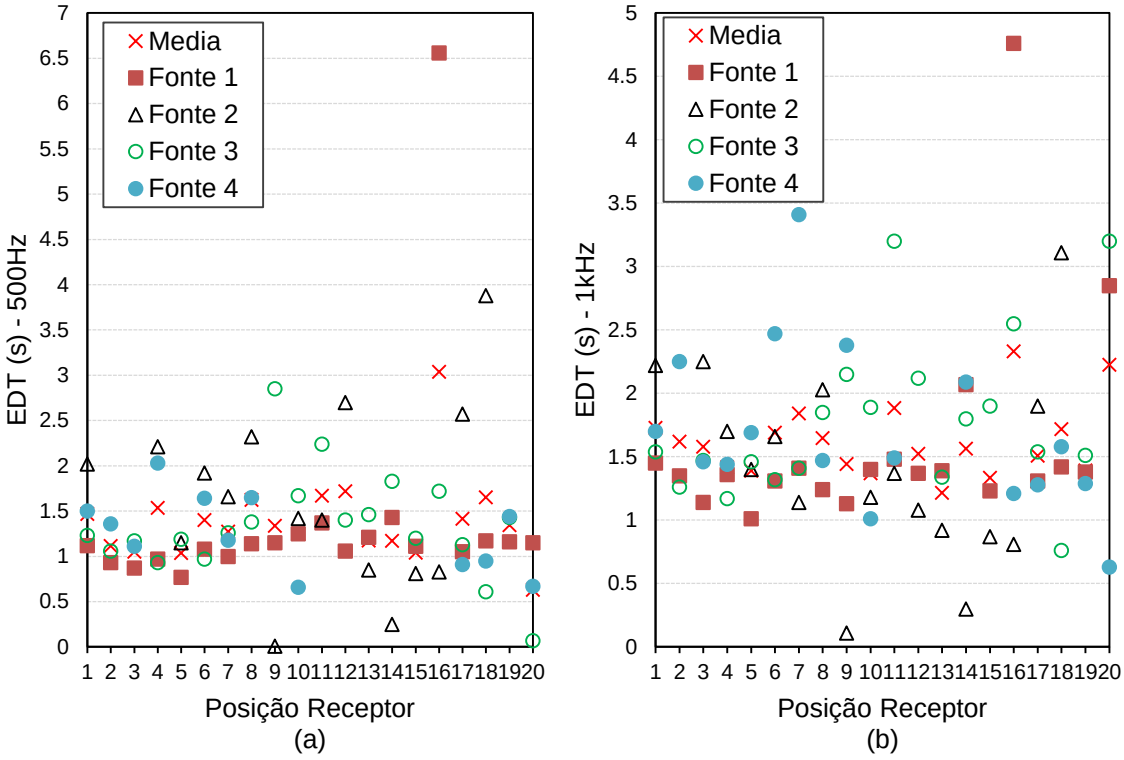
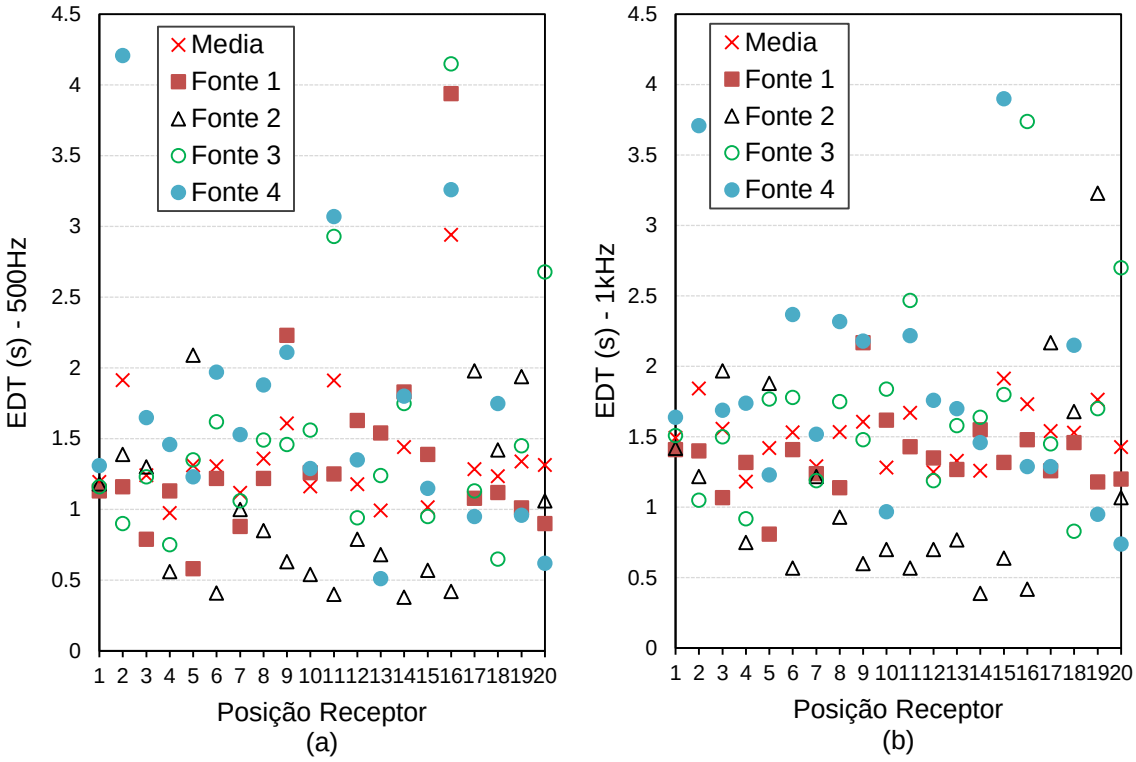


Figura 4.32: Gráfico para valores de EDT, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_4, nas frequências 500Hz (a) e 1kHz (b).



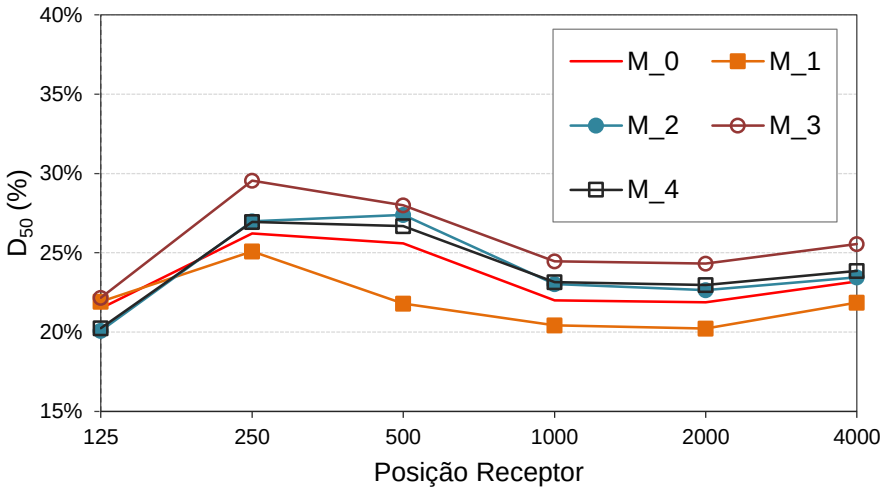
A compreensão de que as reflexões iniciais tende a reforçar o som direto, e esse diminui com a distância, é fundamental para compreender o EDT como parâmetro significativo para o design de sala, uma vez que o decaimento inicial do som passa a ser componente fundamental sob a inteligibilidade da fala (KOCIŃSKI; OZIMEK, 2016; VORLANDER, 2008).

Portanto, se comparados, EDT e T_{30}, é perceptível o tempo de reverberação é decorrente dos números reflexões e seus diferentes atrasos, já o EDT é mais perceptível e sensível as características físicas mais próximas, portanto mais dependente de variações da forma. Logo a pratica de se focar no tempo de reverberação da sala acaba por distrair detalhes mais significativos no design de sala, embora esse parâmetro ainda seja importante a fim de evitar ambientes excessivamente reverberantes ((BRADLEY; SATO; PICARD, 2003).

4.3.2.3 Definição, D_{50}

Referente a clareza da fala percebida, D_{50}, sendo a razão entre a energia sonora inicial e total, encontra-se intimamente ligado com a inteligibilidade silábica, considerando-se também uma medida relativa para a mesma (KUTTRUFF, 2009). O parâmetro D_{50} é obtido separadamente para cada faixa de frequência, de 125 a 4kHz, conforme o gráfico da Fig. 4.33.

Figura 4.33: Gráfico para valores de D_{50}, considerando medias dos valores obtidos para cada um dos modelos simulados, para frequências de 125Hz a 4000Hz.



Considerando as medias totais de D_{50} para cada modelo analisado, Fig. 4.33, é possível observar uma tendência relativa e valores aproximados para todas as frequências, conforme observado para M_0, M_2 e M_4, já para modelos M_1 e M_3, variações significativas são observadas.

Para a configuração M_1, menor clareza da fala é percebida, isto é possível pela alteração do sentido das superfícies absorvedoras verticais em uma única zona. Acréscimos de valores de D_{50} em M_3 são observáveis, tendo melhor ganho sob a clareza da fala percebida, tal característica justifica-se uma vez que a distribuição de *layout* em pequenos módulos verticais ao longo da sala possibilita maior percepção da energia sonora inicial, pelos receptores (Rn), sem que essas funcionem como grandes anteparos absorvedores, e em contrapartida a isso também se tem a maior distribuição da energia sonora total ao longo do recinto.

Sendo o valor obtido a partir da média das bandas de 500 a 1000Hz a correlação existente a sensação subjetiva, as Figuras 4.34 a 4.38, apresentam os valores médios para cada receptor (R_n), considerando a emissão por cada fonte sonora Sn para os modelos analisados.

O modelo M_0, Fig.4.34, as menores flutuações em D_{50} encontram-se relacionadas aos receptores da zona 2 (receptores de 5 a 16), sendo esses de aproximadamente 0% a 20%, caracterizando o decréscimo de D_{50} sob essa zona.

Ainda na Figura 4.34, observa-se maiores flutuações para receptores das zonas Z1 e Z3, tal comportamento justifica-se pela não disposição de superfícies verticais nessas áreas que possam reduzir o impacto de emissões diretas, esse comportamento também é observado no modelo M_1, Fig. 51. Para ambos os modelos M_0 e M_1, Figuras 3.34 e 3.35,

respectivamente, fica perceptível o decréscimo de D_{50} na zona 2, abaixo de 20%, indicando que somente essa área tem baixo índice de inteligibilidade silábica, uma vez que os acervos acabam funcionando como anteparos reduzindo os efeitos das emissões diretas sobre os receptores. Ainda no modelo M_1, Fig. 4.35, um acréscimo é observado para o valor de D_{50}, se comparados a M_0. Tal aumento é possível devido a reorientação do sentido do acervo, o que ratifica o efeito dessas como barreiras acústicas no recinto.

Para a configuração M_2, Fig. 4.36, observa-se uma flutuação na média de D_{50}, de aproximadamente 0% a 10%. Para valores referentes aos receptores das zonas Z1 e Z2 , observa-se uma médios de 5% a 10%, A redistribuição proposta para o modelo M_1 tende a reduzir os valores de D_{50}.

Valores médios para D_{50} em M_3, Fig. 4.37, apresentam uma flutuação de 5% a 20%, sendo o decréscimo da zona Z2 o mais significativo. Tal variação também é perceptível no modelo M_4, visto que a distribuição de acervo em ambas é similar. Entretanto para M_4, Fig. 4.38, observa-se uma menor variação entre valores de D_{50}, entre 10% a 20%, nas medias totais, esta justificável pela alteração do sentido do acervo.

Nas análises o parâmetro D_{50} apresentou-se -se dependente da emissão direta da fonte Sn, logo observa-se que a relação fonte-receptor é existe desde que ambas estejam em um campo livre sem barreiras, ficando perceptível que em alguns pontos os baixos valores de D_{50} são relativos a diferença de pisos em que se encontram a fonte do receptor, essa diferença também se observa quando superfícies verticais funcionam como barreiras acústicas. Logo, conclui-se que o parâmetro D_{50} é sensível a fenômenos de difração, uma vez que que está relacionado a energia sonora direta. Portanto, diretamente afetada pelas alterações espaciais no recinto.

Figura 4.34: Gráfico para dos valores médios de 500Hz a 1kHz, para D_{50}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_0.

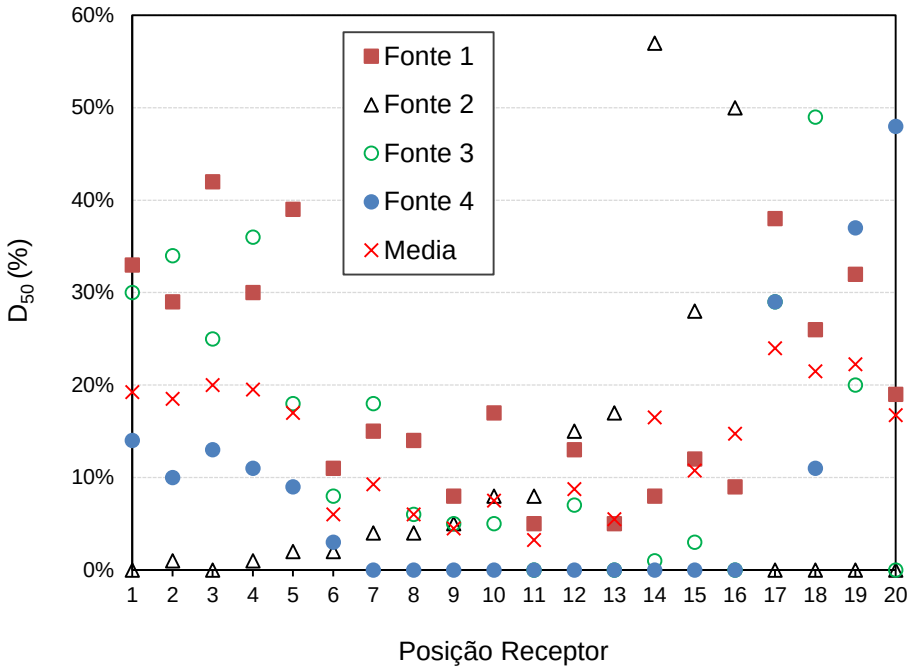


Figura 4.35: Gráfico para dos valores médios de 500Hz a 1kHz, para D_{50}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_1.

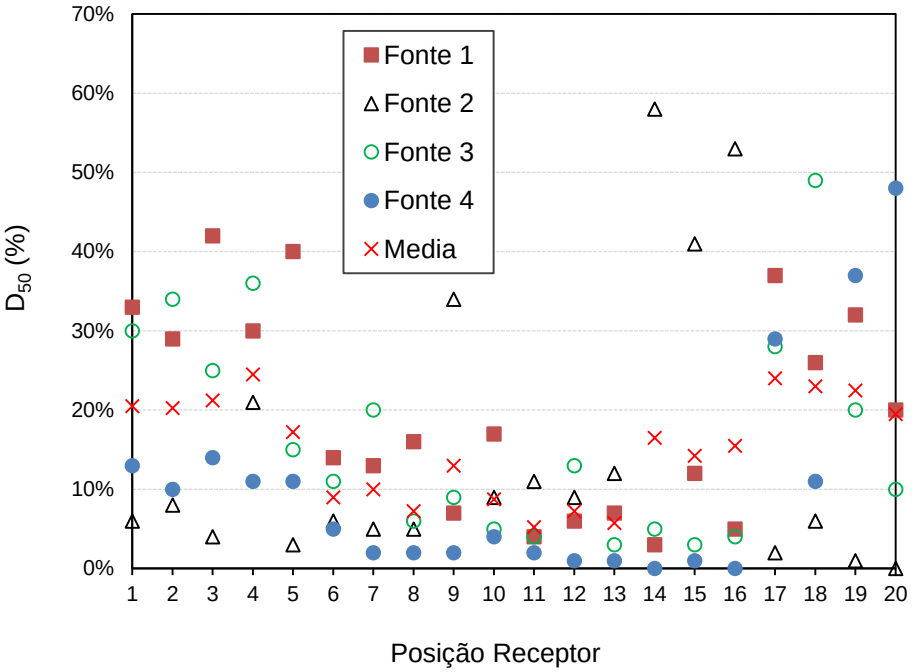


Figura 4.36: Gráfico para dos valores médios de 500Hz a 1kHz, para D_{50}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_2.

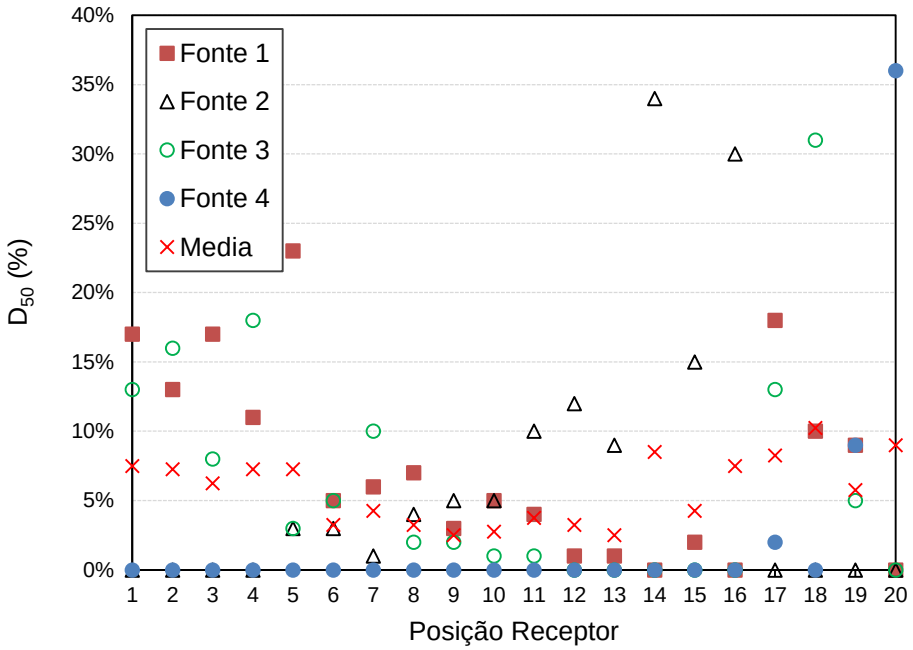


Figura 4.37: Gráfico para dos valores médios de 500Hz a 1kHz, para D_{50}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_3.

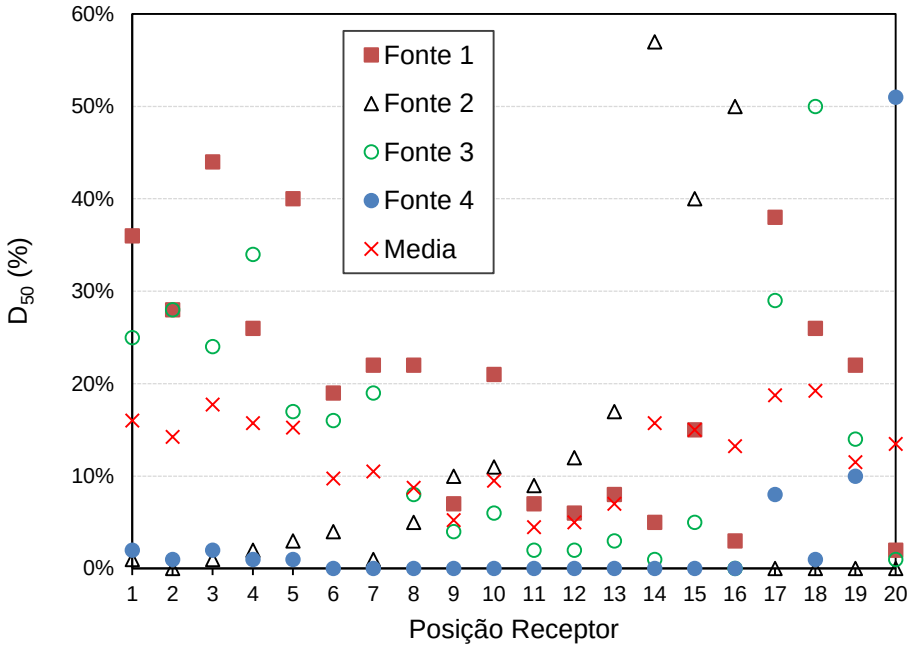
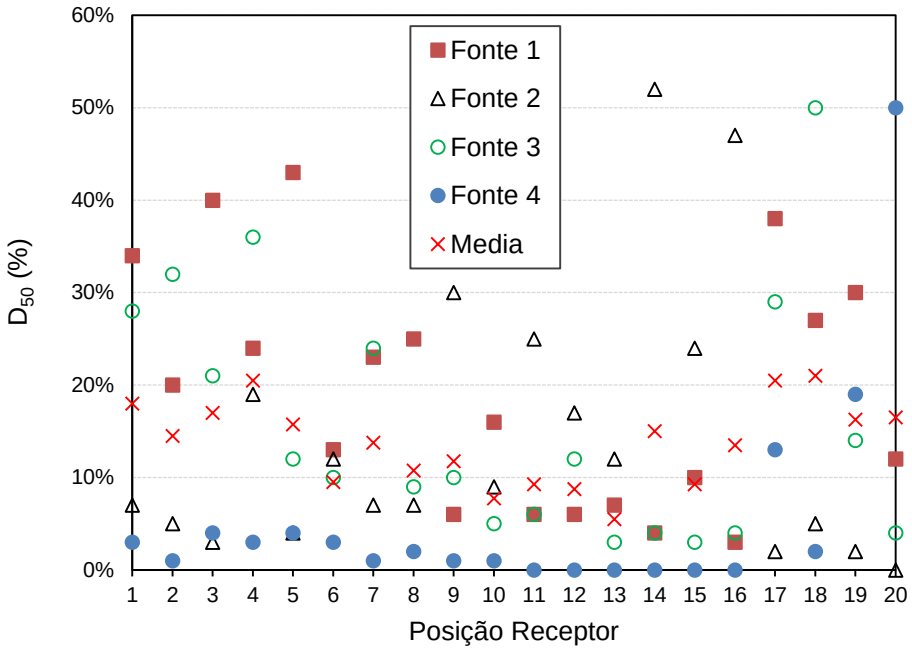


Figura 4.38: Gráfico para dos valores médios de 500Hz a 1kHz, para D_{50}, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_4.



4.3.2.4 Índice de Transmissibilidade da Fala, STI

Considerado um dos principais parâmetros para o design de salas abertas, o índice de transmissibilidade da fala, Figuras 4.39 a 4.43, trata-se de um parâmetro de número único, e este refere-se à capacidade da compreensão ou privacidade da fala em recintos, considerando as diversas características físicas da sala, tais como, geometria, reflexões sonoras e o ruído ambiente (ANDERSSON; CHIGOT, 2004; BISTAFA; BRADLEY, 2001).

Nas Figuras 4.39 e 4.40, para M_0 e M_1, respectivamente, é possível observar a flutuação de STI por receptor, essa distribui-se de modo desuniforme ao longo da sala, sendo para a zona 2 os menores valores observados, entre 0,03 e 0,1 para ambas as propostas. Para emissões sonoras referentes a fonte S1, maiores índices de STI são encontrados para Zonas 1 e Zona 3, estes aproximados em ambos os modelos, por apresentarem propostas similares em sua configuração espacial.

O comportamento apresentado nas configurações M_0 e M_1, mostra a influência das superfícies verticais em uma única área, zona 2. Tal configuração cria distorções entre todos índices observados por receptores, não possibilitando uma média aproximada para todos os pontos, criando assim espaços, com variações distintas de privacidade da fala.

Para a proposta M_2, Figura 4.41, observa-se a redução dos valores de STI, apresentando uma menor flutuação entre os índices por zonas, esses variando de 0 a 0.1. Para a

fonte S1, maior dispersão é observada para a zona 1 e 3, sendo os menores valores, encontrados na zona 2. Emissões referentes a S2, sofreram reduções significativas na zona 1 e 3, porém um acréscimo pode ser observado na zona 2. O comportamento de S3, não sofre alterações para a zona 1 se comparado com modelos M_0 e M_1, entretanto observa-se um decaimento significativo para as demais zonas. Para S4, é significativa a redução percebida para as zonas Z1 e Z2, tendendo a 0.

Para modelos M_3 e M_4, Figuras 4.42 e 4.43, respectivamente, referente a fonte S2, observa-se um decaimento no índice de STI no modelo M_3, considerando que ambos os modelos são similares alterando somente a orientação do acervo. Para S1, S3 e S4, índices aproximados são observados em ambos os modelos para as zonas 1 e 3, sendo as maiores flutuações observadas na zona 2. O decaimento de índice apresentado para essas proposições é inferior ao decaimento para o modelo M_2, o que mostra a distribuição de planos verticais ao longo do recinto, tende a variar consideravelmente a resposta da sala para índices de privacidade. Logo, sendo um parâmetro dependente de diversas variáveis, é notável a variação de STI considerando alterações geométricas, e de locação das superfícies reflexiva e difusoras no interior do recinto.

Como pode se observar o Índice de Transmissibilidade da fala, apresentou-se um parâmetro diretamente relacionado a frações de energia iniciais, bem como D_{50}, logo dependente das características acústicas das superfícies próximas.

Figura 4.39: Gráfico para dos valores de STI, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_0.

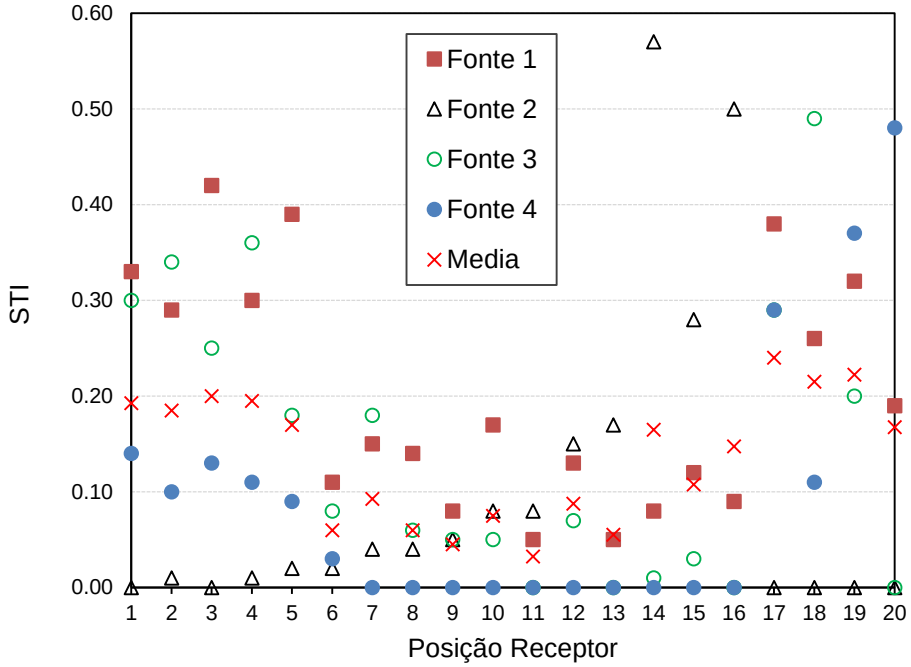


Figura 4.40: Gráfico para dos valores de STI, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_1.

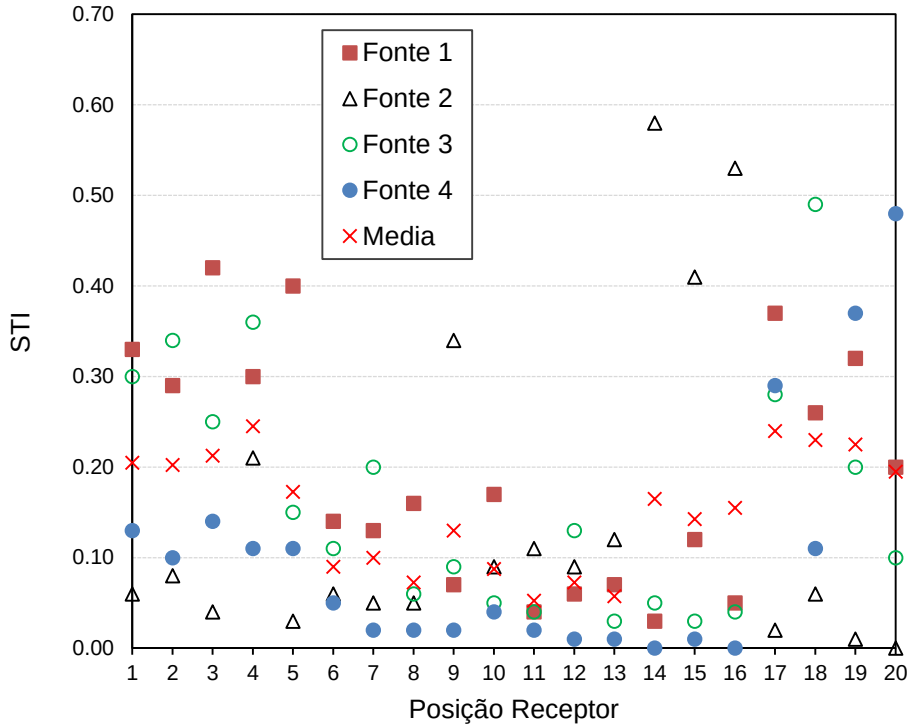


Figura 4.41: Gráfico para dos valores de STI, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_2.

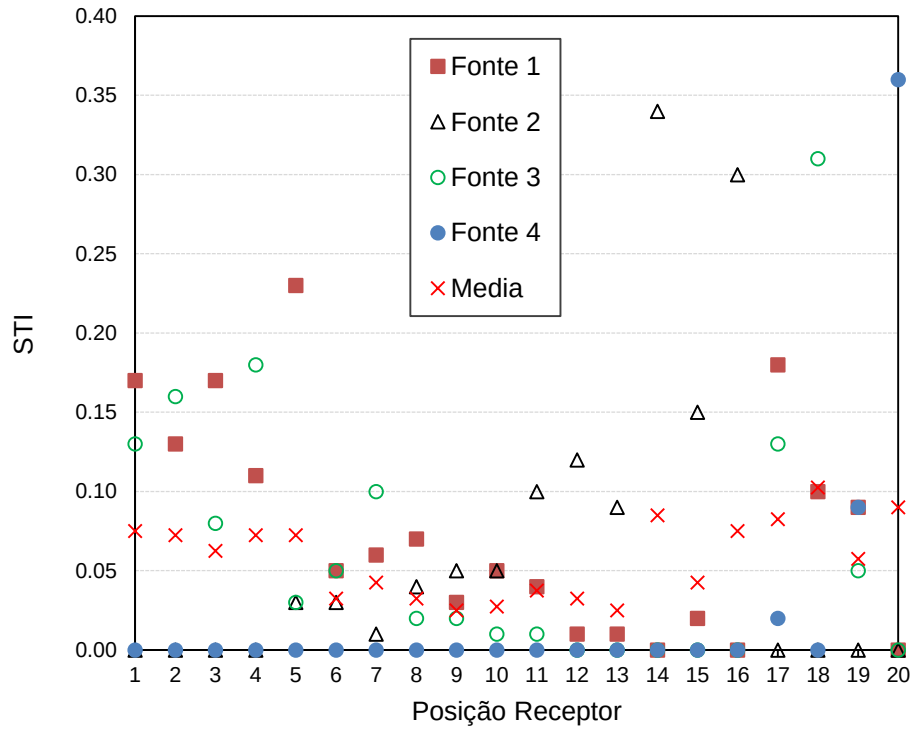


Figura 4.42: Gráfico para dos valores de STI, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_3.

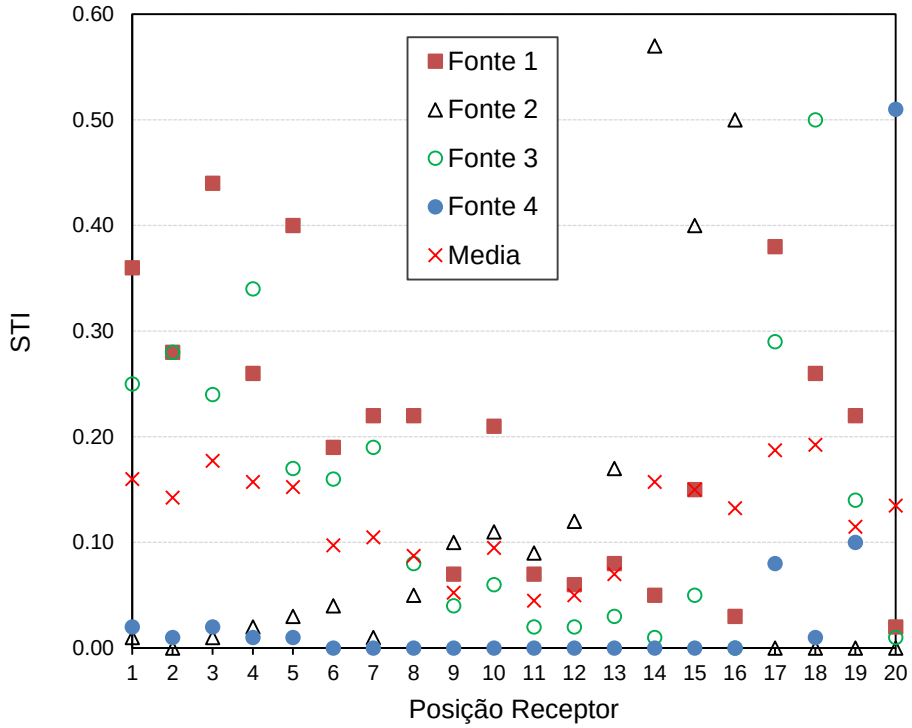
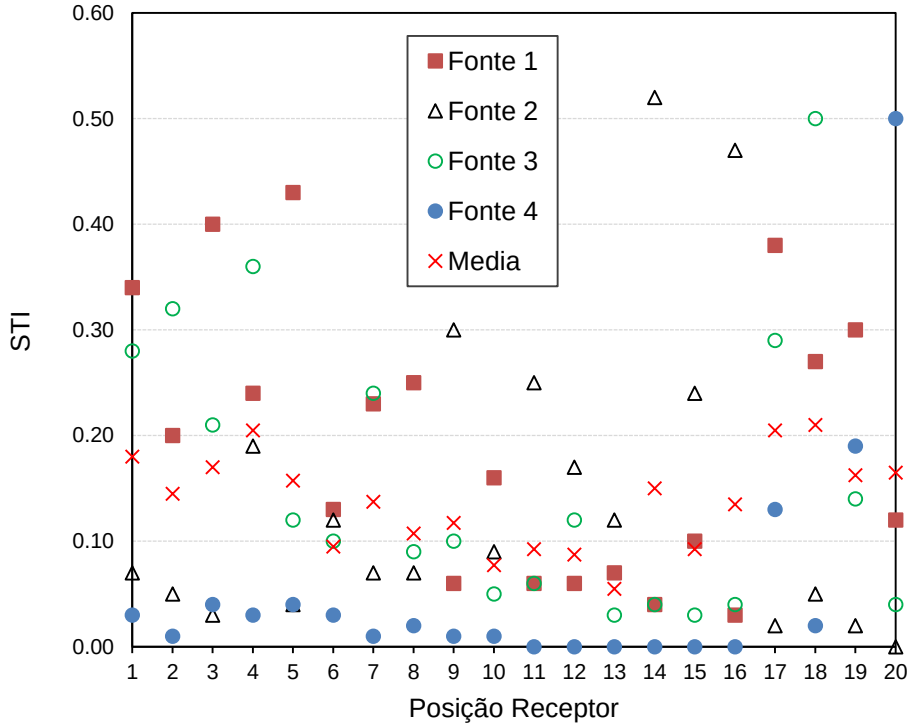


Figura 4.43: Gráfico para dos valores de STI, considerando a posição do receptor (R_n) para o modelo M_4.



CAPÍTULO 5

5.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo a caracterizar acusticamente o salão principal da Biblioteca Central Prof. Clodoaldo Fernando Ribeiro Beckmann, e explorar as novas possibilidades de organização espacial verificando a influências dessas sobre comportamento acústico de toda sala e como tais proposições podem corroborar para a melhorias acústicas da mesma. Através da caracterização acústica da sala foi possível avaliar as condições acústicas da mesma. A partir do levantamento arquitetônico fornecido pela Prefeitura da Universidade Federal do Pará, foi possível desenvolver o modelo tridimensional para etapas de simulação acústica através do *Software ODEON Acoustics*. Caracterizada acusticamente a sala, foi possível calibrar o modelo de simulação acústica, garantindo aproximações entre a resposta experimental e computacional, dentro dos limites apresentados pela normativa, o que viabilizou investigar a resposta acústica dos modelos propostos e assim buscar melhorias na resposta acústica da sala.

Os resultados da caracterização acústica apresentaram resultados de NPS acima dos níveis requeridos pela normativa. Em contrapartida a esse critério de avaliação a literatura apresentada afirma que somente níveis de pressão sonoras são insuficientes para caracterizar acusticamente esses recintos, sendo necessário outros parâmetros para análise. Logo, a fim de se ter uma resposta completa acerca das características acústicas da sala baseou-se na ISO3382:2 (ABNT, 2017), o quais obtiveram-se os seguintes parâmetros, T_{30}, EDT e D_{50}, parâmetros esses necessários para a calibração do modelo computacional, e através desse analisou-se o Índice de Transmissibilidade da Fala (STI) conforme apresentado pela ISO3382:3 (ABNT, 2017) como importante parâmetro para a análise acústica de ambientes abertos.

Sobre posse do levantamento arquitetônico do edifício e identificado os materiais das superfícies de revestimento, investigou-se na literatura os respectivos coeficientes de absorção e espalhamento para cada uma das superfícies, a fim de calibrar o modelo computacional, garantindo a concordância entre os valores simulados e medidos para o modelo base M_0, apresentando um erro médio dentro do limite tolerável para a normativa, a diferença mínima perceptível, sendo de até duas unidades do valor de JND. Calibrado o modelo base, M_0, quatro novas proposições espaciais foram criadas a fim de investigar a resposta acústica de cada uma delas.

Para índices de reverberação percebida, EDT e T_{30}, os resultados obtidos ratificam a influência da distribuição de superfícies absorvedoras tendem a variar significativamente o tempo de reverberação da sala, entretanto os valores de decaimentos iniciais sofrem melhor flutuações, uma vez que esse parâmetro se apresenta mais dependente das características acústicas das superfícies próximas. Os modelos M_0 e M_1, somente com alterações na orientação das superfícies verticais absorvedoras (acervo), valores de T_{30} e EDT foram observados, esses por sua vez apresentam flutuações significativas entre as zonas presentadas, considerando a análise por receptor. Para os modelos M_2, M_3 e M_4, a distribuição de superfícies verticais ao longo da sala, reduziu significativamente valores de T_{30} e EDT, apresentando menor disparidade entre os valores das zonas identificadas.

Para índices de definição da fala percebida, D_{50}, fica evidente que as distribuições dos acervos ao longo da sala, como observado nos modelos M_2, M_3 e M_4, tendem a aumentar inteligibilidade silábica, entretanto esses acabam por reduzir índices de privacidade da fala. Logo, analisando os 5 modelos propostos, ainda que os modelos M_0 e M_1 apresentem menores índices de definição, essa não é uniforme ao longo da sala, sendo para o modelo M_2 os melhores índices analisados ao longo de toda a sala, entre 0% e 10%, garantindo maior privacidade da fala, por toda a sala. Para esse parâmetro a densidade de ocupação do espaço mostrou-se o principal fator a ser considerado a fim de se obter melhores índices de privacidade da sala.

Sendo o Índice de Transmissibilidade da fala, um dos principais parâmetros apresentados pela literatura para acústica de ambientes abertos, e esse diretamente influenciado sobre parâmetros acústicos e arquitetônico. Considerando, recomendações normativas, Tab. 2.1, para se alcançar índices “bons” de privacidade da fala, 0,00 a 0,20, ainda que todos os modelos propostos apresentem um número único aceitável para privacidade da fala, os melhores valores são referentes ao modelo M_2, definindo-se como “confidencial” a “boa” os índices de privacidade da fala. Essa proposição por sua vez apresenta ainda melhor disposição espacial, possibilitando além de melhorias acústicas, melhor relação do usuário com o ambiente construído.

Através das análises apresentadas ficou evidente que diversos parâmetros devem ser investigados a fim de garantir melhorias acústicas para o objeto de estudo, uma vez que essas agem intimamente compondo a “paisagem sonora” de uma sala, logo as investigações de todos os parâmetros tornam a análise mais completa. Dessa forma o modelo M_2, é aquele que apresenta melhorias significativas na acústica da sala, entretanto vale ressaltar que os bons

índices para as proposições M_3 e M_4, garantem essas como proposições aceitáveis e que permitem um fluxo e uso mais flexível.

A organização espacial, enquanto parâmetro arquitetônico, apresentou-se como um importante fator a ser investigado a fim de garantir melhorias acústica e evitando problemas pontuais, sem a necessidade de maiores intervenções especiais como a substituição de superfícies por outras com melhor resposta acústica, evidenciando que estratégias mais simples tais como, a reorganização de determinadas superfícies e/ou mobiliários já existentes, dada a influência direta dessas sobre a resposta acústica da sala, seja nas reflexões iniciais como nas tardias, o que afeta diretamente todos parâmetros objetivos. Evidenciou-se ainda que a alta densidade de ocupação do espaço pelas superfícies verticais em uma única área corrobora com a péssima formação acústica total do recinto.

A aplicação de simulação acústica de salas, pelo *software ODEON Acoustics*, se mostrou uma importante ferramenta de análise e investigação dos parâmetros acústicos desde que seus parâmetros de funcionamento sejam controlados. Destaca-se ainda que limitações e erros computacionais apresentados, podem ser oriundos da versão do *software*, datado em 2009. Esta pesquisa também lançou mão do uso de mapeamento acústico de alta resolução como ferramenta de investigação, ver apêndices, sendo eficaz para analises e estratégias pontuais. Através dessa ferramenta, fica evidente o comportamento de cada parâmetro acústico e a influência da geometria da sala. Ainda que tal ferramenta demande elevado tempo de processamento e apresente algumas distorções computacionais, esta se usada em conjunto a análises numéricas comprova-se uma ferramenta útil para a analises acústica de salas.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

As recomendações feitas neste trabalho são:

Validar o modelo computacional, considerando que o modelo utilizado neste trabalho se encontra apenas calibrado para assim aferir a exatidão entre os resultados simulados e experimentais, garantindo maior confiabilidade nos resultados propositivos.

Realizar a análise experimental da Biblioteca Central da Universidade Federal do Pará tomando como base a norma ABNT 3382:3 a fim de verificar os índices de transmissibilidade da fala.

Ensaiar as superfícies verticais absorvedoras (estantes de acervos) em câmaras reverberantes de tamanho real, verificando a concordância com os resultados apresentados na literatura, bem como fornecer dados para analises futuras.

Aplicar o modelo de organização espacial proposto neste trabalho em outras bibliotecas setoriais a fim de se analisar a efetividade da proposta em outros modelos de geometria construída, bem como possibilitar melhorias acústicas nessas.

REFERÊNCIAS

ABBASI, N. Library Spaces Designed with Students in Mind: An Evaluation Study of University of Queensland Libraries at St Lucia Campus. Proceedings of the IATUL Conferences, 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.152: Acústica - Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 3382-1: Acústica – Medição de parâmetros de Acústica de salas. Parte 1- Salas de espetáculos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 3382-1: Acústica – Medição de parâmetros de Acústica de salas. Parte 2 – Tempo de reverberação em salas comuns. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 3382-1: Acústica – Medição de parâmetros de Acústica de salas. Parte 3 – Escritórios de planta livre. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

ADENIRAN, P. User satisfaction with academic libraries services: Academic staff and students perspectives. International Journal of Library and Information Science, Volume 3, p. 209-216, 2011.

BERANEK, L. Acoustics. New York: American Institute of Physics, 1993.

BENNETT, S. Libraries Designed for Learning. Washington: Council on Library and Information Resources, p. 16, 2003.

BC - UFPA. Histórico. Belém, 2017. Site da Universidade Federal do Pará. Disponível em: <http://bc.ufpa.br/site/index.php/historico> Acesso em: 11 de abril de 2017.

BISTAFA, S. R. et al. Predicting reverberation times in a simulated classroom. The Journal of the Acoustical Society of America, v. 108, n. July, p. 1721–1731, 2000.

BISTAFA, S. R. Acústica Aplicada ao Controle de Ruído. São Paulo: Editora Edgar Blücher, 2006.

BORK, I. A Comparison of Room Simulation Software - The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation. Acta Acustica united with Acustica, v. 86, n. 6, p. 943–956, 2000.

BORK, I. Report on the 3rd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation - Part I: Measurements. Acta Acustica united with Acustica, v. 91, n. 4, p. 740–752, 2005.

BRADLEY, J. S, The Acoustical Design of Conventional Open Plan Offices, Canadian Acoustics, v. 31, n. 2, 2003.

CAMPBELL, J. Changing a cultural icon: The academic Library as a virtual destination. Disponível em: < https://www.learntechlib.org/p/99195 >. Acesso em: 30 de março de 2017.

CARVALHO, R. P. Acústica arquitetônica. Brasília: Thesaurus, 2006.

CHRISTENSEN, C. L.; KOUTSOURIS, G. ODEON Room Acoustics Software, Version 10.1: Full User's Manual. 2009.

CHRISTENSEN, C. L.; KOUTSOURIS, G.; RINDEL, J. H. Estimating absorption of materials to match room model against existing room using a genetic algorithm. Proceedings of Forum Acusticum, v. 2014–Janeiro, 2014.

CHRISTENSEN, C. L.; NIELSEN, G. B.; RINDEL, J. H. Danish Acoustical Society Round Robin on room acoustic computer modelling. p. 1–20, 2008.

COX, T. J.; D'ANTONIO, P. Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application. Londres (Inglaterra); Nova Iorque (EUA): Taylor & Francis, 2009.

CHEVRET, P. Release from masking of speech intelligibility due to fluctuating noise in open-plan offices. Applied Acoustics, v. 101, p 156–167, 2016.

DAHLKILD, N. The Emergence and Challenge of the Modern Library Building: Ideal Types, Model Libraries, Guidelines, from the Enlightenment to the experience economy, Library Trends, v. 60, p. 11-42, 2011.

DIETRICH, P. et al. ITA-Toolbox -- An Open Source MATLAB Toolbox for Acousticians. Fortschritte der Akustik - DAGA, p. 151–152, 2012.

DOKMECI, KANG, Objective parameters for acoustic comfort in enclosed spaces. In: Proceeding of 20th International Congress on Acoustics. Sydney (Austrália): [s.n.], 2010.

DOKMECI, KANG, A comparative case study of indoor soundscape approach on objective analyses and subjective evaluations of libraries. In: Proceedings of the Acoustics. Nantes (France): [s.n.], 2012.

DOKMECI, YILMAZER, Relationship between measured levels and subjective ratings: a case study of the food-court Area in CEPA, Shopping Center, Ankara, Building Acoustics, v. 19, p. 57-73, 2012.

ERMANN, M. Architectural Acoustics Illustrated. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.

EGAN, D. Architectural Acoustics. New York: McGraw, 1988.

EBISSOU, A.; PARIZET, E.; CHEVRET, P. Use of the Speech Transmission Index for the assessment of sound annoyance in open-plan offices. Applied Acoustics, v. 88, p. 90–95, 2015.

FITZROY, D.; Reverberation Formula which seems to be more accurate with nonuniform distribution of Absorption. The Journal of the Acoustical Society of America, v. 31, p 893-897, 1959

FAULKNER-BROWN, H. Design de Grandes Edifícios para Bibliotecas. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. A Informação: tendências para o novo milênio. Brasília (Distrito Federal) Cap. 5, p.82-93, 1999.

FRANK, J. E.; ASHER, D. C.; Noise Management in wenty-First Century Libraries: Case Studies for Four US Academic Institutions. New Review of Academic Librarianship, v. 20, p. 320-331, 2014.

FUNDAÇÃO BIBLIOTECA NACIONAL. Biblioteca Pública: princípios e diretrizes. Rio de Janeiro: Fundação Biblioteca Nacional, 2010.

GOMES, M. H. A.; VORLÄNDER, M.; GERGES, S. Measurement and use of scattering coefficients in room acoustic computer simulations. In: Proceedings of the Acustica 2004. Guimarães (Portugal): [s.n.], 2004, p. 1–8.

HAAPAKANGAS, A. HONGISTO, V. HYÖNÄ, J. KOKKO, J. Effects of unattended speech on performance and subjective distraction: The role of acoustic design in open-plan offices. Applied Acoustics, v. 86, p. 1-16, 2014.

HODGSON, A. NOSAL, E. Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms. The Journal of the Acoustical Society of America, v.111, p. 931-939, 2002

HURT, C.; FINDLEY, T. Library Architecture and Design, Encyclopedia of Library and Information Sciences. New York: Taylor & Francis, 2011.

JAMES, A. The acoustics of a library for the 21st century. Disponível em: < http://www.adrianjamesacoustics.co.uk/> Acesso em: 13.01.2018.

KIM, J.; DEAR, R. Workspace Satisfaction – The Privacy-Communication Trade-off in Open-Plan Offices. Journal of Environmental Psychology, v. 36, p.18-26, 2013.

KANG, J. Relationships between objective acoustic indices and acoustic comfort evaluation in non-acoustic spaces, Journal of the Acoustical Society of America, v. 115, 2004.

KANG, J. Urban Sound Environment. New York: Taylor & Francis, 2007.

KERÄNEN, J, HONGISTO, V. Prediction of the spatial decay of speech in open-plan offices. Applied Acoustics, v. 74, p.1315-1325, 2013.

KLEINER, M, Acoustic of small room. Florida: CRC Press, 2014

KLEINER, M, Worship Space Acoustics, J. Ross, 2010.

KUTRUFF, M, Acoustic an Introduction,. Nova Iorque: Taylor & Francis, 2007.

KUTRUFF, H, Room Acoustic. 5º Ed. Nova Iorque: Spon Press, 2009.

LONG, M, Architectural Acoustics. Oxford: Elsevier, 2006.

MARINO, M. Libraries as transitory workspaces and spatial incubators. Library Information Science Research, v. 37, p. 118-129, 2015.

MARKHAM B, Acoustic Comfort in Libraries. In: 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering. Praga (Republica Checa): [s.n.], 2004.

MATTERN, S. Resonant Texts : Sounds of the American Public Library. Senses & Society, v. 2, n. 3, p. 277–302, 2007.

MATTHEWS, G, University Libraries and Space in the Digital World. 2. Ed. Nova Iorque: Routledge, 2016.

MEISSNER, M. “Influence of Wall Absorption on Low-Frequency Dependence of Reverberation Time in Room of Irregular Shape”. Applied Acoustic, v.69, p. 583-590, 2008.

NOWOSWIAT, A.; OLECHOWASKA, M. An attempt to determine impact of a room shape on the reverberation time. Architecture Civil Engineering Environment, v. 4, p. 73-80, 2010.

OLUFSEN, H. Comparing measurements and simulations for acoustics in open-plan office spaces. Tese (Mestrado) – Norwegian University of Science and Technology, 2017.

PAVLOVIC, D.; MIJIC, M.; Distribuiton of free path length as an indicator of the room shape and diffusion of reflections. In: ForumAcusticum. Budapeste (Hungria): [s.n.], 2005.

PAVLAVIC, D.; MIJIC, M.; Influence of scattering coefficient of walls and ceiling on auditorium absorption in hall. In: 3rd Congress of the alps Adria Acoustic Association. Graz(Austria): [s.n.], 2007.

PELZER, S.; VORLÄNDER, M.; Frequency- and Time-dependent Geometry for Real-time Auralizations. In: Proceedings of 20th International Congress on Acoustics. Sydney (Australia): n. August, 2010.

PIERRETTE, M.; PARIZET, E.; CHEVRET, P. Noise effect on comfort in open space offices: development of an assessment questionnaire, v. 58, p. 96-106, 2015

RAJAGOPALAN, P.; NGUYEN, H.; CARRE, A.; Acoustic performance of contemporary public libraries: an evaluation of public libraries in Melbourne, Australia. Architectural Science Review, p. 1-12, 2016.

RIBEIRO, C, ARAÚJO, M, Ações Culturais Desenvolvidas na Biblioteca da Ufpa: Relato de experiência, 2015. Disponível em: < sisconev.com.br/Uploads/CBBD15/Trab14400205320150331_000000.pdf> Acesso em 20 de agosto de 2017.

SALTER, C, Acoustic for libraries, California: Libris Design, 2002.

SAVIOJA, L.; SVENSSON, P. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. The Journal of the Acoustical Society of America, v. 138, n. 2, p. 708–730, 2015.

SÜ GÜL, Z.; MEHMET, Ç. Impact of design decisions on acoustical comfort parameters: Case study of Dogramacizade Ali Pasa Mosque. Applied Acoustics, v. 74, n. 6, p. 834–844, 2013.

SWALLOW, J. This ain't your daddy's library – The challenges of modern library acoustic. Canadian Acoustics, v. 42 n. 3, 2015. Disponível em: < https://jcaa.caa-aca.ca/index.php/jcaa/article/view/2798 > Acesso em 12 de agosto de 2017.

SYKES, D, Productivity: How Acoustics Affect Workers' Performance in Offices Open Areas. Tese (Doutorado), 2004.

UNESCO. Public Library Manifesto. Disponível em: http://archive.ifla.org/VII/s8/unesco/port.htm> Acesso em: 02.04.2014.

VERVOORT, T.; Background noise level to determine the speech privacy in open plan offices. In: EuroNoise Maastricht(Holanda): [s.n.], p. 1209-1214, 2015.

VIRJONEN, P.; KERÄNEN, J.; HONGISTO, V.; Determination of Acoustical Conditions in Open-Plan Offices: Proposal for New Measurement Method and Target Values, Acta Acustica United with Acustica, v. 95, p.279-290, 2009.

VORLÄNDER, M. International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulations. In: 15th International Congress on Acoustics. Trondheim (Noruega): [s.n.], 1995. p. 689–692.

VORLANDER, M, Auralization, 5º Ed. Berlim: Springer, 2008.

VORLÄNDER, M. Performance of computer simulations for architectural acoustics. In: Proceedings of 20th International Congress on Acoustics. Sydney (Australia): n. August, 2010.

VORLÄNDER, M. Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties. The Journal of the Acoustical Society of America, v. 133, n. 3, p. 1203–1213, 2013.

VORLÄNDER, M.; MOMMERTZ, E. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. Applied Acoustics, v. 60, n. 2, p. 187–199, 2000.

WANG, C.; BRADLEY, J. S. Prediction of the speech intelligibility index behind a single screen in an open-plan office. Applied Acoustics, v. 63, s.n., p.867-883, 2002.

WRIGHTSON, D.; WRIGHTSON, J. “Acoustical Considerations in Planning and Design of Libraries facilities”. in Library Hi Tech, Vol. 17, p. 349-357, Emerald Insight, 1999.

YANG, W, J. KANG, Acoustical Comfort Evaluation in Urban Open public spaces, Applied Acoustic. v. 66, p. 211-229, 2005.

APÊNDICE A

MAPEAMENTO ACÚSTICO

Presente conteúdo refere-se ao mapeamento acústico do objeto de estudo, realizado através do software ODEON Acoustics.

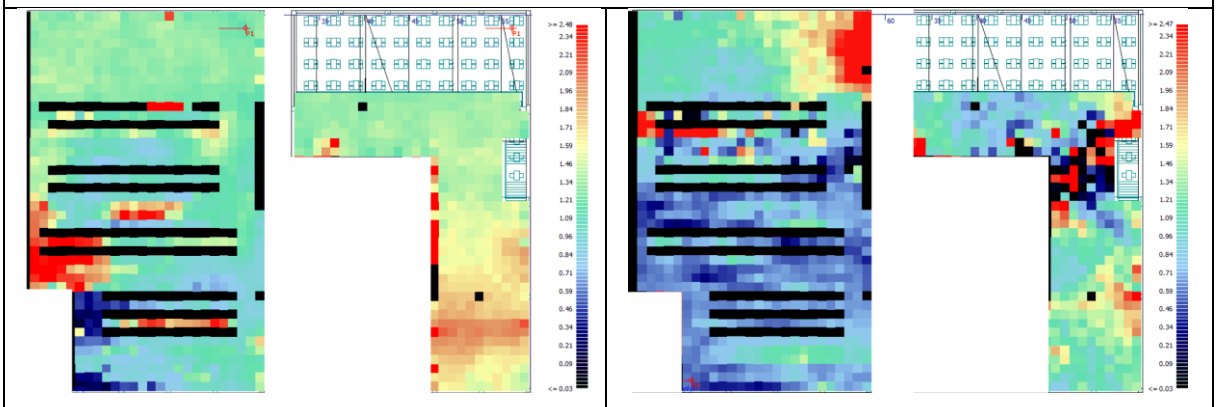
Tal metodologia de análise apresenta-se efetiva para a modelagem e design de salas, uma vez que possibilita a visualização da resposta acústica de um grande número de receptores distribuídos sobre um *grid*, possibilitando identificar a distribuição irregular dos parâmetros acústicos ao longo da sala explorando seus pontos fracos e suas potencialidades.

1. Tempo Reverberação, T_{30}

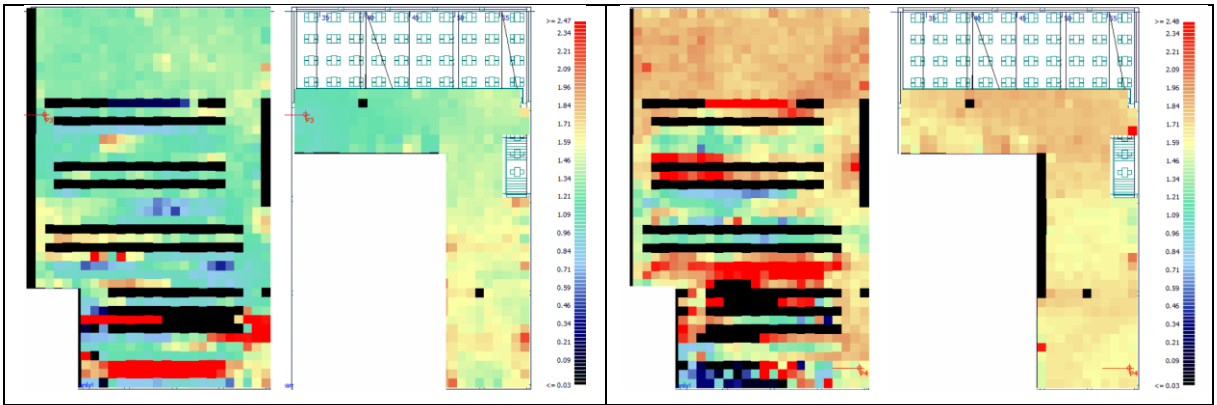
Considerando o mapeamento acústico, as figuras 1 a 5 apresentam a distribuição espacial de T_{30}, por fonte (S_n) para cada uma das configurações propostas anteriormente.

Para a Fig. 1, observa-se o mapeamento acústico do modelo M_0 para T30, considerando os dois níveis da sala, na frequência de 500 Hz, para cada uma das fontes. Observam-se ainda alguns pontos de acréscimo para valores de T30, referentes a reflexões de algumas superfícies. Também é perceptível a influência de cada fonte sonora sobre o piso em que ela se encontra. Distorções computacionais são observadas, em vermelho, mas essas não influenciam a análise do modelo.

Figura 1: Mapeamento acústico da sala, para T30, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), para os dois níveis da sala, na frequência de 500 Hz, para o modelo M_0.



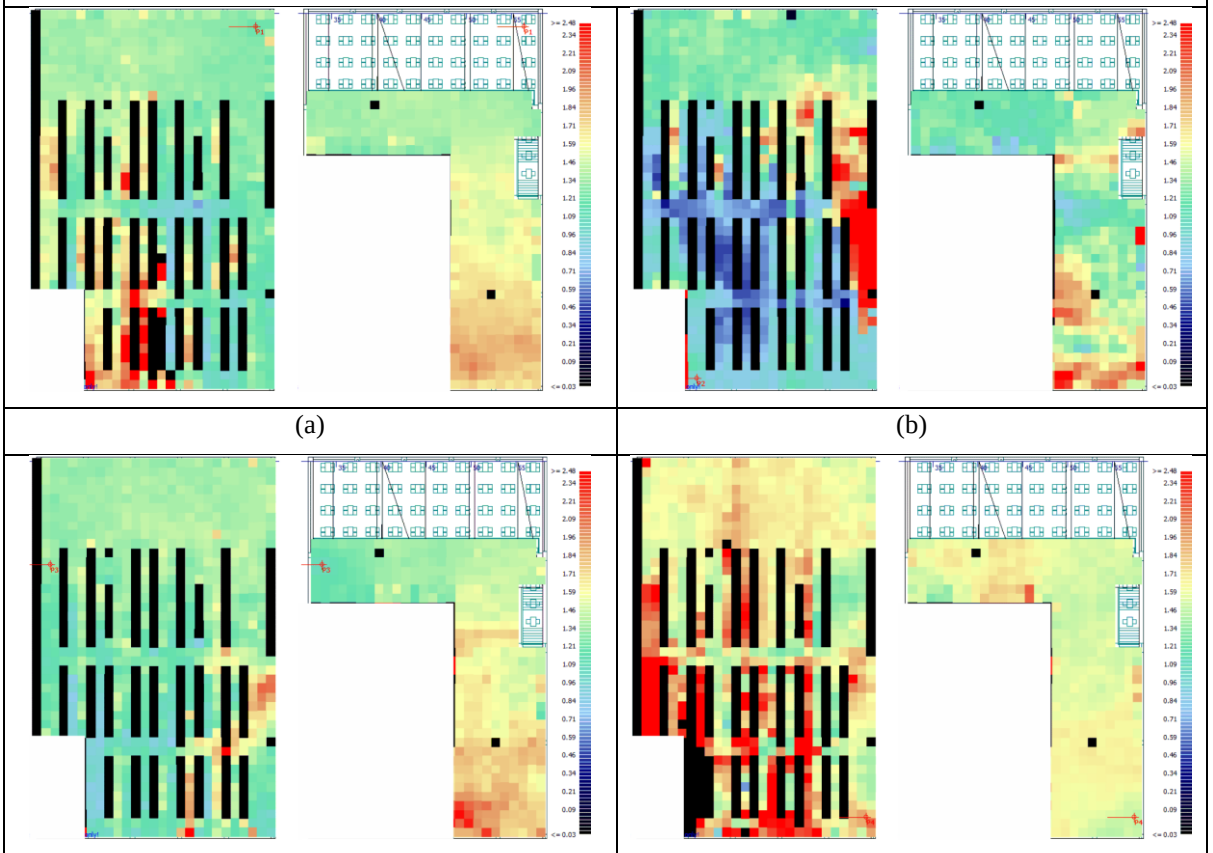
(a) (b)



(c) (d)

A Fig. 2, mostra o mapeamento acústico de T30 para o modelo M_1, considerando os dois níveis da sala, na frequência de 500 Hz, para cada uma das fontes. Observa-se o aumento de T30 referente à fonte S2, considerando apenas a mudança de sentido do acervo.

Figura 2: Mapeamento acústico da sala, para T30, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), na frequência de 500 Hz, para o modelo M_1.

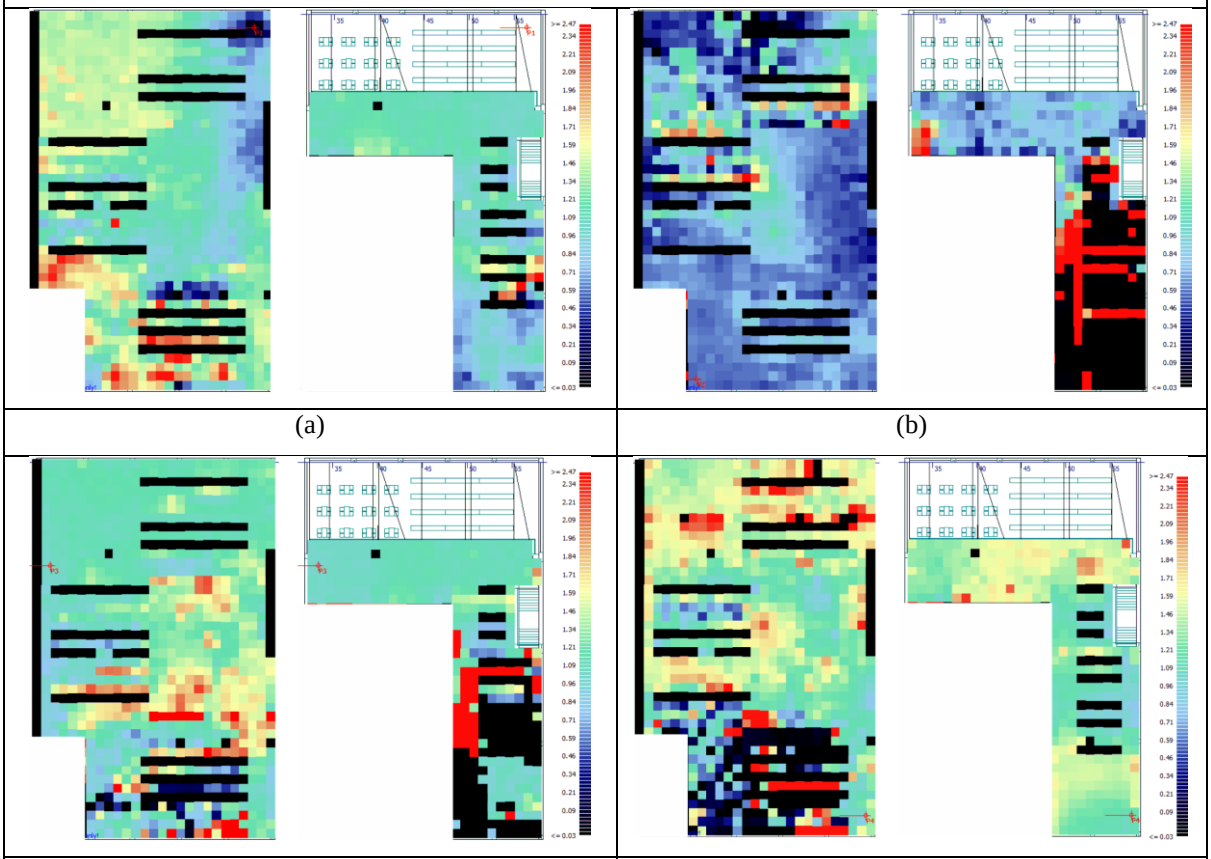


(a) (b)

(c) (d)

Para o modelo M_2, Fig. 3, observam-se maiores valores para T30, considerando os dois níveis da sala, na frequência de 500 Hz, para cada uma das fontes. Observa-se algumas distorções, Fig. 3 (b) e (c), áreas em preto e vermelho, dado que os espaçamentos entre algumas superfícies se encontram abaixo do recomendando para analises computacionais, 0.5 m, entretanto essas não invalidam as análises, uma vez que essas não foram observadas em analises numéricas apresentadas em gráficos anteriores.

Figura 3: Mapeamento acústico da sala, para T30, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), na frequência de 500 Hz, para o modelo M_2.

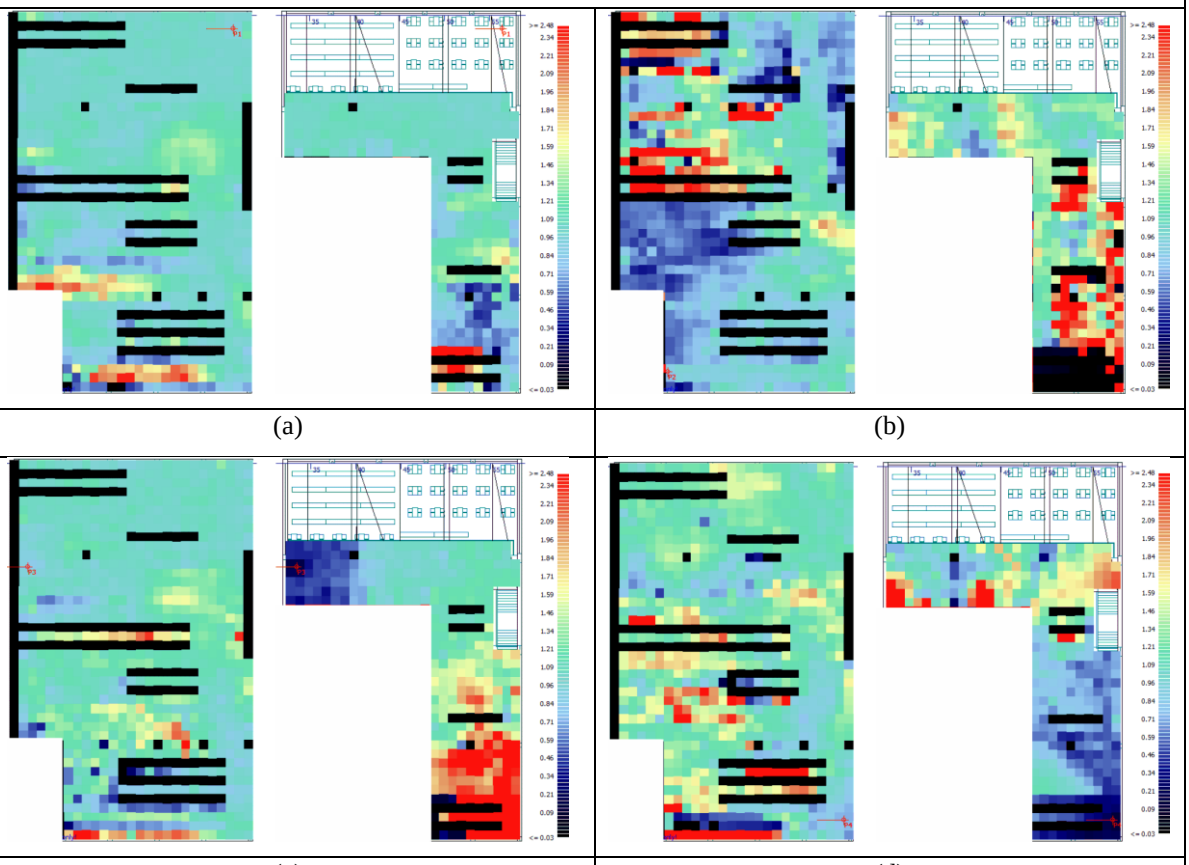


(a) (b)

(c) (d)

Para o modelo M_3, a Fig. 4 ilustra o mapeamento e menores flutuações em T30 a 500 Hz, para cada uma das fontes, considerando os dois níveis da sala. Tal modelo apresenta cores mais uniformes ao longo da sala.

Figura 4: Mapeamento acústico da sala, para T30, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), na frequência de 500 Hz, para o modelo M_3.

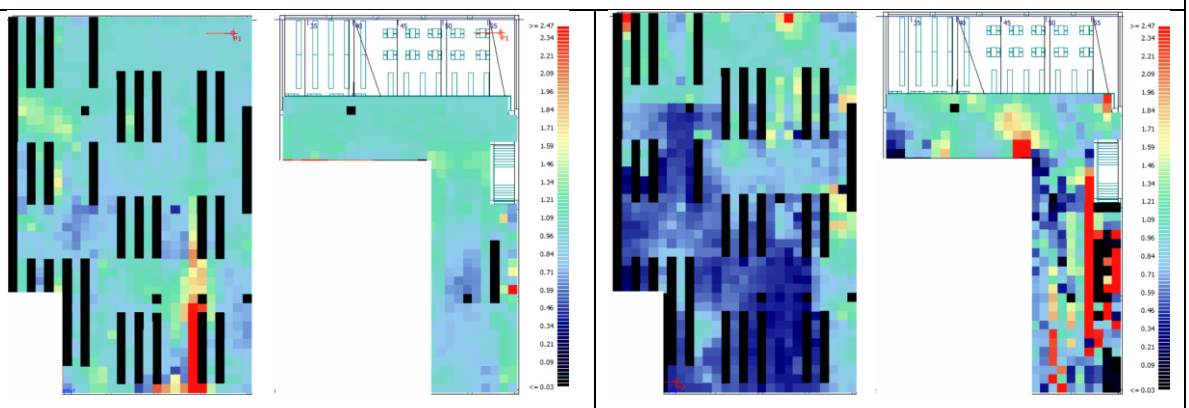


(a) (b)

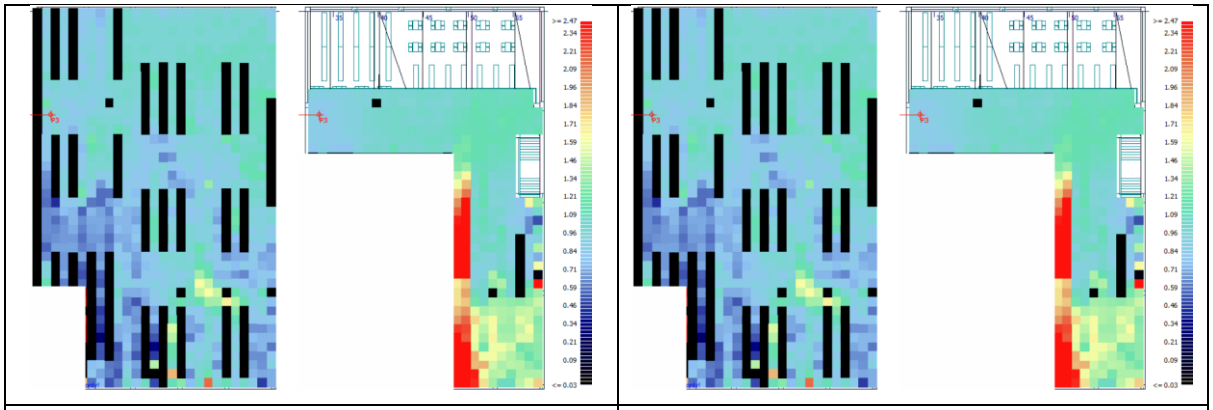
(c) (d)

Para o modelo M_4, a Fig. 5 apresenta o mapeamento acústico para cada uma das fontes, considerando os dois níveis da sala.

Figura 5: Mapeamento acústico da sala, para T30, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), na frequência de 500 Hz, para o modelo M_4.



(a) (b)



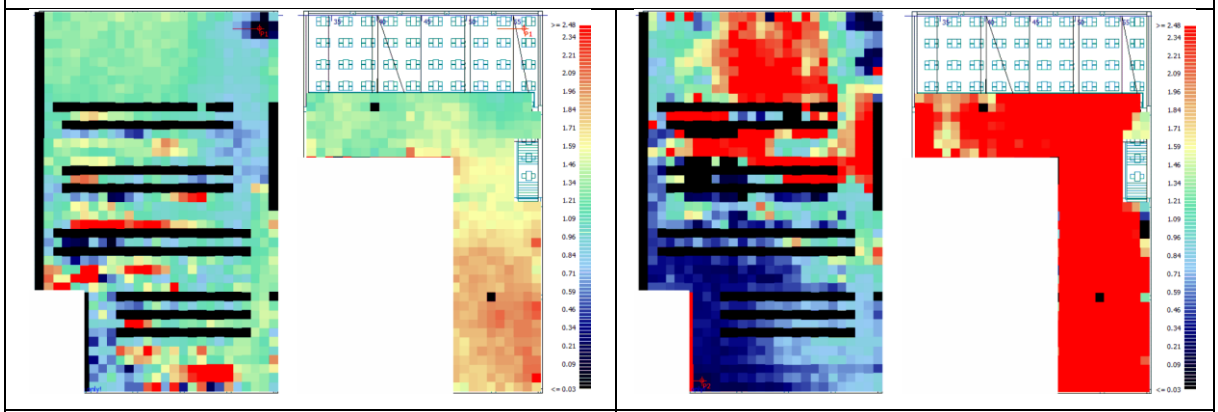
(c) (d)

2. Tempo de decaimento inicial, EDT

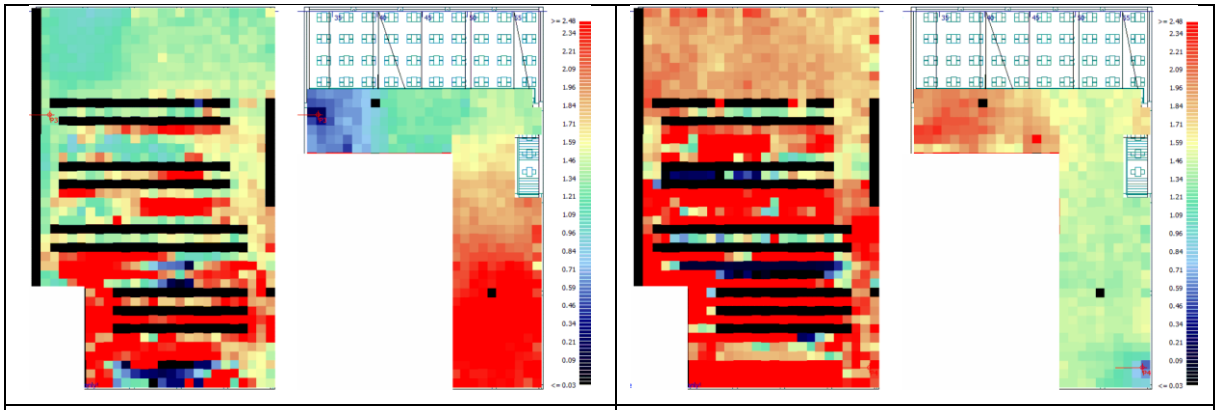
Para o mapeamento acústico do Tempo de decaimento Inicial por fonte (Sn) a 500Hz, apresentado nas figuras 6 a 10, para cada uma das configurações propostas anteriormente.

Na figura 6 (a) a (d) observa-se os mapeamentos referente ao modelo M_0 para o tempo de decaimento inicial, na frequência de 500 Hz, para cada uma das fontes, considerando os dois níveis da sala. Distorções são observadas, Fig. 6 (b) uma vez que o valor de EDT é mais sensível ao posicionamento do receptor e da fonte.

Figura 6: Mapeamento acústico da sala, para EDT, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), na frequência de 500Hz, para o modelo M_0.



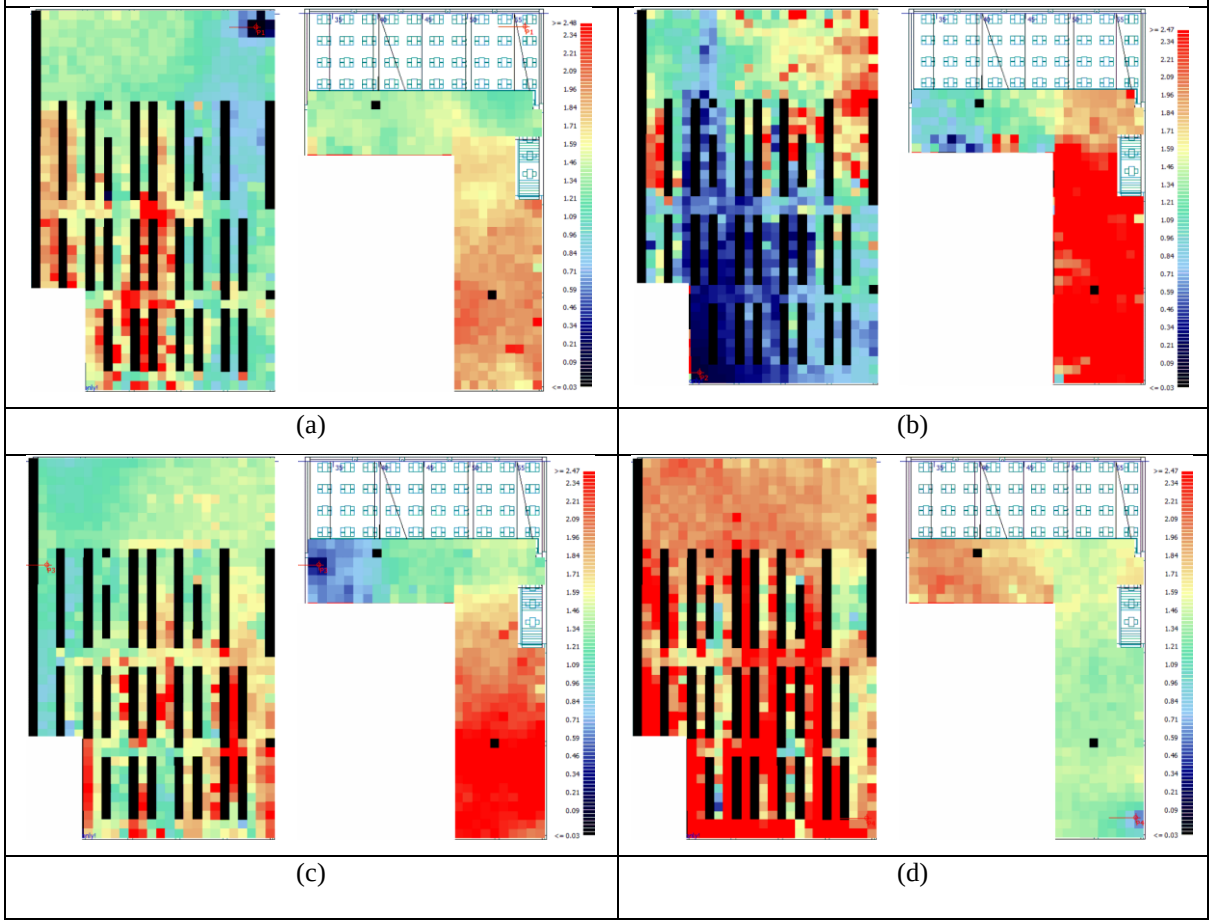
(a) (b)



(c) (d)

A figura 7, mostra o mapeamento acústico de EDT para o modelo M_1, a 500Hz, para cada uma das fontes, considerando os dois níveis da sala. É possível observar um maior decaimento referente a fonte S2, principalmente na área de acervo.

Figura 7: Mapeamento acústico da sala, para EDT, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), na frequência de 500Hz, para o modelo M_1.

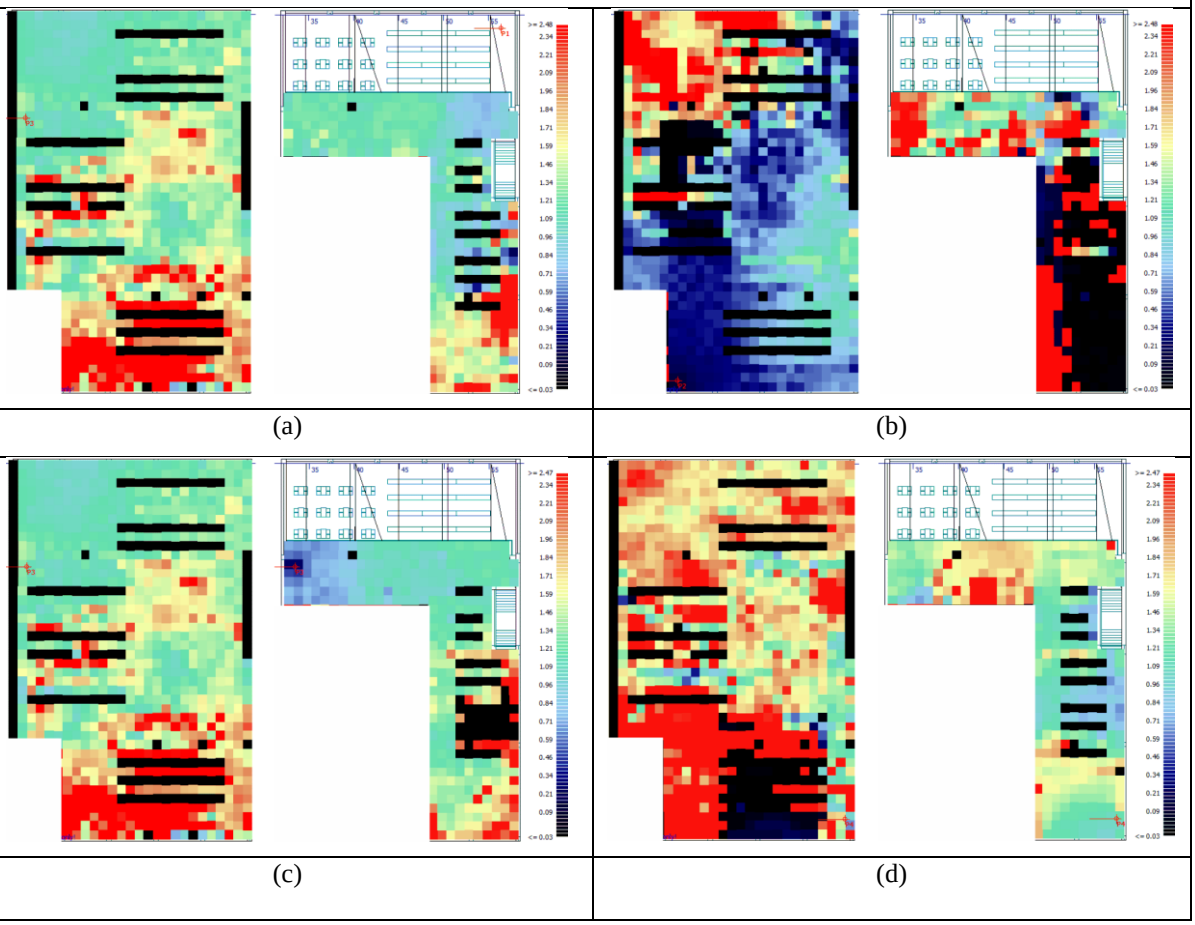


(a) (b)

(c) (d)

Para o modelo M_2, figura 8, são apresentados os valores de EDT, para cada uma das fontes, considerando os dois níveis da sala. Distorções pontuais são observadas, para a fonte S2 e S4, figuras 8 (b) e (d), respectivamente.

Figura 8: Mapeamento acústico da sala, para EDT, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), na frequência de 500Hz, para o modelo M_2.

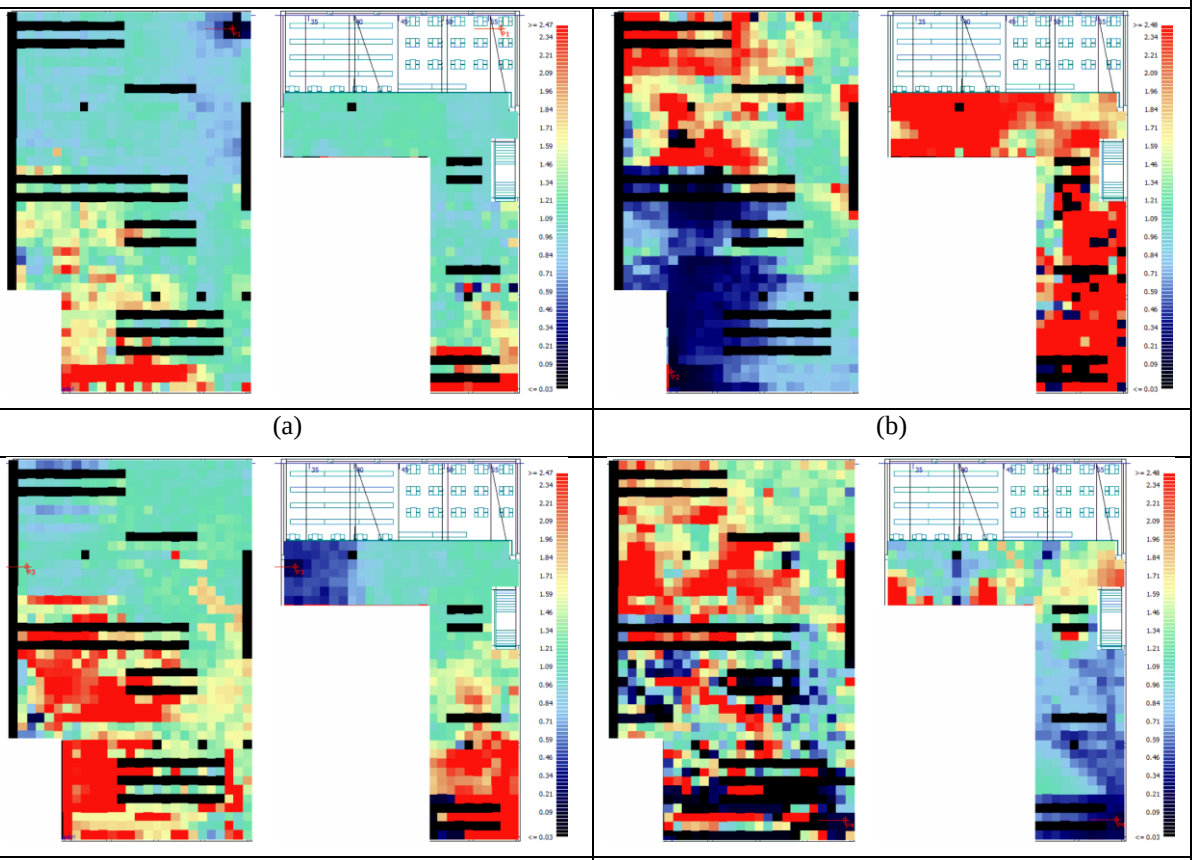


(a) (b)

(c) (d)

Para o modelo M_3, figura 9, ilustram menores flutuações em T30, apresentando cores mais uniformes ao longo da sala.

Figura 9: Mapeamento acústico da sala, para EDT, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), na frequência de 500Hz, para o modelo M_3.

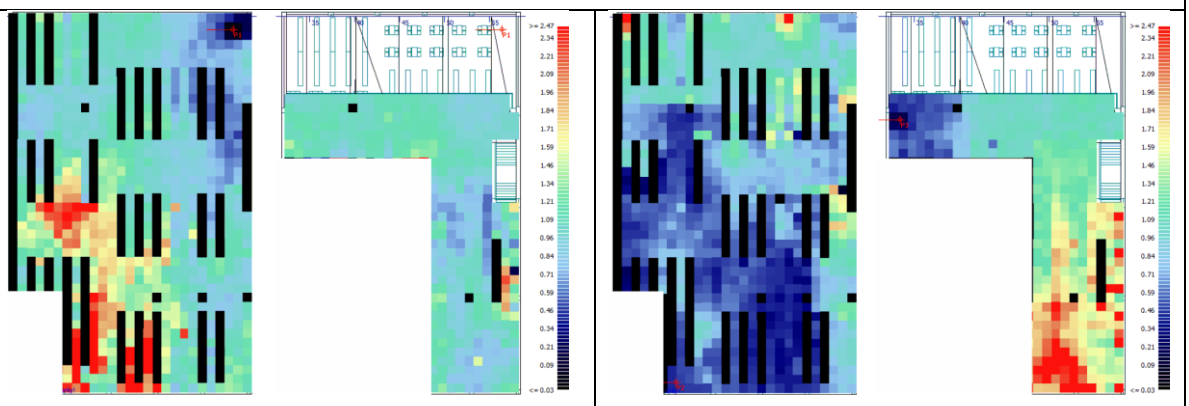


(a) (b)

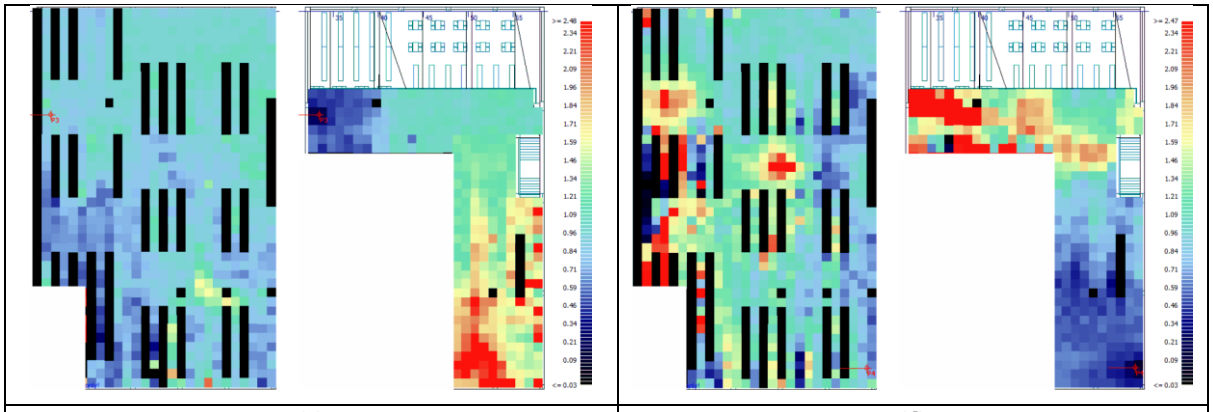
(c) (d)

Para o modelo M_4, figura 10, apresenta-se valores de EDT, para cada uma das fontes, a frequência de 500 Hz, considerando os dois níveis da sala.

Figura 10: Mapeamento acústico da sala, para EDT, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), na frequência de 500Hz, para o modelo M_4.



(a) (b)

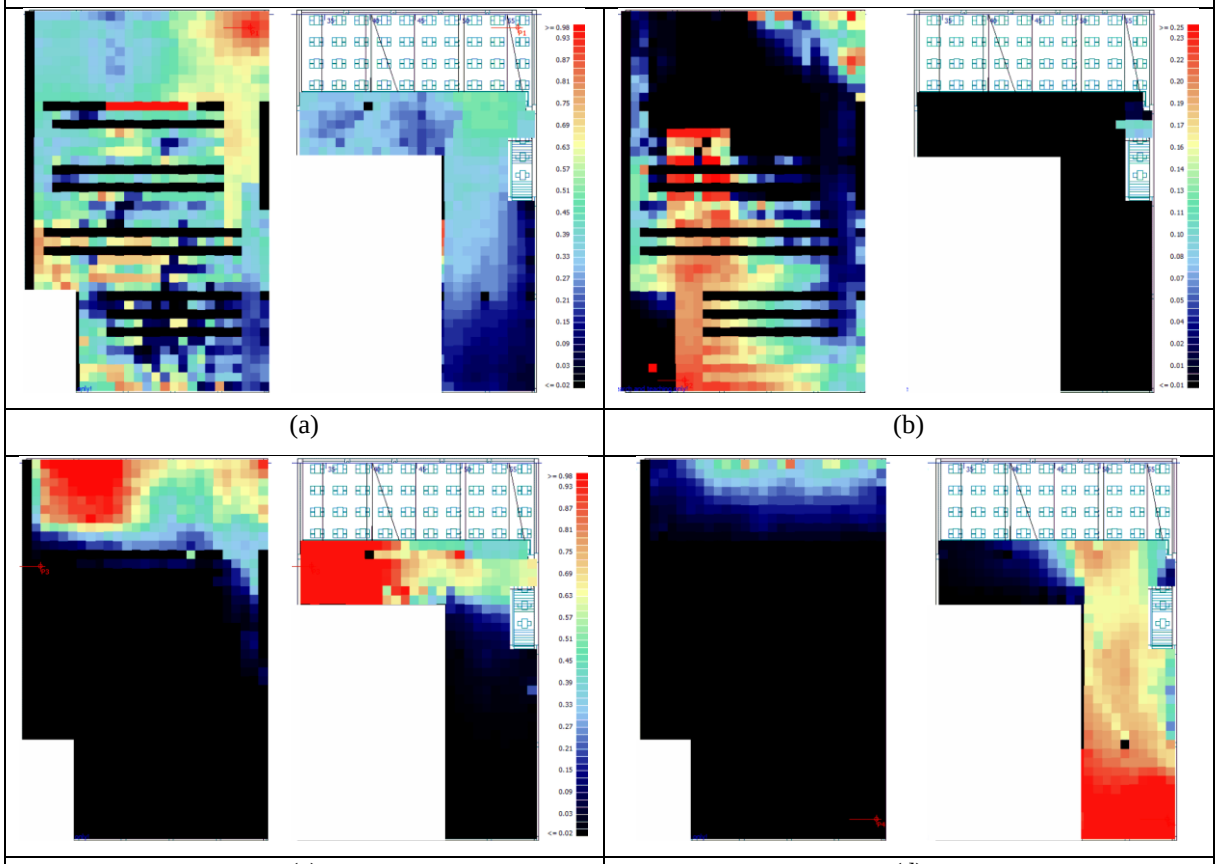


(c) (d)

3. Definição, D50

Para o mapeamento acústico da Definição (D50), por fonte (Sn) a 500hz, apresentado nas figuras 11 a 15, para cada uma das configurações propostas. Na figura 65 (a) a (d), observa-se o mapeamento referente ao modelo M_0, para D50, para cada uma das fontes, à 500 Hz, para os dois níveis da sala.

Figura 11: Mapeamento acústico da sala, para D50, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), na frequência de 500Hz, para o modelo M_0.

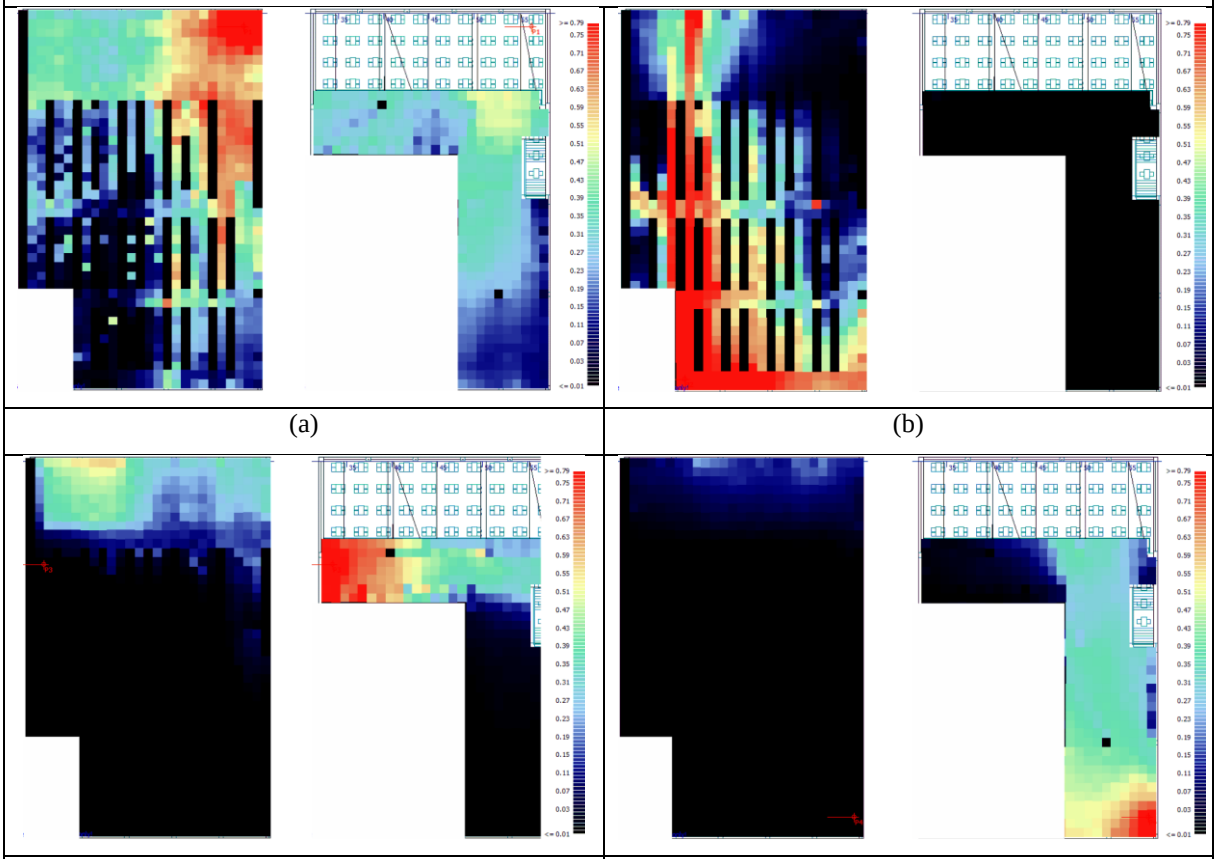


(a) (b)

(c) (d)

A figura 12, apresenta a distribuição espacial de D50 para a sala em estudo considerando o posicionamento de fontes (sn).

Figura 12: Mapeamento acústico da sala, para D50, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), na frequência de 500Hz, para o modelo M_1.

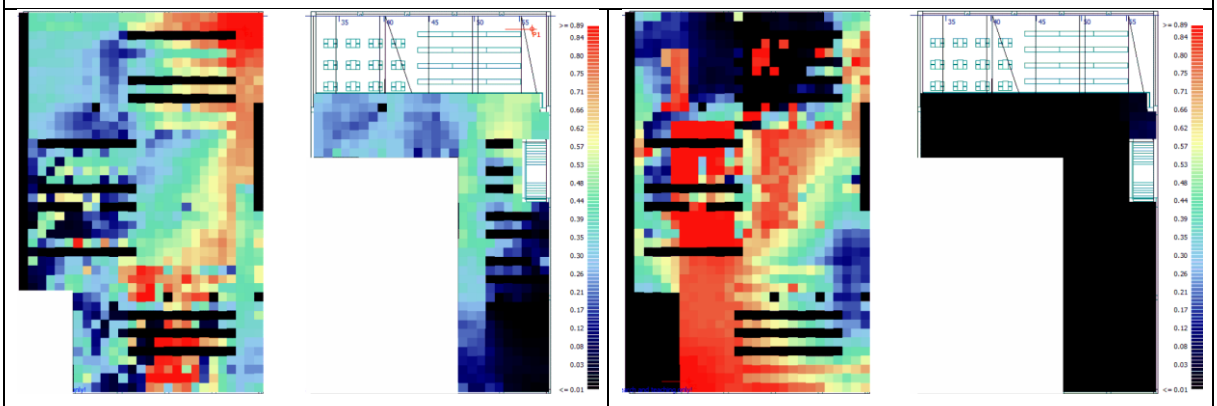


(a) (b)

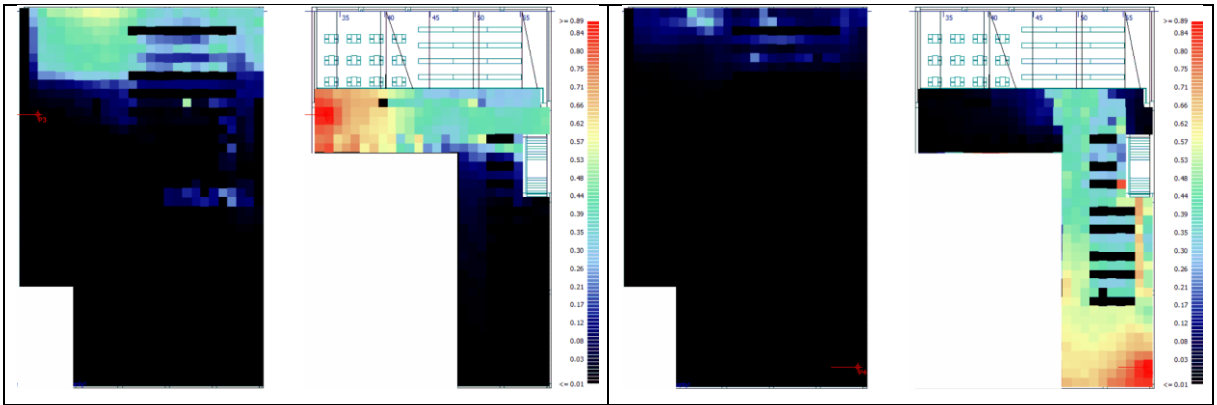
(c) (d)

Na figura 13 (a) a (d), observa-se o mapeamento referente ao modelo M_2, para D50.

Figura 13: Mapeamento acústico da sala, para D50, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), na frequência de 500Hz, para o modelo M_2.



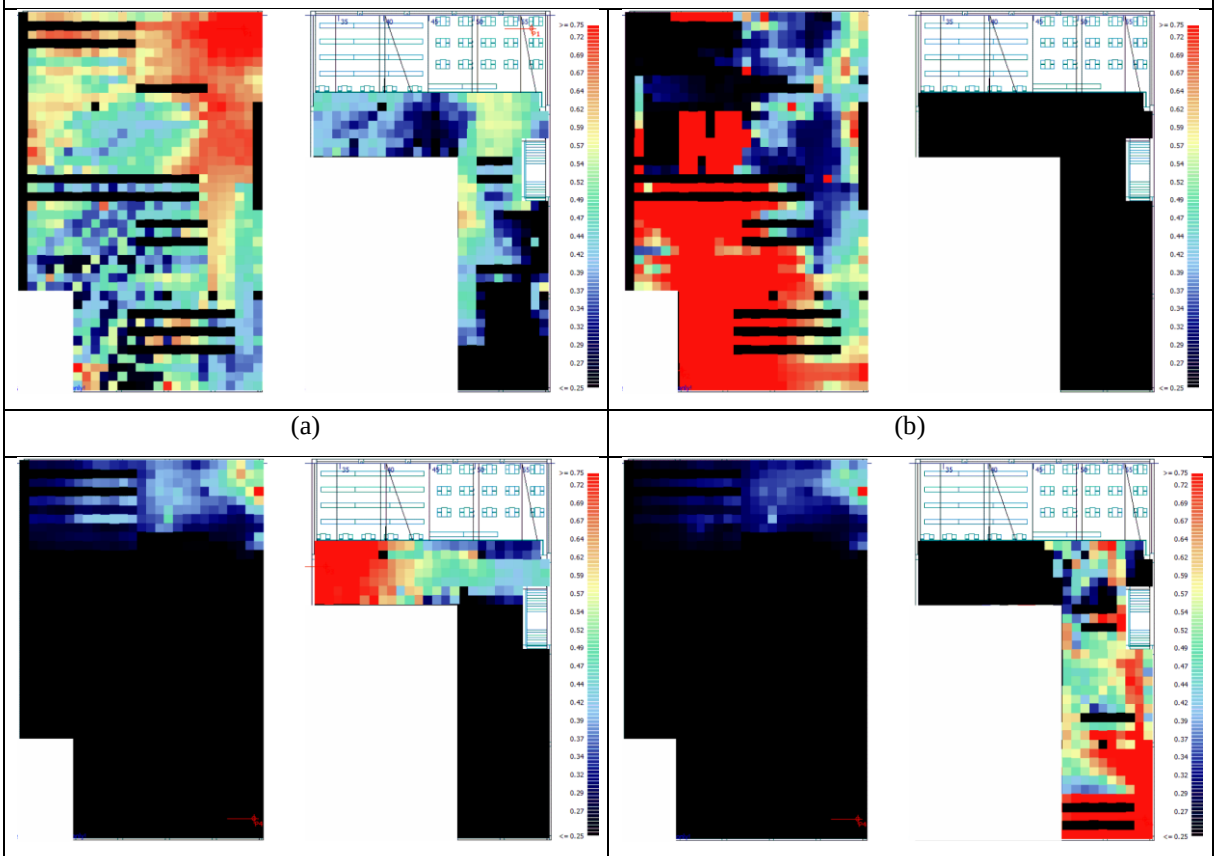
(a) (b)



(c) (d)

A figura 14, apresenta a distribuição espacial de D50 para o modelo M_3, em estudo, considerando o posicionamento de fontes (sn).

Figura 14: Mapeamento acústico da sala, para D50, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), na frequência de 500Hz, para o modelo M_3.

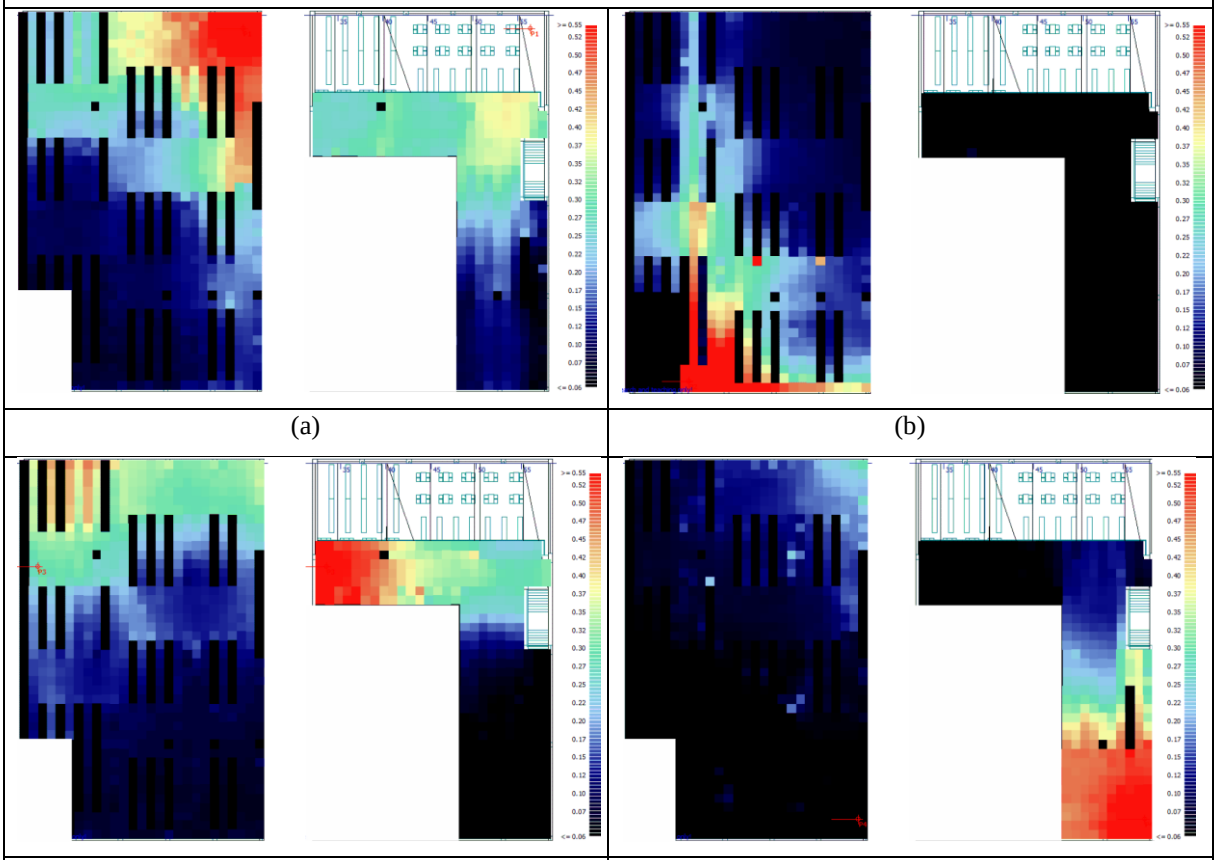


(a) (b)

(c) (d)

A figura 15, apresenta a distribuição espacial de D50 para o modelo M_4 em estudo considerando o posicionamento de fontes (sn).

Figura 15: Mapeamento acústico da sala, para D50, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), na frequência de 500Hz, para o modelo M_4.



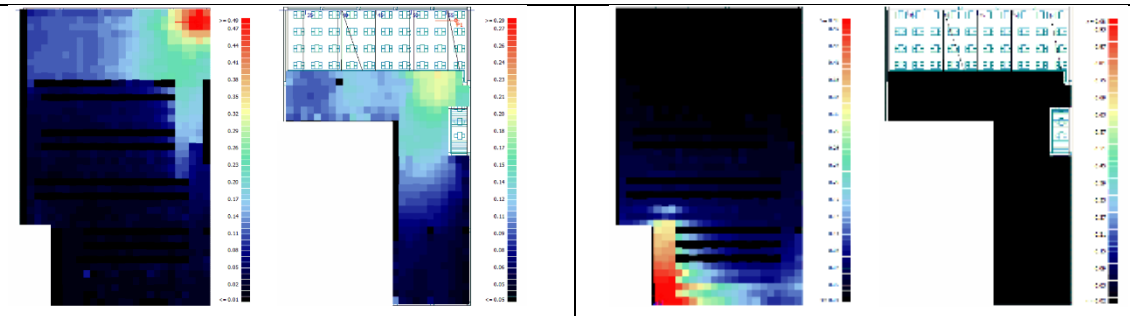
(a) (b)

(c) (d)

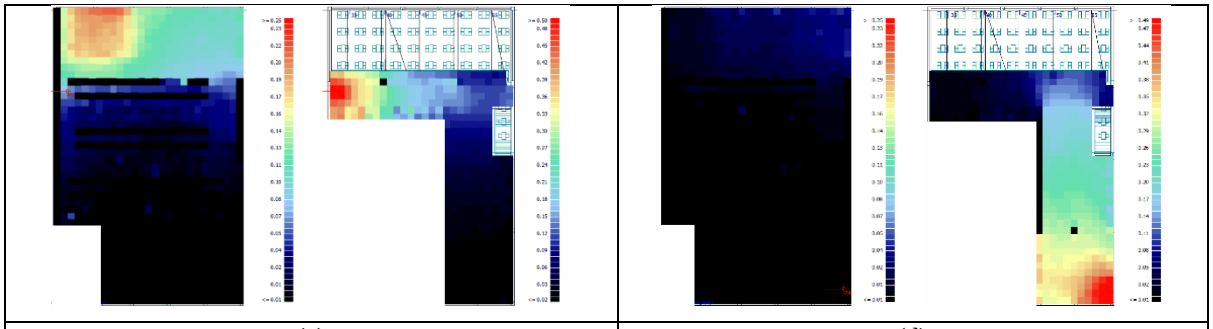
4. Índice de transmissibilidade da fala, STI

Para o mapeamento acústico do índice de Transmissibilidade da Fala por fonte, sendo esse um número único, apresentando nas figuras 16 a 79. A figura 75, apresenta o mapeamento acústico de STI para o modelo M_0.

Figura 16: Mapeamento acústico da sala, para STI, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), para o modelo M_0.



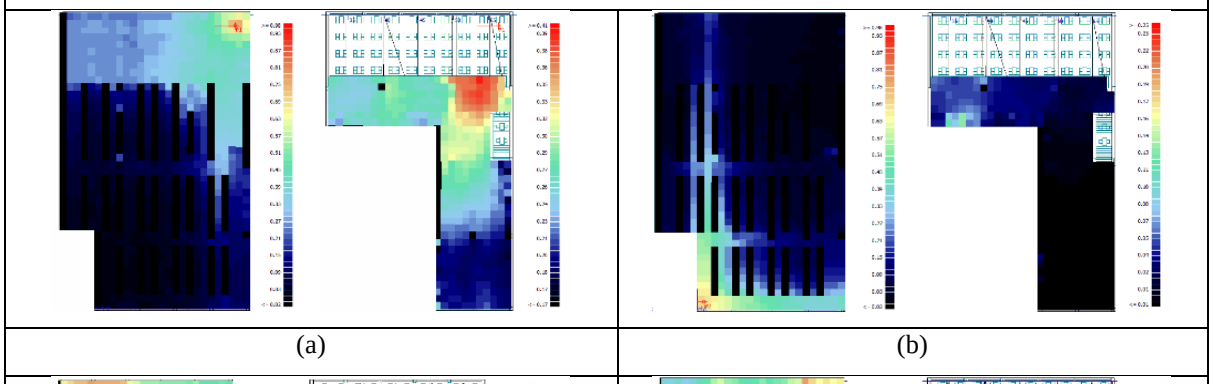
(a) (b)



(c) (d)

A figura 17, mostra o mapeamento acústico de STI para o modelo M_1.

Figura 17: Mapeamento acústico da sala, para STI, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), para o modelo M_1.

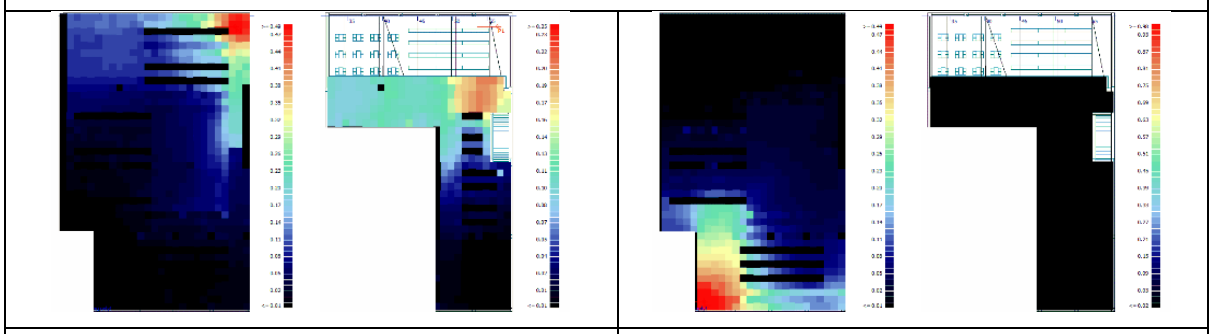


(a) (b)

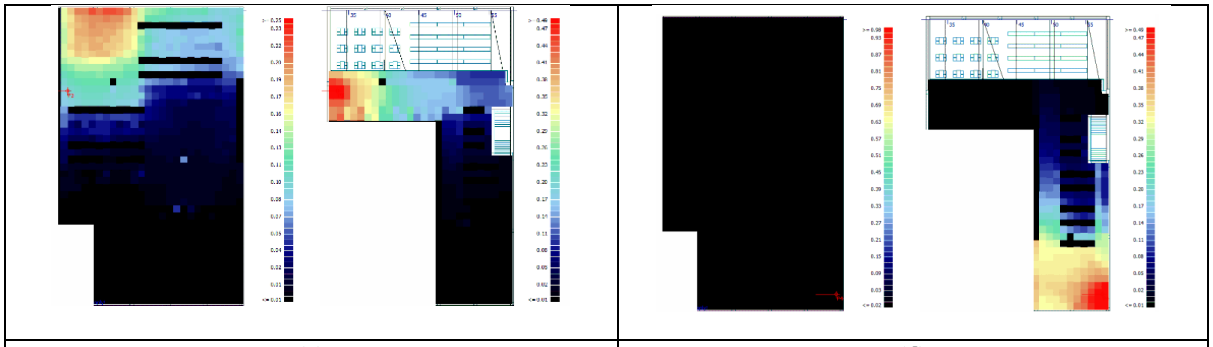
(c) (d)

A figura 18, mostra o mapeamento acústico de STI para o modelo M_2.

Figura 18 Mapeamento acústico da sala, para STI, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), para o modelo M_2.



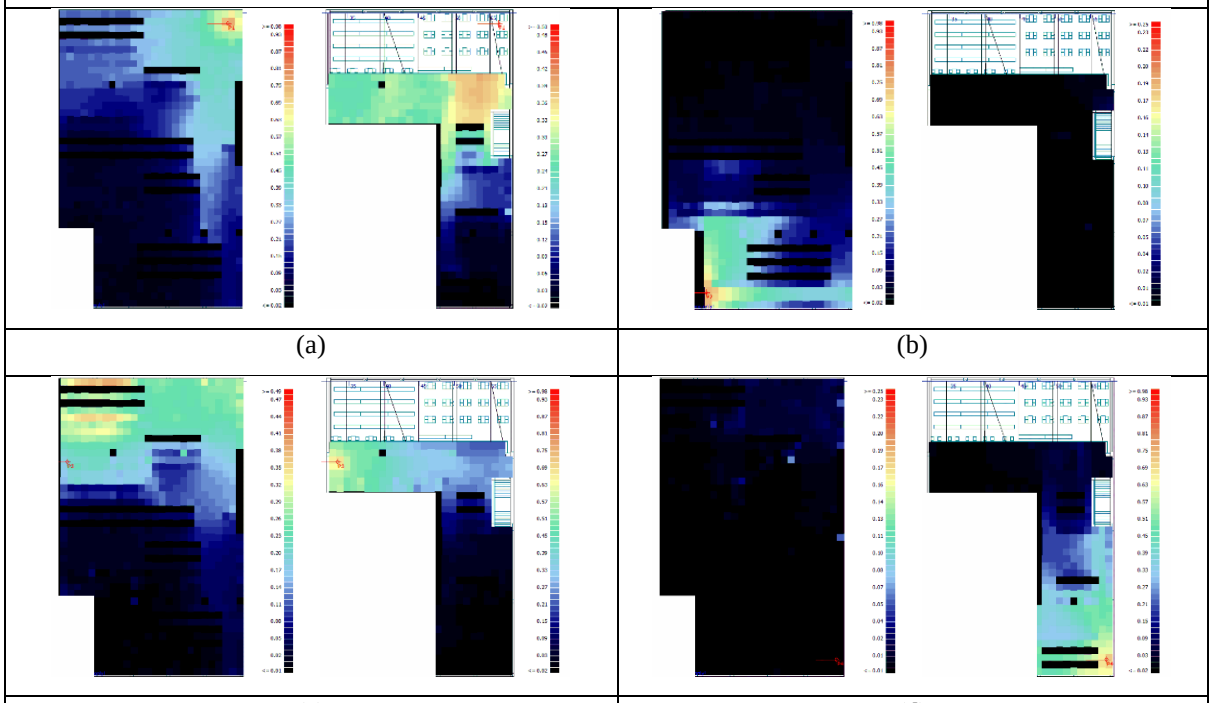
(a) (b)



(c) (d)

A figura 19, mostra o mapeamento acústico de STI para o modelo M_3.

Figura 19: Mapeamento acústico da sala, para STI, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), para o modelo M_3.

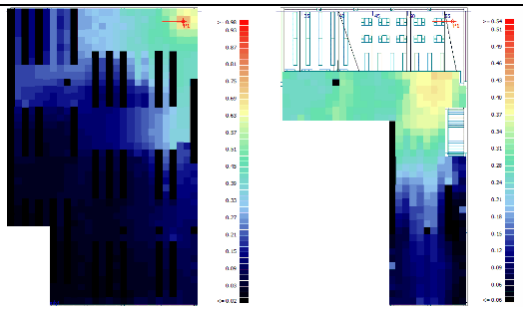


(a) (b)

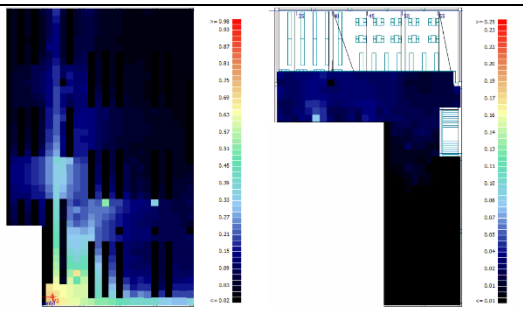
(c) (d)

A figura 20, mostra o mapeamento acústico de STI para o modelo M_4.

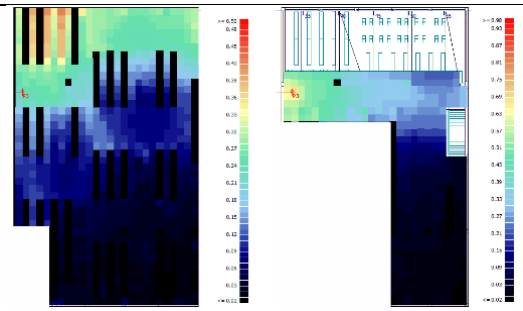
Figura 20: Mapeamento acústico da sala, para STI, considerando emissões da fonte S1(a), S2(b), S3(c) e S4(d), para o modelo M_4.



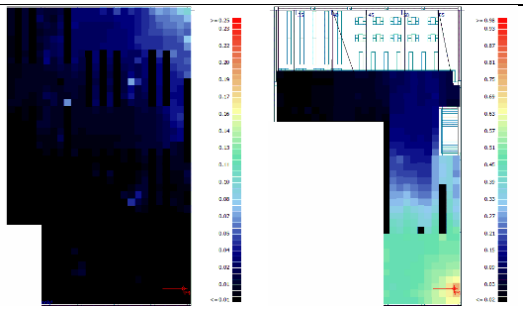
(a)



(b)



(c)



(d)