

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HENRIQUE GEBRAN SILVA

**CÁLCULO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DO
TRAÇADO DE RAIOS ACÚSTICOS IMPORTANDO DADOS GEOMÉTRICOS
DE DESENHO NO AUTOCAD**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GOIÂNIA - GO

2019

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese
 Monografia

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

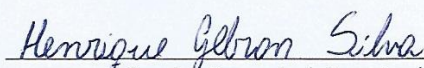
Nome completo do autor: Henrique Gebran Silva

Título do trabalho: **CÁLCULO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DO TRAÇADO DE RAIOS ACÚSTICOS IMPORTANDO DADOS GEOMÉTRICOS DE DESENHO NO AUTOCAD**

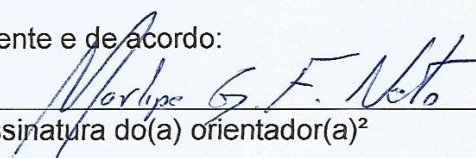
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 06 / 10 / 2019

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

HENRIQUE GEBRAN SILVA

**CÁLCULO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DO
TRAÇADO DE RAIOS ACÚSTICOS IMPORTANDO DADOS GEOMÉTRICOS
DE DESENHO NO AUTOCAD**

Projeto Final de curso, apresentado à Universidade Federal de Goiás como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto

GOIÂNIA
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Gebran Silva, Henrique
CÁLCULO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO
DO TRAÇADO DE RAIOS ACÚSTICOS IMPORTANDO DADOS
GEOMÉTRICOS DE DESENHO NO AUTOCAD [manuscrito] /
Henrique Gebran Silva. - 2019.
94 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2019.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Tempo de reverberação. 2. Método do traçado de raios
acústicos. 3. AutoCAD. I. Garcia Fagundes Neto, Marlipe, orient. II.
Título.

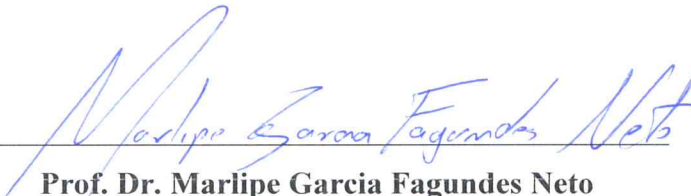
CDU 534

HENRIQUE GEBRAN SILVA

**CÁLCULO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DO
TRAÇADO DE RAIOS ACÚSTICOS IMPORTANDO DADOS GEOMÉTRICOS DE
DESENHO NO AUTOCAD**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para a conclusão do curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação.

Trabalho aprovado. Goiânia, 15 de julho de 2019



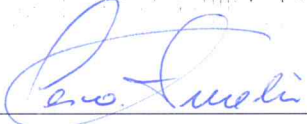
Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto

Orientador - Universidade Federal de Goiás



Prof. Dr. Sigeo Kitatani Júnior

Convidado 1 - Universidade Federal de Goiás



Prof. Dr. Marco Aurélio Brazão Costa Badan

Convidado 2 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

GOIÂNIA - GO

2019

**“O conhecedor do mistério do som
conhece o mistério de todo o universo”.**
- Hazrat Inayat Khan

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado força e saúde para superar as dificuldades;

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio;

Ao meu irmão, que sempre esteve ao meu lado;

Aos professores da Engenharia Mecânica da UFG, por todos ensinamentos e conhecimentos transmitidos;

Ao meu orientador Prof. Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto, pela paciência, atenção e compreensão;

RESUMO

Uma das características acústicas mais importantes na caracterização um recinto, se não a mais importante, é o tempo de reverberação. Esta característica está diretamente ligada às sensações acústicas e a inteligibilidade em um ambiente fechado. Ferramentas que conseguem prever e simular tempos de reverberação são muito úteis para o projeto acústico de salas, auditórios, anfiteatros e outros recintos. Entre os métodos de cálculo do tempo de reverberação estão os métodos estatísticos, como os de Sabine, Eyring-Norris e Eyring, e métodos geométricos como por exemplo o método do traçado de raios acústicos. Os métodos estatísticos são mais simples e de menor custo, por isso são amplamente usados, mas não levam em conta as características geométricas do ambiente. Os métodos estatísticos são usados para geometrias complexas e para o estudo de regiões específicas dentro de um recinto. O objetivo deste trabalho é criar uma rotina no programa computacional MATLAB que importe os dados geométricos de desenhos feitos previamente no programa computacional AutoCAD e calcule o tempo de reverberação de recintos usando o método do traçado de raios acústicos e comparar os resultados com os valores obtidos pelos métodos estatísticos para 3 salas analisadas, de forma a validar o código. Os resultados foram satisfatoriamente próximos dos obtidos pelos métodos estatísticos, e o programa validado. Posteriormente, a absortividade de uma das faces da primeira sala foi alterada e o tempo de reverberação recalculado, para assim mostrar a praticidade ao alterar parâmetros e eficiência do programa.

Palavras chave: tempo de reverberação, método do traçado de raios acústicos, AutoCAD.

ABSTRACT

One of the most important acoustic characteristics in specifying an area, if not the most important, is the reverberation time. This feature is directly linked to acoustic sensations and intelligibility in a closed place. Tools that can predict and simulate reverberation times are very useful for designing rooms, auditoriums, amphitheatres, and other places. Among the methods of calculation of reverberation time are statistical methods, such as those of Sabine, Eyring-Norris and Eyring, and geometric methods such as the method of tracing acoustic rays. Statistical methods are more simple and less expensive, so they are widely used, but do not consider the geometric characteristics of the place. Statistical methods are used for complex geometries and to study specific regions inside a place. The objective of this research is to create a code in the software MATLAB that imports the geometric data of drawings previously made in the software AutoCAD and to calculate the reverberation time of these places using the acoustic rays tracing method and to compare the results with the values obtained by the statistical methods for 3 rooms analyzed, in order to validate the program. The results were satisfactorily close to those obtained by the statistical methods, and the program was validated. After that, the absorptivity of one of the first room sides was changed and the reverberation time recalculated, to show the practicality when changing parameters and efficiency of the program.

Keywords: reverberation time, acoustic ray tracing method, AutoCAD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tempo ótimo de reverberação	12
Figura 2- Ilustração em 2D do traçado de um raio	13
Figura 3 - Teatro Epidaurus século IV a.C., Grécia	16
Figura 4 - Modelo em escala 1:10 do Teatro de Sydney	17
Figura 5 - Balanço energético do som incidente	21
Figura 6 - Decaimento sonoro em recintos e tempo de reverberação.....	23
Figura 7 – Diagrama de direcionalidade da voz humana, para frequência de 4kHz. Cor vermelha – Plano horizontal; Cor azul – Plano vertical.....	27
Figura 8 - Balão de direcionalidade da voz humana, para frequência de 4kHz.....	27
Figura 9 - Fonte dodecaédrica	28
Figura 10 - Reflexão especular.....	31
Figura 11 - Algoritmo usado no método do traçado de raios	32
Figura 12 - Histograma temporal e contabilização da energia vs. tempo	34
Figura 13- Esboço da sala desenhado no AutoCAD	36
Figura 14- Camadas utilizadas no desenho dos recintos, fontes e receptores	37
Figura 15- Imagem das faces da sala 1, fontes (vermelho e preto) e receptores (verde) desenhados no AutoCAD	38
Figura 16- Imagem das faces da sala 2, fontes (vermelho e preto) e receptores (verde) desenhados no AutoCAD	38
Figura 17- Imagem das faces da sala 3, fontes (vermelho e preto) e receptores (verde) desenhados no AutoCAD	39
Figura 18 - Imagem da sala, fontes(verdes) e receptores (vermelhos) plotados no MATLAB	43
Figura 19 - Raios emitidos pela fonte (verde) pela fonte (vermelha) e pontos de intersecção (marrons) ..	47
Figura 20 - Histograma do tempo de chegada dos raios, para sala 1	52
Figura 21 - Gráfico de barras da energia sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1 em sua primeira combinação de fonte e receptor.....	53
Figura 22 - Gráfico de barras do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1 em sua primeira combinação de fonte e receptor	54
Figura 23 - Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1 em sua primeira combinação de fonte e receptor	55
Figura 24 - Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 2 em sua primeira combinação de fonte e receptor	56
Figura 25 - Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 3 em sua primeira combinação de fonte e receptor	56
Figura 26 - Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1 com material absorvedor, em sua primeira combinação de fonte e receptor	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coordenadas das fontes e dos receptores da sala 1	40
Tabela 2 - Coordenadas das fontes e dos receptores da sala 2	40
Tabela 3 - Coordenadas das fontes e dos receptores da sala 3	41
Tabela 4 - Pontos que definem os planos da sala 1	42
Tabela 5 - Coeficientes de absorção acústica	44
Tabela 6 - Coeficientes de absorção sonora de alguns materiais presentes nas edificações de escritórios	45
Tabela 7 - Parâmetros admitidas no programa	49
Tabela 8 - Estatísticas dos resultados referentes à sala 1	50
Tabela 9 - Estatísticas dos resultados referentes à sala 2	51
Tabela 10 - Estatísticas dos resultados referentes à sala 2.....	51
Tabela 11 – Tempo de reverberação para as salas 1, 2 e 3.....	57
Tabela 12 – Tempo de reverberação para sala 1 com material absorvedor	59

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivo.....	13
1.2 Justificativa	14
1.3 Motivação.....	14
1.4 Estruturação.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Maquetes em escala.....	17
2.2 Método do traçado de raios acústicos.....	18
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1 Absorção Sonora	21
3.2 Tempo de Reverberação.....	22
3.2.1 Métodos Estatísticos – Sabine e Eyring	24
3.2.2. Método Geométrico – Raios Acústicos.....	25
4. METODOLOGIA	35
4.1 Geometria das salas.....	35
4.2 Propriedades dos planos	43
4.3 Propriedades da fonte e receptor	46
4.4 Número de reflexões e planos interceptados	46
4.5 Energia sonora e tempo de reverberação.....	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
6. CONCLUSÃO	60
7. REFERÊNCIAS	62
APÊNDICE A - Código do algoritmo do traçado de raios e funções auxiliares	63
A.01.....	63
A.02.....	68
A.03.....	70
A.04.....	73
A.05.....	73
A.06.....	75
A.07.....	76
A.08.....	77
A.09.....	78
A.10.....	78
APÊNDICE B	80
APÊNDICE C	92

1. INTRODUÇÃO

Sons são flutuações de pressão em um meio compressível, porém a sensação de som só ocorre quando a amplitude destas flutuações e suas frequências estão dentro de uma determinada faixa de valores, faixa audível. Acústica é a ciência que estuda os sons e ruídos, no que se refere à sua propagação e interação com o homem (GERGES, 2000).

A acústica em recintos como salas, auditórios, um estúdio de gravação e galpões industriais deve ser adequada para cada ambiente. Inúmeros fatores alteram as características acústicas de um ambiente fechado, como as propriedades acústicas das superfícies dos materiais presentes, bem como a geometria, o volume do próprio recinto, área das paredes e móveis. Fatores como o volume, dimensões e materiais das superfícies da sala, podem ser mudados e alterados para adequar as necessidades e características desejáveis para cada caso.

Há uma série de normas para regulamentar a exposição dos seres humanos a sons de grande intensidade. A preocupação com a intensidade dos sons, não só pela saúde, mas também pelo conforto acústico, de acordo com cada tipo de ambiente é de extrema importância e vem sendo alvo de diversos estudos. Em uma fábrica, o operário não deve passar grande quantidade de tempo exposto a ruídos de elevada intensidade, pois a perda auditiva e algumas doenças e estão associadas à exposição sonora em níveis elevados de ruído. Destaca-se, também, que, mesmo em salas de aula, bibliotecas e escritórios o ruído pode causar incômodo e provocar perda da produtividade. Diante desses fatos, deve-se buscar um conforto acústico adequado para cada tipo de ambiente (ARANHA, 1995)

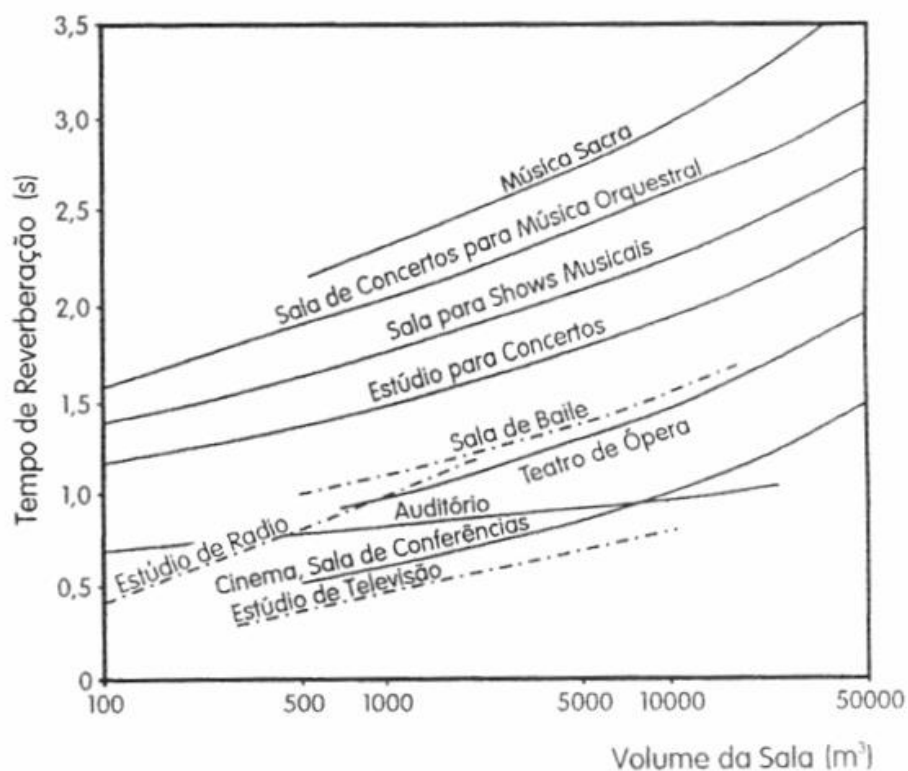
Segundo Gerges (2000), a intensidade do som é uma característica importante, principalmente no que se refere a saúde, mas outras características também devem ser observadas para a qualidade acústica do ambiente. O tempo de reverberação é uma característica essencial para o bom entendimento da fala e distinção dos sons, sendo uma das principais preocupações, talvez a maior delas, em um projeto acústico. O tempo de reverberação era o único parâmetro que relacionava o fenômeno físico com as impressões produzidas nas pessoas. Hoje há vários outros parâmetros diferentes, por volta de dez, podem relacionar o comportamento físico da sala com diferentes tipos de sensações auditivas, como, por exemplo: intensidade, impressão espacial, clareza, brilho, presença, textura, etc.

Na atualidade, a acústica de uma sala, pode ser projetada ou prevista fazendo uso de uma série de ferramentas previsionais, dentre elas as acústicas estatística e geométrica são

usadas para estimar o tempo de reverberação. Os métodos estatísticos, como os métodos de Sabine e Eyring, levam em conta o volume do recinto, as áreas das superfícies e os respectivos coeficientes de absorção, enquanto a acústica geométrica, como a teoria dos raios acústicos, leva em conta também a geometria da sala. Para cada tipo de ambiente há uma necessidade diferente de tempo de reverberação, pois ele está diretamente ligado com a inteligibilidade e sensações provocadas no homem.

Ambientes nos quais se prioriza a inteligibilidade da fala, necessitam de tempos de reverberação menores, para que um som não se sobreponha ao anterior. Salas médias e pequenas, usadas para escritórios, conferências ou aulas, devem ter o tempo de reverberação de 0,5 segundos, enquanto salas de música em geral devem ser mais reverberantes como pode-se observar na Fig. 1.

Figura 1 - Tempo ótimo de reverberação



Fonte: Gerges (2000, p. 267)

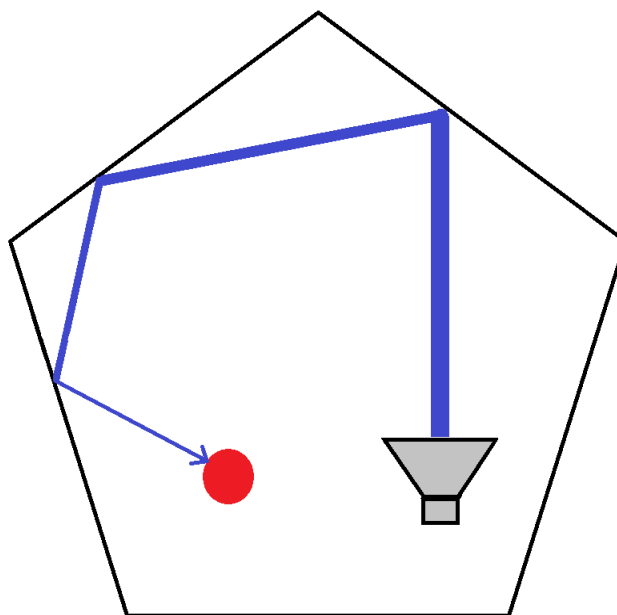
Conforme Menezes (2018, p. 16)

O método do Traçado de Raios parte de uma fonte sonora que emite o som em várias direções, sendo que cada onda sonora é modelada como uma partícula. Para um ponto receptor específico, esse método traça o caminho percorrido por cada partícula, salvando informações relevantes sempre que ela encontra

o receptor. A direção de colisão da partícula com o receptor, a energia com a qual essa partícula atinge o receptor e o tempo em que cada colisão acontecem são exemplos de informações relevantes que devem ser acumuladas durante o processamento do método. A cada reflexão, a partícula perde energia devido ao contato com a parede, o que determina o critério de parada do algoritmo.

A Fig. 2 ilustra um raio emitido por uma fonte, sofrendo reflexões nas superfícies de um recinto e tendo parte de sua energia absorvida, até que atinja o receptor.

Figura 2- Ilustração em 2D do traçado de um raio



Fonte: Própria autoria

Visto isto, o presente trabalho explora a aplicação da teoria de raios acústicos no projeto de ambientes fechados, para a determinação do tempo de reverberação, visando obter maior precisão com relação aos diversos métodos analíticos.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é produzir um código que possa calcular o tempo de reverberação de recintos a partir de geometria importada de um programa computacional de desenho, permitindo rápidas alterações das características e considerações para nova simulação e por fim, validar o programa criado e demonstrar seu uso.

1.2 Justificativa

Estudos anteriores demonstraram que as salas de aula do Centro de Aulas de Engenharia, da Universidade Federal de Goiás, Campus Colemar Natal e Silva, apresentam tempos de reverberação muito elevados, inadequados para salas de aula. Foi identificada a necessidade de uma ferramenta de estudo previsual do tempo de reverberação, para melhoria e projeto de salas. Dessa forma, soluções para as salas do Centro de Aulas de Engenharia, como posicionamento de materiais absorvedores, poderiam ser analisadas, permitindo a solução do problema.

Este trabalho irá produzir uma ferramenta para o cálculo do tempo de reverberação, que poderá ser utilizada tanto para simular e projetar recintos, como para novos estudos na área de acústica de recintos.

O código criado poderá ser usado para o estudo da influência da escolha de parâmetros, da instalação de materiais absorvedores em diferentes distribuições, assim como, das peculiaridades de cada conjunto de posições de fonte e receptor, podendo ser adaptado para determinação de uma malha de receptores em vez de determinar alguns pontos receptores.

1.3 Motivação

Em trabalhos anteriores desenvolvidos durante a iniciação científica, observou-se um grande gasto de energia e tempo para determinar os planos das superfícies que compõem o recinto apenas pelas posições dos pontos que formavam cada parede.

As dificuldades encontradas e a necessidade de se fazer outros estudos utilizando o método do traçado de raios acústicos foram grandes motivadores para se desenvolver um código que conseguisse importar os dados geométricos de um programa computacional de desenho e que permitisse uma fácil e rápida alteração dos parâmetros utilizados.

1.4 Estruturação

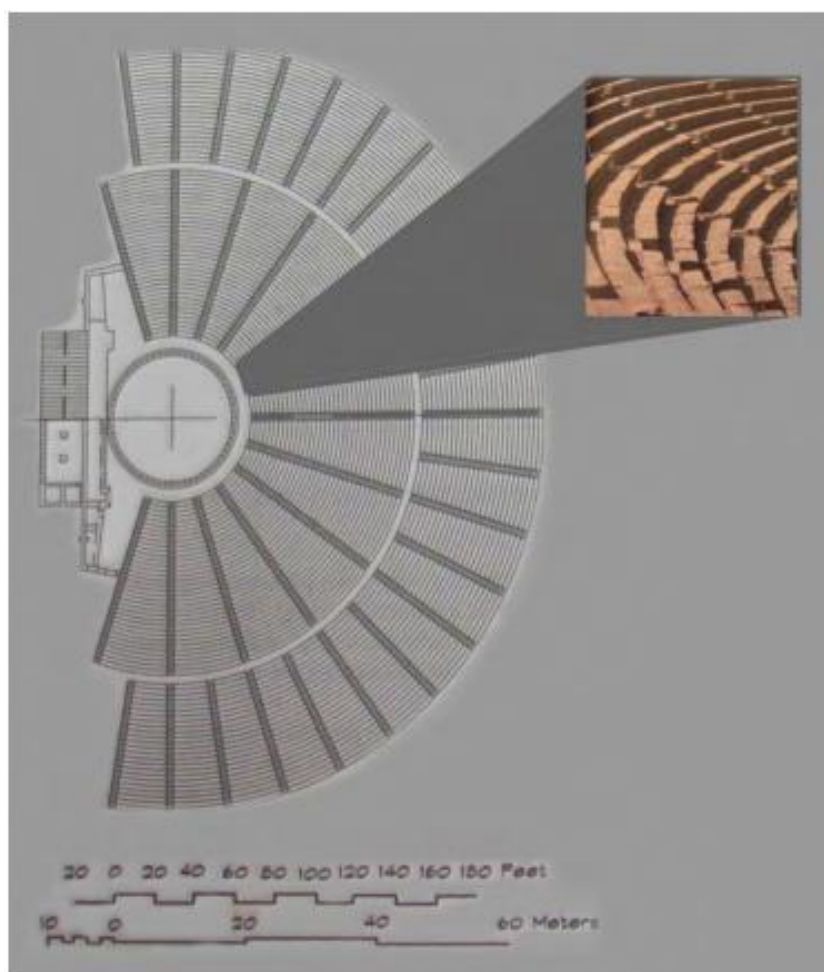
Este Trabalho está estruturado em seis capítulos, iniciados pela introdução. O segundo capítulo exibe uma revisão bibliográfica apresentando trabalhos pioneiros da acústica geométrica e de traçado dos raios acústicos. A fundamentação teórica, apresentando conceitos e equações importantes para o trabalho, será exposta no terceiro capítulo.

No quarto capítulo encontra-se a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, apresentando as considerações e parâmetros utilizados, assim como os meios para se atingir o resultado. Os resultados e as discussões pertinentes a eles serão apresentados no quinto capítulo, seguido pelas conclusões, no sexto capítulo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A acústica geométrica foi utilizada para os primeiros estudos em acústica, possibilitando a criação dos teatros gregos e romanos, Fig. 3. Para os projetos dos teatros romanos, linhas retas eram traçadas entre a fonte sonora situada no palco e as diversas posições na plateia, de forma a arranjar a plateia ao redor do palco, de maneira que se conseguisse ter boas linhas de visão e escuta do espetáculo (GERGES, 2000).

Figura 3 - Teatro Epidaurus século IV a.C., Grécia



Fonte: Stierlin (1994, p. 493)

Há evidências de que gregos e romanos construíram teatros fechados com absorvedores acústicos para melhorar a audibilidade. A acústica geométrica já era utilizada pelos arquitetos dessas civilizações, apesar do uso limitado, quando comparado com seus usos atuais.

2.1 Maquetes em escala

O próximo salto na avaliação acústica de recintos veio com o trabalho pioneiro de Wallace Clement Sabine, que além de contribuir de forma relevante para a teoria estatística, utilizou modelos em escala de salas de concerto e técnicas fotográficas para obter uma visualização da propagação das ondas nas salas. Primeiramente, era construída uma maquete em escala da sala possuindo paredes transparentes, para permitir a visualização da propagação das ondas nos planos vertical e horizontal. Depois, uma fagulha era produzida distante do modelo em escala, enquanto ondas sonoras, em uma dada frequência, eram geradas na maquete por uma fonte sonora. A luz da fagulha era refratada pela onda sonora, devido às diferenças de pressão provocadas por ela, e incidiam em um filme fotográfico em um dado instante de tempo (GERGES, 2000).

Com o passar do tempo, técnicas fotográficas foram substituídas por outras técnicas, como as baseadas em ultrassom ou laser. Modelos em escalas foram usados para projetar muitos recintos, como por exemplo Teatro de Sydney, também conhecido como “A Casa da Ópera de Sydney”, cuja maquete feita na escala de 1:10 pode ser observada na Fig. 4.

Figura 4 - Modelo em escala 1:10 do Teatro de Sydney



Fonte: Jordan apud Rindel (2002, p. 3)

O uso de modelos em escala tem como inconveniente a construção e readequação dos modelos o que o torna demasiadamente caro e demorado. Estes tipos de dificuldades, mais tarde, puderam ser superados pelos modelos virtuais construídos em computador.

2.2 Método do traçado de raios acústicos

Em métodos computacionais, em vez de se construir uma maquete detalhada, uma planta tridimensional de sala é desenhada em computador e as propriedades acústicas das superfícies são atribuídas ao modelo matemático. Os custos inerentes desse processo são bem menores, geralmente são relativos ao programa computacional, da mão de obra e seu treinamento. Mudanças no modelo virtual ou nos parâmetros são feitas de maneira muito mais rápida e barata em relação aos modelos físicos em escala.

De acordo com Gerges (2000), o método do traçado de raios foi o primeiro dos métodos computacionais utilizando a acústica geométrica, tendo seu início em 1960, através dos trabalhos de Krokstad, de Strom e Sorsdal e o de Schroeder. Baseados na propagação retilínea de uma frente de onda, Princípio de Fermat, a frente de onda é tratada como raios sonoros com direção e sentido de propagação, carregando uma fração da energia sonora.

Segundo Gomes (1998, p. 25) “Como a resposta impulsiva de uma sala é, atualmente, essencial para a investigação da qualidade acústica, dois tipos básicos de algoritmos computacionais, baseados nos princípios da acústica geométrica, foram desenvolvidos para se chegar a uma resposta impulsiva aproximada. Um destes algoritmos é baseado na ideia de que cada reflexão pode ser imaginada como uma fonte virtual, existente fora da sala e constituída pela imagem especular da fonte, cuja energia sonora, ao cruzar a fronteira, sofre uma perda correspondente ao coeficiente de absorção da sala. Este algoritmo é conhecido como Fonte imagem especular (“image-source”). O outro algoritmo simplesmente “segue” o raio sonoro, levando em conta a lei da reflexão e é conhecido como algoritmo de raios acústicos (“ray-tracing”).”

Em seu trabalho, Gomes (1998) utilizou o programa computacional de raios acústicos RAYNOISE para simular salas, variando o número de reflexões considerado no critério de abandono de raios e o número total de raios emitidos. Depois de várias simulações e comparações com valores medidos para o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC e o teatro do Centro Integrado de Cultura, localizado em Florianópolis, Santa Catarina, Gomes concluiu que o programa deve ser usado de forma criteriosa e cuidados devem

ser tomados na escolha dos parâmetros de entrada, como o número de raios, ordem de reflexão, coeficientes de absorção e difusão.

Segundo Gomes as diferenças encontradas podem indicar que algumas propriedades das superfícies dos modelos não foram bem escolhidas, bem como coeficientes de absorção e de difusão ou ainda algum erro do próprio algoritmo ou método utilizado. O autor ainda sugere o estudo de outros casos, inclusive simulando salas mais simples que o auditório escolhido para seu trabalho, para que se certifique qual a razão das divergências encontradas.

Segundo Bistafa (2011) a possibilidade de exportar a geometria gerada e programa computacional tipo CAD para programas que utilizem o método do traçado dos raios acústicos é muito atraente para o arquiteto que busca simular o comportamento acústico de uma sala.

O trabalho de Moraes (2007) desenvolveu um estudo do comportamento acústico de um galpão e encontrou soluções, utilizando um programa computacional comercial de raios acústicos para tratá-lo acusticamente de forma a transformá-lo em um teatro experimental. A grande carência de um espaço experimental em Belém fez com que a Escola de Teatro e Dança da Universidade Federal do Pará (ETUFPA) apresentasse uma proposta desafiadora de construir um teatro experimental na própria escola adaptando um galpão existente, de forma a atender as necessidades dos seus usuários.

Primeiramente foram comparados os resultados das simulações usando um modelo de uma sala da ETUFPA, os resultados foram comparados com os obtidos através de medições experimentais. Os valores experimentais e teóricos foram próximos, validando o modelo computacional.

Posteriormente no trabalho, Moraes faz várias simulações propondo diferentes soluções para a construção da sala de teatro e dança no espaço do galpão. Apenas com as poucas interferências, como a redução do comprimento da sala, substituição do piso e portas, vedação das janelas e substituição do forro por forro acústico foi possível reduzir significativamente o tempo de reverberação.

Em trabalho recente Silva, Neto e Resende (2018), criaram um código no programa computacional MATLAB que calculasse o tempo de reverberação de salas utilizando o algoritmo do traçado de raios acústicos. A geometria da sala era simples e era obtida pela introdução dos pontos que constituíam vértices do recinto.

Em um segundo momento do trabalho, diferentes raios de receptor foram usados como parâmetro para as simulações. Seis valores diferentes de raios de receptor foram utilizados para a sala estudada, variando de 0,05 até 1 metro. Os valores obtidos através do método do traçado de raios acústicos foram comparados com resultados dos métodos estatísticos de Sabine e

Eyring. No final do trabalho, pôde-se concluir que raios muito grandes geravam erros pelos receptores influenciarem muito no recinto, enquanto que raios muito pequenos aumentavam o custo computacional, sugerindo que para a sala em questão 0,2 metro era o tamanho de receptor mais adequado.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

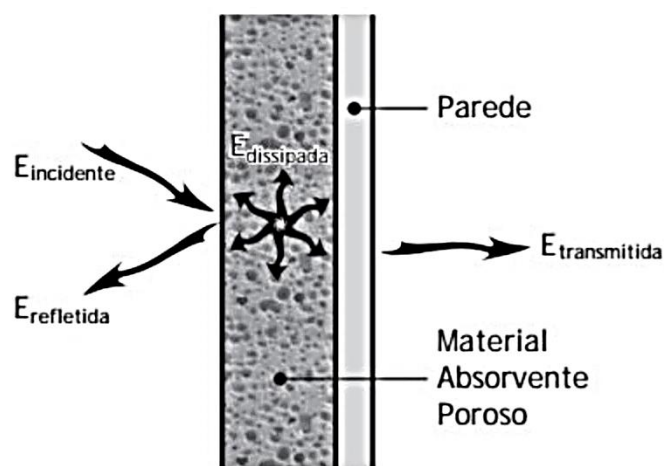
O tempo de reverberação é especialmente utilizado para a caracterização acústica de ambientes fechados e depende da forma com que o recinto e seus objetos interagem com a energia sonora emitida em seu interior. Cada superfície tem diferentes propriedades acústicas, que caracterizam como esta superfície interage com o som, nas quais referem-se a parcela de energia absorvida, a parcela refletida e a direção em que será refletida.

Vários fatores e características da sala influenciam na forma com que a energia sonora de um recinto decairá. Ao se ligar uma fonte sonora qualquer em um ambiente fechado, a energia se eleva até atingir um nível sonoro estacionário, uma condição de equilíbrio. Quando esta situação é atingida a energia sonora absorvida pelo recinto, suas paredes, piso, teto, móveis e todas as superfícies, é exatamente igual a energia injetada pela fonte sonora (BISTAFA, 2011).

3.1 Absorção Sonora

Quando uma onda sonora incide em uma superfície, parte da energia é refletida de volta para o meio de onde veio, parte é transmitida pela parede e a energia restante é transformada em calor, sendo dissipada, como mostrado na Fig. 5. Comumente se agrupa as duas últimas parcelas citadas, se referindo a elas como energia absorvida, que seria a fração que não “retorna” da parede para o recinto.

Figura 5 - Balanço energético do som incidente



$$E_{\text{absorvida}} = E_{\text{dissipada}} + E_{\text{transmitida}}$$

Fonte: Bistafa (2011, p.279)

A capacidade de uma superfície qualquer de absorver o som é dada pela relação entre a intensidade absorvida pela incidente, muitas vezes, convenientemente a primeira pode ser expressa como a diferença da intensidade incidente e refletida como indicado na Eq. (1). A essa característica das superfícies se dá o nome de absortividade, cuja é expressa pelo coeficiente de absorção sonora.

$$\alpha = \frac{I_{\text{absorvida}}}{I_{\text{incidente}}} = \frac{I_{\text{incidente}} - I_{\text{refletida}}}{I_{\text{incidente}}} = 1 - \frac{I_{\text{refletida}}}{I_{\text{incidente}}} \quad (1)$$

A absortividade é uma característica obtida experimentalmente, apesar de haver muitas tabelas na literatura com valores para inúmeros materiais, é recomendado medi-la experimentalmente devido à sua grande variação de acordo com a origem dos dados. Tal variação nos valores encontrados se dá por generalizações que são feitas a respeito da maioria dos materiais tabelados. Muitos materiais parecidos tem propriedades acústicas consideravelmente diferentes, por diferenças na composição, processo de fabricação, densidade, rugosidade e irregularidades na superfície entre outros aspectos.

Segundo Bistafa (2011, p.232), “o coeficiente de absorção sonora normalmente utilizado nas aplicações é aquele obtido experimentalmente em uma câmara de testes especial, denominada de câmara reverberante”.

Materiais comumente utilizados para absorver o som e conseqüentemente diminuir o tempo de reverberação dos recintos, são fibrosos (lã de vidro, lã de rocha, etc.) ou porosos (espumas de poliuretano, do tipo das esponjas utilizadas em limpeza doméstica, etc.). Nesses materiais, a absorção ocorre pela dissipação da energia sonora por atrito, devido ao movimento das moléculas do ar no interior do material, quando da passagem de onda sonora (BISTAFA, 2011).

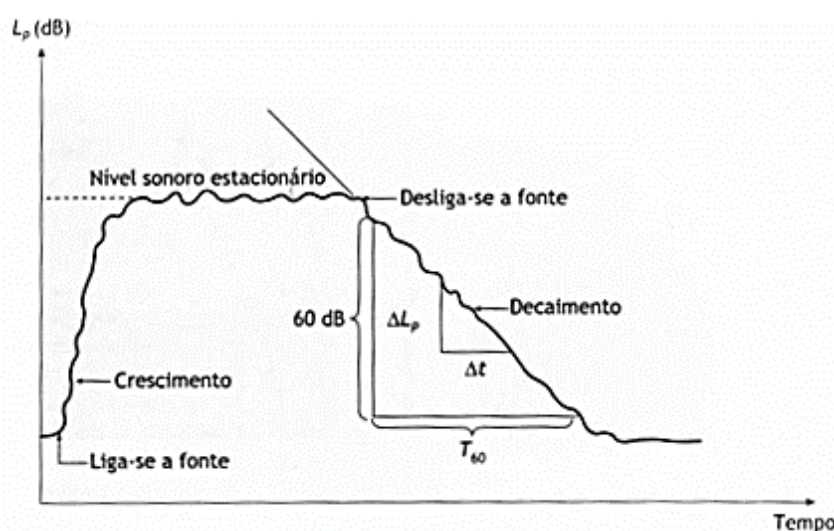
3.2 Tempo de Reverberação

Quanto maior a absortividade das superfícies de um recinto menor será o tempo de decaimento de energia, ou seja, mais rapidamente o som se dissipará. A escolha dos materiais e objetos de uma sala, no que se refere às características acústicas, deve ser de acordo com a finalidade no ambiente, favorecendo o entendimento da fala, ou a musicalidade. O volume da sala também é uma característica que influencia o tempo de reverberação, pois quanto maiores

as dimensões da sala, maiores as distâncias percorridas entre reflexões e mais lentamente a energia se dissipa, uma vez que a velocidade do som é constante, aumentando o tempo de reverberação.

O tempo de reverberação (T_{60}) é definido como o tempo necessário para que a energia sonora no recinto seja reduzida a um milionésimo da energia de estado estacionário após o desligamento da fonte sonora, o que na escala logarítmica corresponde a uma queda do nível de pressão sonora de 60 dB. Muitas vezes não é possível observar uma queda no nível sonoro de 60 dB, sendo utilizados o T30 ou T20 que são feitos a partir de decaimentos menores, 30 e 20 dB respectivamente, e corrigidos proporcionalmente. Observa-se na Fig. 6, após o desligamento da fonte o nível sonoro, até então nível sonoro estacionário, decairá a uma taxa aproximadamente constante.

Figura 6 - Decaimento sonoro em recintos e tempo de reverberação



Fonte: Bistafa (2011, p.246)

Segundo Brandão (2016), há muitas maneiras de se calcular o tempo de reverberação teórico de um recinto, os métodos podem ser baseados na teoria estatística ou na teoria geométrica, ambas válidas para alta densidade modal. A implementação dos métodos geométricos, depende de programa computacional adequado e da construção do modelo 3D da sala. Métodos estatísticos geralmente levam em conta o volume do recinto, as áreas das superfícies e seus coeficientes de absorção. Os métodos mais convencionais para a determinação do tempo de reverberação são os estatísticos como Sabine e Eyring.

3.2.1 Métodos Estatísticos – Sabine e Eyring

Para salas com tempo de reverberações relativamente altos e com uniforme distribuição dos materiais de absorção, a fórmula de Sabine, Eq. (2), é uma boa aproximação do provável comportamento sonoro da sala.

$$TR = 0,16 \frac{V}{\sum \alpha \cdot A} \quad (2)$$

Sendo:

TR – Tempo de reverberação;

V – Volume do recinto (m³);

A – Área de cada material (m²);

α – O coeficiente de absorção sonora.

Algumas pressuposições podem passar despercebidas pelo equacionamento de Sabine, como a distribuição dos diferentes coeficientes da sala, assumindo uma distribuição uniforme. Este equacionamento também considera que cada reflexão independe das demais, o que não é verdade. Pode-se perceber pela Eq. (2) que se o coeficiente de absorvidade tender a 1, o tempo de reverberação não será zero como previsto, isto foi corrigido por Eyring-Norris, Eq. (3), através do logaritmo de um menos a absorvidade média.

$$TR = \frac{-0,163V}{S \cdot \ln(1-\bar{\alpha})} \quad (3)$$

Sendo:

TR – Tempo de reverberação;

V – Volume do recinto (m³);

S – Área superficial (m²);

$\bar{\alpha}$ – O coeficiente de absorção sonora médio.

Outra fórmula derivada por Eyring deve ser usada principalmente quando o coeficiente de absorção médio é maior que 0,3. Esta fórmula está transcrita na Eq. (4) a seguir:

$$TR = \frac{-0,161V}{2,3.(S.\log(1-\bar{\alpha}))} \quad (4)$$

Sendo:

TR – Tempo de reverberação;

V – Volume do recinto (m³);

S – Área de cada material (m²);

$\bar{\alpha}$ – O coeficiente de absorção sonora médio.

3.2.2. Método Geométrico – Raios Acústicos

Os modelos de acústica geométrica se baseiam na propagação retilínea (da energia sonora), entre fonte e receptor. Diferentemente da acústica estatística, os modelos geométricos levam em consideração, pelo menos em algum grau, a geometria da sala (paredes inclinadas, superfícies finitas e irregulares, etc.). Para geometrias mais complexas de recintos a acústica estatística passa a ser uma ferramenta não adequada. Muitos programas computacionais são dedicados a implementar métodos geométricos, cada um deles apresenta vantagens, desvantagens e modelos matemáticos diferentes, sendo impossível cobrir todas as peculiaridades de cada forma de implementação (BRANDÃO, 2016).

A teoria de raios acústicos é uma das teorias geométricas, apresentando a vantagem de levar em conta a geometria da sala, como paredes inclinadas, superfícies finitas e irregulares entre outras características não contempladas em métodos analíticos ou numéricos.

Segundo Gerges (2000), algumas considerações são feitas para a aplicação da teoria de raios, admite-se que o som se propaga como um raio de luz, com propriedades semelhantes às encontradas na ótica geométrica. O fenômeno mais importante da teoria em questão é a reflexão. Para esta simplificação, considera-se que o comprimento de onda (λ) é infinitamente pequeno, comparado com as dimensões da sala, para que isso ocorra a frequência deve ser grande, uma vez que são inversamente proporcionais como mostrado na Eq. (5).

$$c = \lambda . f \quad (5)$$

Sendo:

c – Velocidade do som no meio;

f – Frequência da onda;

λ – Comprimento de onda.

O que traz uma restrição ao método, é a aplicabilidade para as baixas frequências. Uma relação para a frequência limite admitida por vários especialistas é dada pela Eq. (6) a seguir.

$$f_c = 2000 \sqrt{T/V} \quad (6)$$

Sendo:

T – Tempo de reverberação (s);

V – Volume do recinto (m³);

f_c – Frequência limite (Hz).

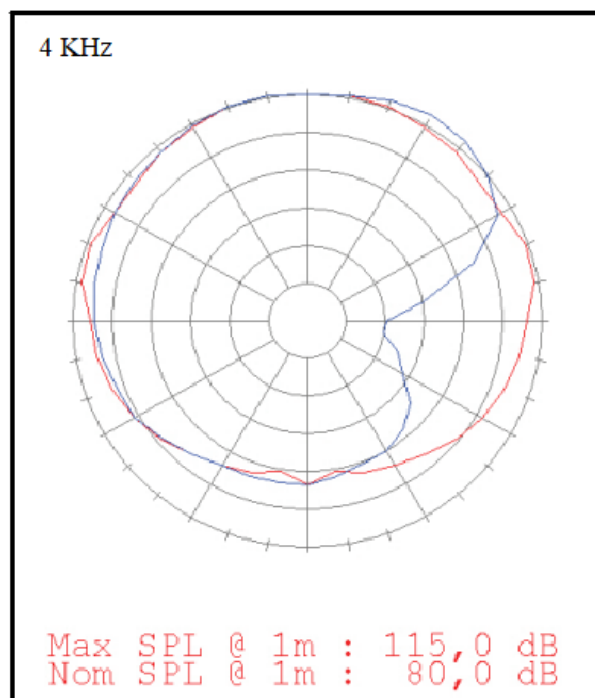
A teoria geométrica só é válida quando a sala possui alta densidade modal, por isso a frequência limitante exposta na Eq. (6). Para a modelagem do campo sonoro no recinto, a partir dessa teoria, é necessário dispor da geometria tridimensional interna, com todas as superfícies desenhadas com algum detalhamento. As posições da fonte e do receptor devem ser definidas, assim como as propriedades acústicas de cada superfície (BRANDÃO, 2016).

As características da fonte e do receptor são necessárias para obter a distribuição temporal de energia sonora no sistema. Uma vantagem da teoria geométrica sobre a estatística é que ela permite a caracterização da fonte sonora. A posição da fonte dentro da sala, sua potência sonora, a orientação de seu eixo principal e sua direcionalidade, ou seja, como a energia radiada pela fonte é distribuída no espaço. Analogamente às fontes, os receptores podem fazer discriminação direcional da chegada de raios sonoros.

Segundo Portela (2008, p.29) “Para a determinação da direcionalidade, uma maneira de se captar o som radiado pela fonte em direções diferentes é realizar medições ao redor e sobre a fonte com microfones em posições diferentes, registrando a informação espacial da radiação da fonte para diferentes bandas. Assim, ficarão determinadas assimetrias e mudanças na radiação para diferentes bandas de frequência”.

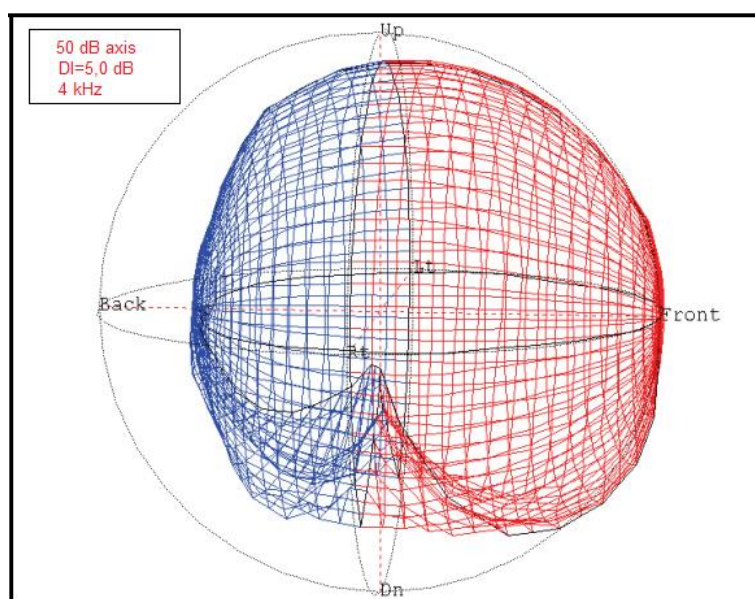
Coletando dados com o uso de microfones em diferentes direções ao redor da fonte sonora estudada é possível obter diagramas polares de direcionalidade, assim como balões de direcionalidade, ilustrados pelas Fig. 7 e 8 respectivamente, para cada frequência estudada.

Figura 7 – Diagrama de direcionalidade da voz humana, para frequência de 4kHz. Cor vermelha – Plano horizontal; Cor azul – Plano vertical



Fonte: Portela (2008, p.42)

Figura 8 - Balão de direcionalidade da voz humana, para frequência de 4kHz



Fonte: Portela (2008, p.43)

De acordo com Brandão (2016), fontes omnidirecionais são aquelas cujas características de radiação não dependem do ângulo de radiação, ou seja, radiam de forma igual em todas as direções. Na prática é muito difícil encontrar uma fonte completamente omnidirecional. A maior parte das fontes tendem a ser omnidirecionais em baixas frequências, quando a onda é muito maior que a superfície radiante.

A maioria das fontes tende a ser omnidirecional em baixas frequências, quando o comprimento de onda é muito maior que a superfície radiante. Não há fontes totalmente omnidirecionais, mas as fontes dodecaédricas, representadas na Fig. 9, são comumente utilizadas em experimentos acústicos por irradiarem um campo sonoro praticamente uniforme em todas as direções (BRANDÃO, 2016).

Figura 9 - Fonte dodecaédrica



Fonte: Portela (2006, p.37)

Outros atributos importantes para a caracterização de uma fonte são a potência e nível de potência sonora. A potência sonora é a energia sonora que emitida em certo intervalo de tempo, determinará a energia colocada no campo acústico, e a partir dela pode-se calcular o nível de potência sonora, Eq. (7), que é usado em cálculos para critérios normativos (ARANHA, 1995).

$$SWL = 10 \log\left(\frac{W}{W_{ref}}\right)dB \quad (7)$$

Onde:

SWL –Nível de potência sonora;

W_{ref} – 10^{-12} watts (referência);

W – Potência Sonora em watts.

Segundo Brandão (2016, p.367), “Há basicamente, três tipos de receptores que podem ser usados nos programas computacionais de acústica geométrica: os receptores pontuais, os planos receptores e as cabeças receptoras. Os receptores pontuais são pontos ou regiões do espaço que receberão a pressão sonora sem fazer qualquer discriminação da direção de recepção[...]. Os planos receptores são planos geométricos em que se deseja mapear a variação espacial da pressão sonora ou de parâmetros objetivos como o tempo de reverberação[...]. Como os receptores pontuais e os planos receptores não fazem discriminação direcional da chegada dos raios sonoros, a única especificação importante a se fazer é sua posição dentro da sala. As cabeças receptoras são importantes quando se deseja fazer a auralização do campo acústico obtido na sala. [...] as características direcionais dos receptores são de suma importância nesse contexto’.

É necessário conhecer bem as características geométricas do recinto para a utilização do método do traçado de raios acústicos para a determinação do tempo de reverberação. Cada superfície da sala deve ser aproximada por um ou mais planos.

Não é necessário modelar cada pequeno detalhe da sala com exatidão. Objetos pequenos de decoração, são importantes do ponto de vista visual, mas são acusticamente “invisíveis”. A rugosidade das superfícies pode ser expressa por meio de um coeficiente de espalhamento adequado. Além disso, é recomendada, que a resolução do desenho das paredes e superfícies seja da ordem de meio metro (VORLANDER apud BRANDÃO, 2016).

No que se refere a geometria e posicionamento dos elementos, deve-se conhecer, para a parte principal do programa:

- os vértices de todas as superfícies que compõem o recinto;
- as características acústicas de cada superfície (absortividade e espalhamento);
- as coordenadas referentes a posição da fonte sonora;
- as coordenadas referentes a posição do receptor;
- os vetores que indicam a direção inicial de cada raio.

Os dados supracitados são suficientes no que se refere a geometria, visto que, com os pontos que compõe os vértices é possível definir as equações dos planos, assim como calcular o vetor normal à superfície de cada um deles.

Para a implementação dos métodos geométricos é necessário definir os planos que compõe o recinto, aproximando cada superfície por um plano, ou conjunto de planos. Para ambientes vazios basta definir os planos das paredes que delimitam a sala. Cada superfície deve, estar associada com seu coeficiente de absorvidade, ter um índice associado para sua identificação, vetores posição de seus vértices e vetor normal à superfície do plano. É importante conhecer a equação de cada plano apresentada na Eq. (8), bem como o vetor normal ao plano, disposto na Eq. (9) (BRANDÃO, 2016).

$$ax + by + cz = 1 \quad (8)$$

Sendo:

a, b e c – Coeficientes do plano.

$$N = \frac{AB \times AC}{|AB \times AC|} \quad (9)$$

Sendo:

N – Vetor normal;

AB e AC – Vetores do plano.

Conhecendo as direções do vetor normal e, portanto, a equação do plano, pode-se determinar a direção do raio refletido a partir da Eq. (10) de Kuttruff (2009).

$$\vec{v}_0' = \vec{v}_0 - 2(\vec{v}_0 \cdot \vec{n}_i) \cdot \vec{n}_i \quad (10)$$

Sendo:

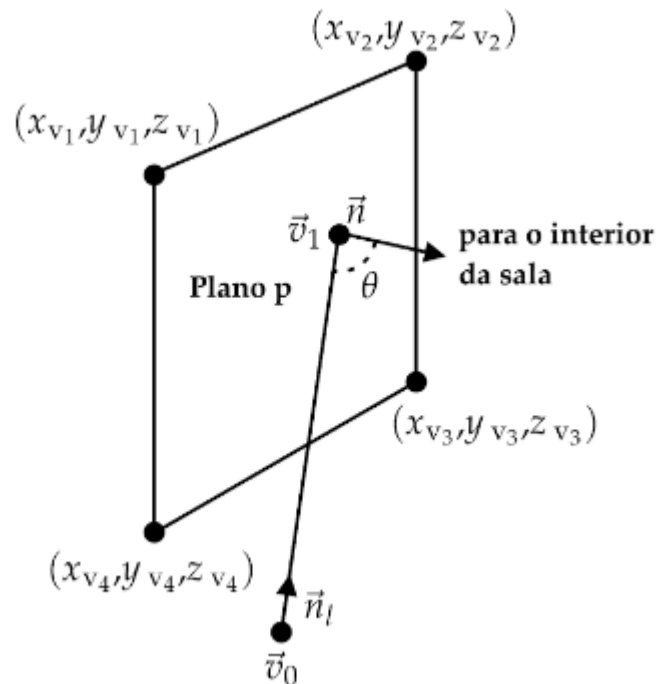
\vec{v}_0' – Vetor direção refletida;

\vec{v}_0 – Vetor posição do ponto associado a uma fonte;

\vec{n}_i – Vetor direção raio incidente.

A Fig. 10 pode ilustrar a reflexão especular, em um plano “p” de normal “ \vec{n} ”.

Figura 10 - Reflexão especular



Fonte: Brandão (2016, p. 371)

Em seqüência é possível calcular o caminho de um raio sonoro dentro da sala refletindo em diversas superfícies, até que este atinja o receptor. Cada raio percorrerá um caminho diferente encontrando o receptor com uma energia associada e em tempos distintos. A energia de cada raio é dada pela Eq. (11) se considerada a absorção do ar e o espalhamento.

$$En = (1 - \alpha^{(i)}) \cdot (1 - s^{(i)}) \cdot \frac{W}{N_r} \cdot e^{-ml} \quad (11)$$

Sendo:

En – Energia do raio

α – Coeficiente de absorvidade

s – Coeficiente de espalhamento da superfície;

i – Índice i-ésima superfície;

W – Potência da fonte;

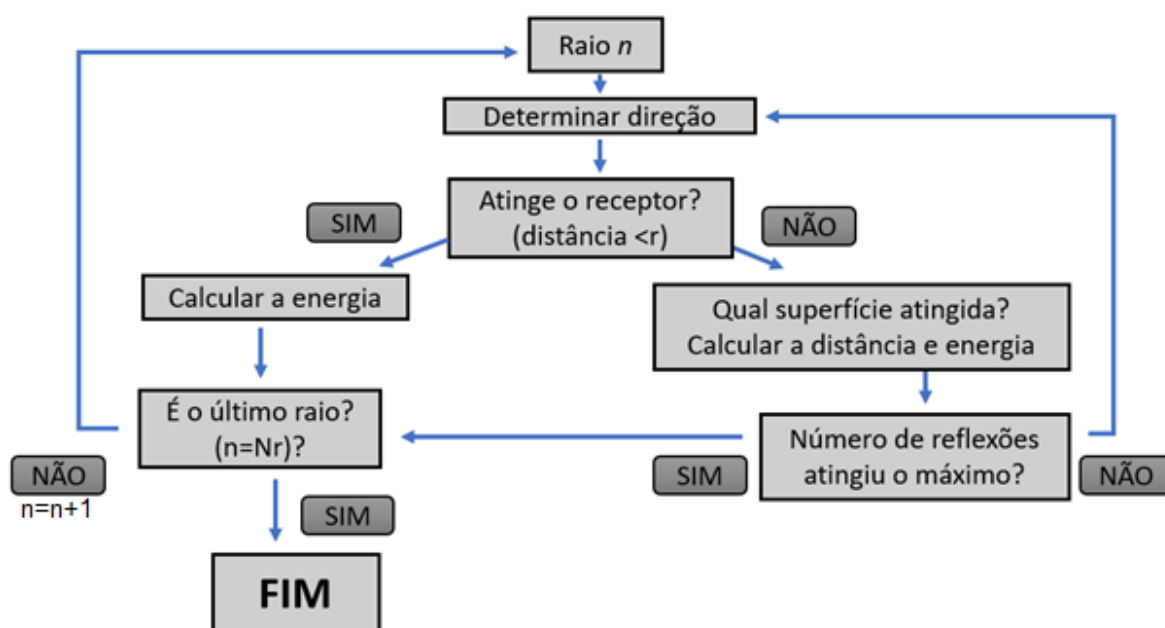
N_r – Número de raios;

m – Coeficiente de absorção do ar;

l – Distância até i-ésima superfície.

Em síntese o algoritmo para o método do traçado de raios acústicos consiste em dividir a energia da fonte em um certo número de raios que serão distribuídos nas diversas direções, e acompanhar cada raio em suas várias reflexões até que atinja o receptor ou tenha refletido tantas vezes que sua energia pode ser considerada desprezível, até o último raio como representado pela Fig. 11.

Figura 11 - Algoritmo usado no método do traçado de raios



Fonte: Própria autoria

Feita a distribuição dos raios uniformemente deve-se pegar cada um dos “n” raios e encontrar sua direção, com ela é possível dizer se este raio atingirá o receptor ou não. Raios que não atingem o receptor terão parte de sua energia refletida e parte absorvida pela parede que interceptarem, devendo-se calcular a nova energia do raio e sua nova direção. Para descobrir qual plano o raio atingirá primeiro apenas deve-se escolher a menor distância entre a parede e os possíveis pontos de cruzamento com os planos.

A distância percorrida em cada reflexão deve ser armazenada, possibilitando a obtenção da distância total percorrida até que encontre o receptor e, assim, o cálculo do tempo decorrido. A Eq. (12) pode ser usada para cálculo tanto da distância entre a fonte e os candidatos a ponto

de intersecção, quanto para calcular a distância entre dois pontos de intersecção, com o objetivo de obter a distância percorrida.

$$D = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} \quad (12)$$

Sendo:

D – Distância entre dois pontos;

x_0 – Coordenada em “x” do primeiro ponto;

x_1 – Coordenada em “x” do segundo ponto;

y_0 – Coordenada em “y” do primeiro ponto;

y_1 – Coordenada em “y” do segundo ponto;

z_0 – Coordenada em “z” do primeiro ponto;

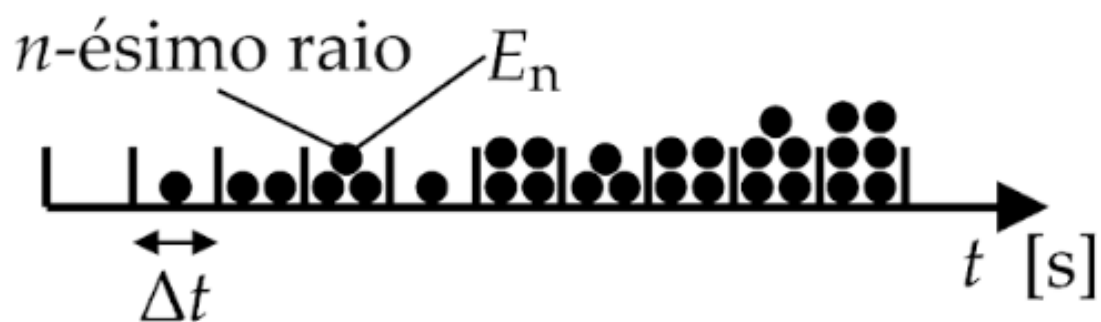
z_1 – Coordenada em “z” do segundo ponto.

Raios que interceptam o receptor só precisam ter o valor de energia armazenado e o tempo para a colisão calculado. O procedimento repete-se até que o receptor seja atingido ou chegue ao número máximo de reflexões pré-determinado, devendo analisar o próximo raio, caso este não seja o último. O número máximo de reflexões deve ser grande o suficiente para que ao ser atingido a energia do raio já é tão pequena que não influenciará de forma relevante nos resultados e ao mesmo tempo deve não ser tão grande para evitar custos computacionais desnecessários, uma vez que após excessivas reflexões a energia do raio já será desprezível.

Por fim, o tempo de reverberação é encontrado após serem somadas as energias de cada raio em intervalos de tempo definidos e convertidas em níveis de pressão sonora. O histograma representado na Fig. 12 ilustra a contabilização da energia em cada intervalo de tempo. Quando analisado o nível sonoro em função do tempo será possível verificar o decaimento da energia sonora ao longo do tempo e assim, calcular o tempo de reverberação através da técnica dos raios acústicos.

Figura 12 - Histograma temporal e contabilização da energia vs. tempo

Histograma - Energia



Fonte: Brandão (2016, p. 396)

4. METODOLOGIA

Este tópico apresenta toda a metodologia por trás da definição do recinto por meio de desenho, modelagem dos métodos citados anteriormente, assim como as ferramentas utilizadas para tais procedimentos. As dimensões do recinto e forma geométrica são importadas de um desenho feito utilizando o programa computacional do tipo CAD (*computer aided design*), AutoCAD.

O programa computacional MATLAB foi utilizado para a programação do algoritmo do método do traçado de raios, assim como, para efeito de comparação, o cálculo dos tempos de reverberação pelos métodos estatísticos convencionais apresentados pela Eq. (2) a (4). O computador utilizado para a simulação foi um AMD FX8300 octacore, 16GB de RAM, placa de vídeo de 4GB, 240GB de SSD e 2T de HD.

O desenho, feito no programa computacional AutoCAD, deve sempre ser realizado de forma padronizada, seguindo rigorosamente as instruções, para que a função criada, possa ler o arquivo e importar os dados, referentes a geometria do ambiente, para o programa principal no programa computacional MATLAB.

4.1 Geometria das salas

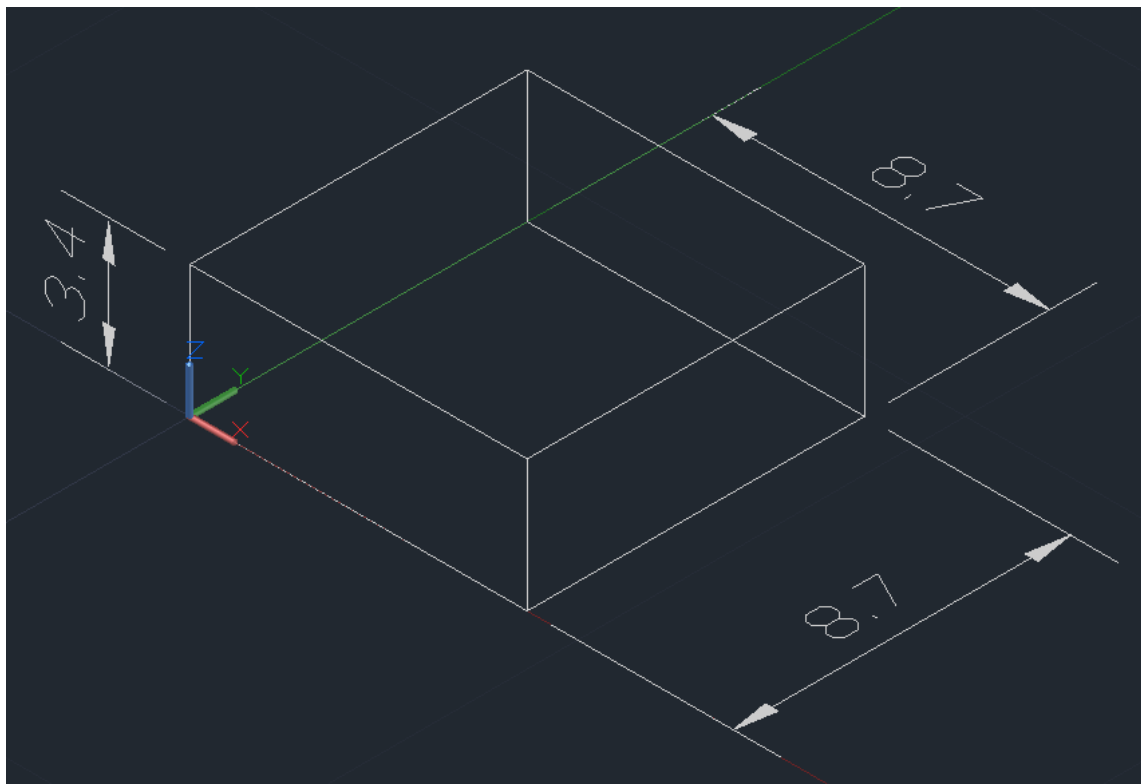
As análises feitas foram para três recintos, o primeiro é uma sala de aula do Centro de Aulas de engenharia, da Universidade Federal de Goiás, Campus Colemar Natal e Silva, Goiânia. A sala possui largura e comprimento de 8,7 metros, com altura de 3,4 metros aproximadamente.

O recinto 2, denominado de sala 2, tem as mesmas proporções da sala 1, mas em uma escala duas vezes maior, ou seja, largura e comprimento de 17,4 metros e altura de 6,8 metros, o que sugere tempos de reverberações maiores. Por fim, o terceiro recinto, nomeado de sala 3, tem forma de um tronco de pirâmide, para observar uma outra forma geométrica que possua diferentes faces, no que se refere às dimensões e apresente diferentes angulações entre suas faces internas, apresentando base retangular, o piso e o teto são retângulos de 10x40 metros e 8x32 metros, respectivamente, com altura de 2,2 m.

Para auxiliar o desenho final no AutoCAD, um esboço contendo apenas as arestas da sala, pode ser feito em uma camada exclusiva para este fim, como na Fig. 13. O desenho das arestas facilita a identificação dos planos e posição da sala, fazendo com que a tarefa de gerar

as faces do recinto se torne mais rápida e simples. Recomenda-se utilizar uma camada com um nome simples para que não se misture com os dados geométricos que devem ser importados no MATLAB, podendo-se utilizar a própria camada padrão “0” do programa de desenho.

Figura 13- Esboço da sala desenhado no AutoCAD



Fonte: Própria autoria

Pela forma que a função do MATLAB faz a importação desses dados, é de suma importância que cada plano, assim como cada receptor sejam construídos utilizando camadas diferentes e com nomenclatura apropriada. A função responsável pela importação dos dados conseguirá distinguir os planos entre si e os pontos referentes às fontes dos referentes aos receptores.

As camadas utilizadas nas paredes devem apresentar o prefixo “M_”, seguido de algo que caracterize essa parede, dessa forma a função saberá que se trata de um plano e coletará as informações de forma adequada. As fontes devem ser construídas usando camadas com nome iniciado pelo prefixo “F_”, enquanto as camadas correspondentes aos receptores devem possuir o prefixo “R_”, sempre seguido de algo que possa ser usado para identificá-los. A Fig. 14 ilustra

o gerenciador de propriedades de camadas do AutoCAD utilizado na construção da geometria da sala 1, por exemplo.

Figura 14- Camadas utilizadas no desenho dos recintos, fontes e receptores

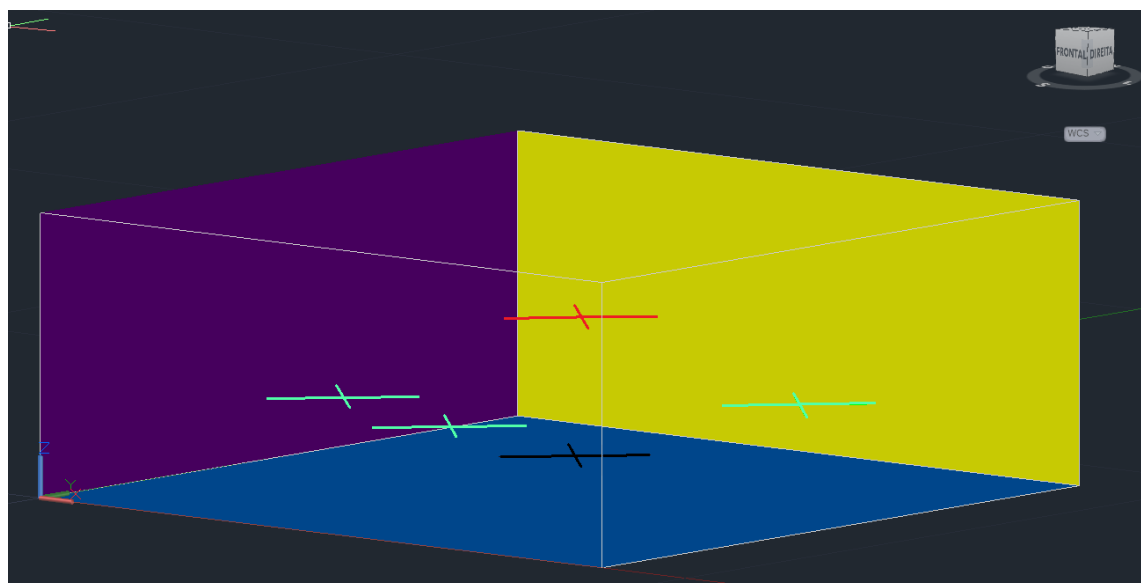
S...	Nome	Ativa...	Cong...	Bloq...	Cor	Tipo de ...	Espessur...	Trans...
✓	0	☑	☀	🔒	254	CONTIN...	— Padr...	0
✓	F_ALUNO	☑	☀	🔒	19	CONTIN...	— Padr...	0
✓	F_PROFESS...	☑	☀	🔒	10	CONTIN...	— Padr...	0
✓	M_FRENTE	☑	☀	🔒	50	CONTIN...	— Padr...	0
✓	M_FUNDO	☑	☀	🔒	30	CONTIN...	— Padr...	0
✓	M_P_DIREI...	☑	☀	🔒	170	CONTIN...	— Padr...	0
✓	M_P_ESQU...	☑	☀	🔒	200	CONTIN...	— Padr...	0
✓	M_PISO	☑	☀	🔒	150	CONTIN...	— Padr...	0
✓	M_TETO	☑	☀	🔒	230	CONTIN...	— Padr...	0
✓	R_ALUNO1	☑	☀	🔒	90	CONTIN...	— Padr...	0
✓	R_ALUNO2	☑	☀	🔒	90	CONTIN...	— Padr...	0
✓	R_ALUNO3	☑	☀	🔒	90	CONTIN...	— Padr...	0

Fonte: Própria autoria

As paredes do recinto dever ser construídas selecionando a camada de nomenclatura em formato supracitado e utilizando a função “FACE3D” (se o programa estiver em inglês é “3DFACE”) do AutoCAD. Após o comando só será necessário selecionar os pontos/vértices pertencentes a cada superfície, uma vez que o esboço da sala já estará pronto.

Os pontos referentes às fontes e aos receptores devem ser criados utilizando a função “POINT” que tem função de criar um ponto com as coordenadas estabelecidas. Na Fig. 15 pode-se visualizar o primeiro recinto analisado, no que se refere aos receptores, fontes e três das seis paredes criadas.

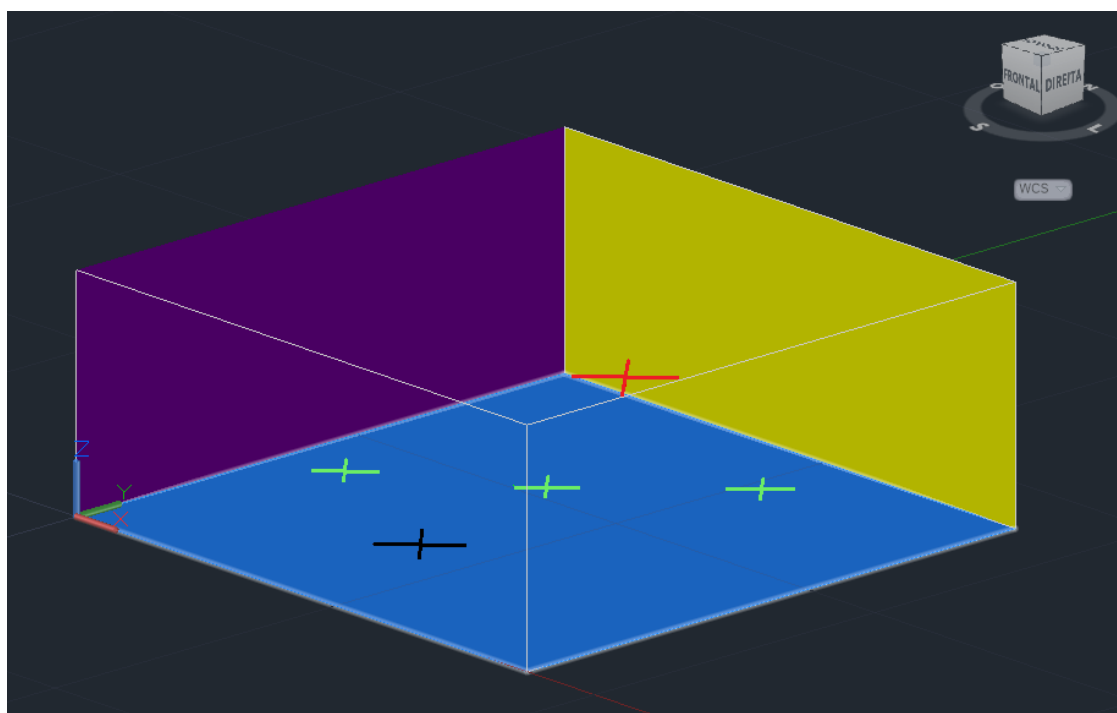
Figura 15- Imagem das faces da sala 1, fontes (vermelho e preto) e receptores (verde) desenhados no AutoCAD



Fonte: Própria autoria

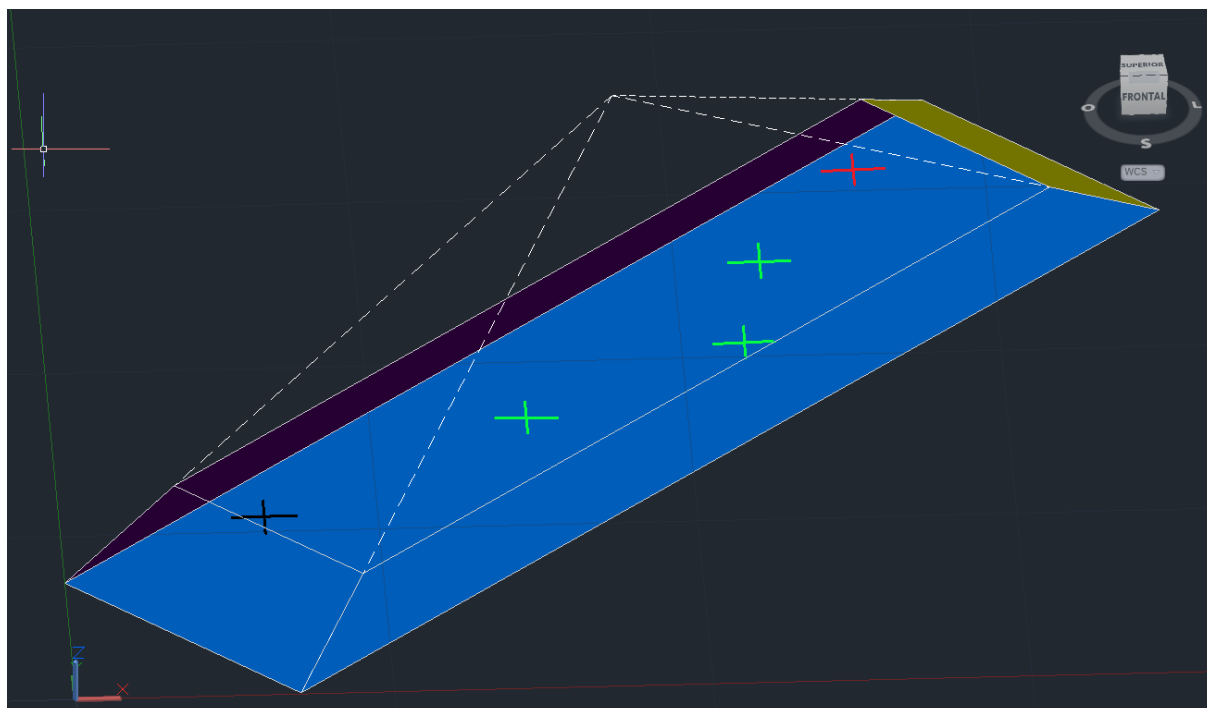
As salas 2 e 3, ilustradas nas Figs. 16 e 17, possuem também formas geométricas relativamente simples. Estes recintos, assim como as distribuições de suas fontes e receptores podem ser observados nas figuras abaixo:

Figura 16- Imagem das faces da sala 2, fontes (vermelho e preto) e receptores (verde) desenhados no AutoCAD



Fonte: Própria autoria

Figura 17- Imagem das faces da sala 3, fontes (vermelho e preto) e receptores (verde) desenhados no AutoCAD



Fonte: Própria autoria

O desenho deve ser salvo em formato apropriado para que a função do MATLAB consiga ler corretamente os dados no arquivo que será lido como texto. Para evitar problemas de compatibilidade e permitir que usuários com diferentes versões do programa computacional de desenho possam fazer uso do código, os tipos de arquivo recentes foram evitados. O tipo de arquivo padrão a ser utilizado é o “AutoCAD R12/LT2 DXF (.DXF)”.

O código do programa no MATLAB, assim como das funções usadas que foram criadas, estão disponíveis no Apêndice A. Este inicia com duas funções, uma responsável por importar os dados referentes aos planos do desenho e outra que importará os pontos, referentes as posições das fontes e dos receptores.

A função “p_plano” lê o arquivo no formato “.dxf” do desenho procurando o comando “3DFACE” (usado para criar as superfícies). Quando encontrada uma linha com este comando conta quatro linhas e verifica se os 2 caracteres iniciais são “M_”, em caso afirmativo é salvo o nome da camada usada, permitindo identificar qual é a face/parede. Esta função ainda conta as linhas e armazena os valores das coordenadas dos quatro pontos/vértices que formam esta parede. A função retornará uma matriz com as coordenadas dos pontos e um vetor com os nomes das faces.

Já a função “p_ponto”, lê o mesmo arquivo procurando pelo comando “POINT” (usado para criar os pontos referentes as posições das fontes e dos receptores). Esta função funciona de maneira bem semelhante à ”p_plano”, porém ao encontrar o comando procurado verifica após quatro linhas se o ponto em questão é uma fonte (prefixo “F_”) ou um receptor (prefixo “R_”). A função retornará uma matriz com as posições dos receptores, uma com as posições das fontes e dois vetores com os nomes das fontes e dos receptores, independentemente de quantos forem. Os dados importados pela função no MATLAB das posições das fontes e receptores das salas 1, 2 e 3 são apresentados respectivamente nas Tabs. 1 a 3.

Tabela 1 - Coordenadas das fontes e dos receptores da sala 1

Posições das fontes e receptores			
Eixo	X [m]	Y [m]	Z [m]
F_ALUNO	7,00	1,50	1,00
F_PROFESSOR	2,00	7,50	1,50
R_ALUNO_1	4,35	2,35	1,00
R_ALUNO_2	6,35	6,35	1,00
R_ALUNO_3	1,85	3,35	1,00

Fonte: Própria autoria

Tabela 2 - Coordenadas das fontes e dos receptores da sala 2

Posições das fontes e receptores			
Eixo	X [m]	Y [m]	Z [m]
F_ALUNO	10,00	3,00	1,00
F_PROFESSOR	5,00	15,00	1,70
R_ALUNO_1	8,70	8,70	1,00
R_ALUNO_2	12,70	12,70	1,00
R_ALUNO_3	4,20	5,70	1,00

Fonte: Própria autoria

Tabela 3 - Coordenadas das fontes e dos receptores da sala 3

Posições das fontes e receptores			
Eixo	X [m]	Y [m]	Z [m]
F_ALUNO	6,36	9,26	1,00
F_PROFESSOR	25,81	29,42	1,00
R_ALUNO_1	14,85	14,92	1,00
R_ALUNO_2	21,92	19,16	1,00
R_ALUNO_3	22,63	24,11	1,00

Fonte: Própria autoria

A escolha das posições para fonte e receptor, foram feitas de modo a seguir as recomendações da norma ISO 3382-2, para medições de engenharia de uma sala, apresentando assim seis combinações de posições da fonte e receptor.

A função “correção_paralelismo”, disposta no Apêndice A.04, foi criada para evitar que as paredes ficassem paralelas com os planos de referência, causando problemas com a inversão de algumas matrizes que serão feitas logo adiante pelo programa. Essa função identifica os pontos de uma das faces e desloca levemente cada um deles, em todas faces que os contém. Cada ponto é levemente deslocado em alguns centésimos, dessa forma é mantida a forma da sala, sendo desprezível a alteração do ponto de vista da construção civil, assim como da análise acústica. Observando a Tab. 4, que apresenta os pontos que definem os planos da primeira sala, pode-se notar os pequenos e diferentes acréscimos nas coordenadas dos pontos causados pela função “correção_paralelismo”.

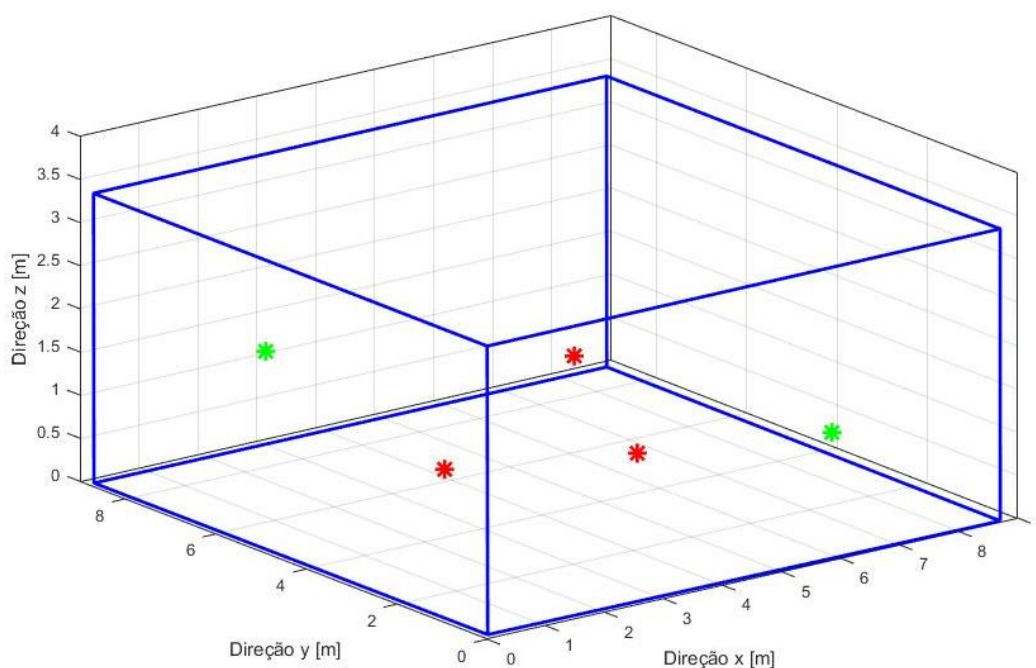
Tabela 4 - Pontos que definem os planos da sala 1

Pontos que definem os planos das faces				
	Nº ponto	X [m]	Y [m]	Z [m]
'M_PISO'	Ponto 1	8,71	0,01	0,01
	Ponto 2	8,72	8,72	0,02
	Ponto 3	0,03	8,73	0,03
	Ponto 4	0,04	0,04	0,04
'M_FRENTE'	Ponto 2	8,72	8,72	0,02
	Ponto 6	8,70	8,70	3,40
	Ponto 7	0,00	8,70	3,40
	Ponto 3	0,03	8,73	0,03
'M_FUNDO'	Ponto 1	8,71	0,01	0,01
	Ponto 5	8,70	0,00	3,40
	Ponto 8	0,00	0,00	3,40
	Ponto 4	0,04	0,04	0,04
'M_P_ESQUERDA'	Ponto 4	0,04	0,04	0,04
	Ponto 3	0,03	8,73	0,03
	Ponto 7	0,00	8,70	3,40
	Ponto 8	0,00	0,00	3,40
'M_P_DIREITA'	Ponto 1	8,71	0,01	0,01
	Ponto 2	8,72	8,72	0,02
	Ponto 6	8,70	8,70	3,40
	Ponto 5	8,70	0,00	3,40
'M_TETO'	Ponto 5	8,70	0,00	3,40
	Ponto 6	8,70	8,70	3,40
	Ponto 7	0,00	8,70	3,40
	Ponto 8	0,00	0,00	3,40

Fonte: Própria autoria

A Fig. 18 ilustra a sala através da função “plot3” do MATLAB, mostrando a imagem formada pelos dados geométricos já importados para este programa computacional.

Figura 18 - Imagem da sala, fontes(verdes) e receptores (vermelhos) plotados no MATLAB



Fonte: Própria autoria

4.2 Propriedades dos planos

Em seguida a função “normal” (Apêndice A.05) é utilizada para calcular os coeficientes das equações dos planos e a normal de cada plano. Para encontrar os coeficientes dos planos tem-se de solucionar sistemas de três equações, utilizando três pontos de cada face, pois é o suficiente para determinar um plano. A resolução é feita na forma de matrizes e permitem encontrar os coeficientes desejados.

A determinação dos vetores normais é feita através da Eq. (9), mas há necessidade de o vetor normal apontar para dentro. Para garantir que o vetor normal tenha o sentido correto, a função calcula os dois possíveis (um apontando para dentro do ambiente e outro para fora). Posteriormente dentro da função um teste é feito para escolher entre um dos vetores normais para cada plano, basicamente o vetor que tiver menor distância entre sua extremidade e um ponto interno (receptor ou fonte) do recinto, quando colocado em um dos pontos da face, é o vetor que aponta para dentro. A função “normal” irá retornar os coeficientes e os vetores normais de cada plano.

Para cada combinação de fonte e receptor o programa executa todo o algoritmo do método dos raios acústicos (Fig. 11) e salva os resultados obtidos, sendo eles: energia de cada raio; número de reflexões; distância percorrida; tempo até atingir o receptor.

Alguns parâmetros, como absorvidade e espelhamento foram definidos e são os mesmos para todas as combinações escolhidas.

A propriedade de absorvidade dos planos é obtida dos valores sugeridos na NBR 12179, que apresenta os coeficientes de absorção acústica em função do material e da frequência de interesse. Para tanto, apresenta-se na Tab. 5 um recorte da tabela onde tem-se os materiais característicos de uma parede de sala de aula.

Tabela 5 - Coeficientes de absorção acústica

Materiais	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Reboco áspero, cal	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Teto pesado suspenso (de gesso)	0,03	-	0,03	-	0,05	-
Estruque	0,03	-	0,04	-	0,07	-
Suprefície de concreto	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07

Fonte: NBR 12179, 1992

A absorvidade usada para o programa, assim como para os métodos estatísticos usados como referência é de 0,04, pois é o valor que mais se aproxima da absorvidade dos materiais presentes em uma sala de aula. Como o trabalho possui foco na ferramenta para cálculo do tempo de reverberação e não nos resultados, não há preocupação de se utilizar diferentes absorvidades para diversas frequências.

Em um segundo momento, demonstrando o programa em utilização, o coeficiente de absorção do teto da primeira sala foi alterado, mantendo os demais parâmetros, para assim calcular o novo tempo de reverberação quando colocado um material absorvente no teto, com o intuito de diminuir o tempo de reverberação do recinto. O valor da absorvidade escolhida, para o absorvedor hipotético, foi de 0,5 com base em alguns dos absorventes de bom desempenho presentes na Tab. (6).

Tabela 6 - Coeficientes de absorção sonora de alguns materiais presentes nas edificações de escritórios

Item	Descrição da Superfície	Frequência			Referência ⁷
		128 Hz	512 Hz	2048Hz	
1	Adulto sentado em poltrona simples	0,23	0,39	0,46	K&H
2	Adulto em pé	0,33	0,38	0,93	K&H
3	Adulto em poltrona estofada	0,28	0,42	0,46	K&H
4	Borracha em rolos (ABNT)	0,04	0,08	0,03	ABNT
5	Carpete simples	0,12	0,10	0,10	ABNT
6	Carpete simples torrado	0,10	0,25	0,40	K&H
7	Chapa de madeira compensada – 50mm	0,20	0,26	0,12	MDL
8	Chapa de madeira compensada –	0,30	0,06	0,02	MDL
9	Cimentado (piso ou parede)	0,100	0,012	0,012	ABNT
10	Climaver lã de vidro – SGV - ISOVER	0,03	0,63	1,1	DI-SGV
11	Espelho d'água	0,08	0,013	0,02	RAV
12	Estuque ou gesso simples	0,035	0,03	0,028	RAV
13	Gesso acústico, perfurado com lã de	0,50	0,92	0,47	JBCEL
14	Janela aberta ou vazia	1,00	1,00	1,00	MDL
15	Lã de rocha – MS – 20 e 32	0,40	0,70	0,76	IPT
16	Lã de vidro, protegida com tecido e-25	0,22	0,57	0,70	IPT
17	Parede de alvenaria, rebocada e caiada.	0,028	0,025	0,03	EUSA
18	Pisto fibra (lã de vidro jateada)	0,07	0,64	0,89	IPT
19	Porta/Madeira compensada, envernizada.	0,05	0,03	0,03	EUSA
20	Reboco de gesso em alvenaria	0,02	0,02	0,04	MDL
21	Reboco de vermiculita	0,23	0,37	0,48	MDL
22	Tijolos comuns com argamassa fina	0,13	0,02	0,03	AIS
23	Tijolos vazados 60,0kg/m ³	0,05	0,28	0,32	RAV

Fonte: Silva 2002, appud Grotta, 2009, p.72

Com este parâmetro alterado, o programa foi executado novamente, para obter o tempo de reverberação da sala 1 após um suposto tratamento acústico com implementação de material absorvente no teto.

O próximo parâmetro refere-se ao espalhamento, que expressa a parcela de energia que é refletida na direção não especular. Isto é, um valor de espalhamento igual a zero significa que toda a energia é refletida na direção especular. No caso de estudo, os planos do recinto são as paredes da sala de aula, as quais possuem superfície lisa e a condição de reflexão especular total

é passível. Diante do exposto, considera-se que a energia de cada raio, conforme Eq. (11), é ponderada apenas pela absorvidade das paredes e portanto, espalhamento igual a zero.

4.3 Propriedades da fonte e receptor

A fonte sonora é responsável por emitir um pulso com energia igual a 0,1 joule, sendo distribuídos em determinado número de raios. Com o aumento do número de raios os resultados são melhores e os erros minimizados, por outro lado, o custo computacional aumenta, visto que o algoritmo será repetido mais vezes. Foram emitidos 7381 raios da fonte, distribuídos a uma distância angular uniforme, em ambas direções, de 3 graus entre eles.

Como sugerido por Silva, Neto e Resende (2018), um raio de receptor de 0,2 metros é adequado para salas de dimensões iguais ou maiores as dos recintos analisados, raios menores que este, aumentariam o custo computacional sem impactar nos resultados. Tendo em vista que no presente trabalho não há grande preocupação com o custo computacional será mantido o raio de receptor, mesmo para salas maiores, de forma a padronizar este parâmetro.

4.4 Número de reflexões e planos interceptados

Para esta simulação usou-se 1000 reflexões como número limitante, após isso o raio será considerado desprezível, pois, para as considerações de absorvidade, ele teria energia aproximadamente $5,356 \times 10^{17}$ vezes menor que a energia inicial de cada raio. Para cada raio emitido uma função “direc_emis” calcula o vetor direção do raio emitido a partir de seu ângulo.

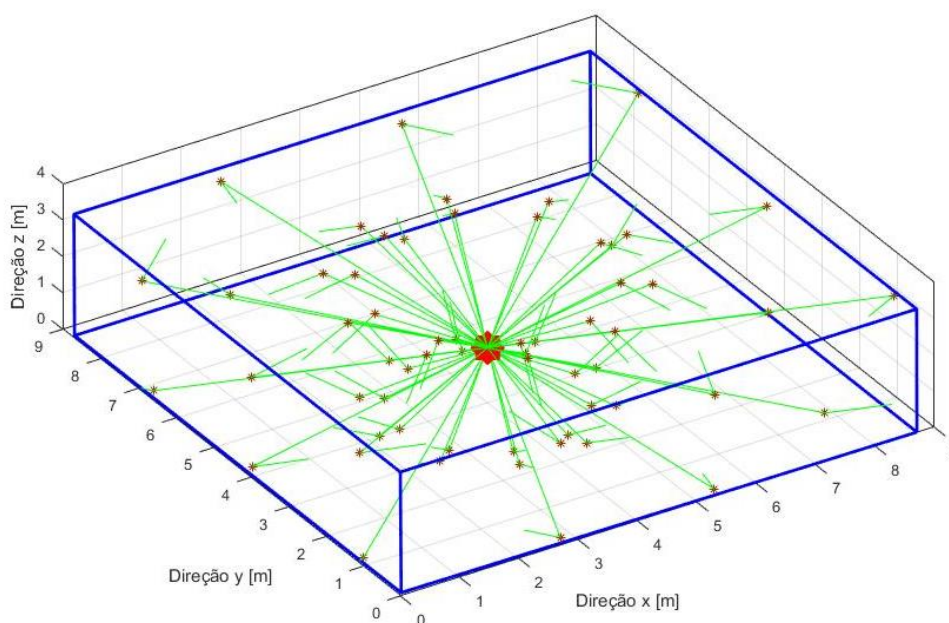
Um laço “for” calcula os possíveis pontos de intersecção com cada um dos planos candidatos, que podem ser interceptados, através da função “pin_dist”. Segundo Brandão (2016), o raio só pode encontrar os planos cujo produto escalar entre o vetor direção do raio (“nld”) e o vetor normal (“nd”) à superfície do plano for maior que zero. Quando o plano não pode ser atingido pelo raio uma distância grande é armazenada, assim é assegurado que este plano não será escolhido. A função “pin_dist”, presente no Apêndice A.07, retorna os possíveis pontos de intersecção e a distância até eles, calculada pela Eq. (12).

Diante dos planos candidatos, para encontrar o ponto de intersecção ao plano de interesse basta encontrar a menor distância entre o ponto da origem do raio acústico e os pontos de intersecção dos planos candidatos, e deste modo tem-se que o raio intercepta a parede mais próxima. Entretanto, se os planos referentes a duas paredes do recinto são os mesmos, a solução

exige a verificação do posicionamento do ponto de interseção dentro dos limites de cada parede, pois a distância é a mesma para paredes contidas no mesmo plano. Apenas nesses casos uma função “escolha_parede” é usada para identificar qual realmente é a parede atingida, para assim escolher o coeficiente de absorção referente a parede em que o raio é refletido. Ressalta-se, que apesar da implementação desta etapa no código, o coeficiente de absorção sonora é igual para todas as paredes da sala, além disso só há uma parede em cada plano e assim a sua utilização não é necessária no código. Mas, a sua solução e código é disponibilizado aqui para auxiliar estudos futuros referentes a este trabalho, visando atender o maior número de configurações geométricas e propriedades observados em recintos.

Para ilustrar o funcionamento do código a Fig. 19 apresenta a trajetória dos raios em uma sala com uma menor quantidade de raios e reflexões, apenas para elucidar os raios iniciais da fonte sonora e as reflexões especulares nas paredes.

Figura 19 - Raios emitidos pela fonte (verde), fonte (vermelha) e pontos de intersecção (marrons)



Fonte: Própria autoria

4.5 Energia sonora e tempo de reverberação

Uma outra função denominada “dist_recep”, Apêndice A.08, calcula a menor distância entre a trajetória do raio e o centro do receptor. Se a distância for menor que o raio do receptor

subentende-se que o raio colide com este, o programa salva as informações importantes como energia, distância total percorrida e recomeça a calcular as reflexões, desta vez para o próximo raio.

O programa repete o procedimento para todos os raios, depois volta e inicia a próxima combinação de receptor e fonte, até que tenha acabado. Todos os resultados e informações necessárias são armazenados em uma matriz tridimensional, os diferentes resultados armazenados (número de reflexões, energia, tempo e distância), para cada um dos raios e em cada combinação fonte receptor. Para salvar os dados, estes são reagrupados em uma matriz bidimensional e salvos em arquivo em formato “.txt”, pois a função “save” não salva matrizes tridimensionais na formatação “-ascii” em formato “txt”.

Em sequência a função “trata_dados” é utilizada para realizar o tratamento dos dados salvos. Esta função irá classificar os raios de acordo com o tempo de colisão com o receptor, agrupando-os em intervalos de tempo de 0,1 segundos. A energia dos raios de cada intervalo será somada de forma a se obter a energia total em cada intervalo de tempo.

Com a energia absorvida em cada intervalo de tempo é possível encontrar o tempo de reverberação, que seria o tempo para energia decair até um milionésimo de seu valor inicial ou, em dB, decair 60 dB. Para facilitar a observação gráfica opta-se pela análise em decibéis. Funções estatísticas, como a regressão linear, são usadas para auxiliar a obtenção do tempo de reverberação (T60).

A comparação dos valores encontrados para tempo de reverberação e os tempos obtidos pelos métodos estatísticos, Sabine e Eyring, deve ser feita de modo a validar o código criado para a importação dos dados geométricos de arquivo de desenho e cálculo do tempo de reverberação.

Em resumo todas as considerações e valores para as variáveis admitidas são parâmetros definidos no programa principal no Apêndice A.01, entre elas estão o número máximo de reflexões, o coeficiente de absorvidade de cada parede, raio do receptor, número de raios, distância angular em graus entre os raios e energia emitida pela fonte.

A Tab. 7 ilustra todos parâmetros mencionados, assim como o valor da velocidade do som no ar admitida para o cálculo do tempo através da distância.

Tabela 7 - Parâmetros admitidas no programa

Parâmetros	Valor utilizado
Número máximo de reflexões	1000
Número de raios	7381
Distância angular entre raios	3°
Energia emitida pela fonte	0,1 J
Nível de potência sonora da fonte	110 dB
Raio do receptor	0,2 m
Velocidade do som no ar	342 m/s
Coeficiente de absorvidade 'M_PISO'	0,04
Coeficiente de absorvidade 'M_TETO'	0,04
Coeficiente de absorvidade 'M_FUNDO'	0,04
Coeficiente de absorvidade 'M_FRENTE'	0,04
Coeficiente de absorvidade 'M_P_DIREITA'	0,04
Coeficiente de absorvidade 'M_P_ESQUERDA'	0,04
Absorvidade de material absorvedor hipotético	0,50

Fonte: Própria autoria

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando um programa para solucionar as equações dos métodos estatísticos citados, pôde-se encontrar os tempos de reverberação da ordem de 3,8; 7,6 e 3,1 segundos para as salas 1, 2 e 3 respectivamente. O tempo para obtenção desses resultados é muito curto, os resultados são praticamente instantâneos, devido a simplicidade do cálculo, não consideram posições da fonte e receptor e tampouco a detalhes geométricos do ambiente, apenas o volume e área de absorção sonora.

Apesar de serem tempos de reverberação elevados, tomando como referência os tempos adequados para cada ambiente, Fig. 1, é importante lembrar que a análise feita neste trabalho é para a sala vazia sem absorvedores.

Pode-se observar algumas estatísticas referentes aos resultados, da sala 1, para cada combinação de posições de fonte e receptor na Tab. 8.

Tabela 8 - Estatísticas dos resultados referentes à sala 1

Estatísticas sala 1	Combinação fonte/receptor					
	1	2	3	4	5	6
Número de raios que atingiram o receptor	2154	2643	2387	2370	2109	2234
Número de raios que não atingiram o receptor	5227	4738	4994	5011	5272	5147
Maior distância total percorrida por raios que atingiram o receptor [m]	6443,99	6045,86	6657,69	6388,97	6942,92	6349,46
Maior tempo transcorrido até que um raio atinja o receptor [s]	18,84	17,68	19,47	18,68	20,30	18,57

Fonte: Própria autoria

Através da análise dos primeiros resultados do programa referente ao método do traçado de raios acústicos é possível observar algumas informações interessantes. O número médio de raios que atingiram o receptor, na simulação da primeira sala, foi de 5065 de um total de 7381 raios, representando 68,62% dos raios emitidos. Isto mostra que boa parte dos raios emitidos atingem o receptor de raio 0,2 metros antes de atingirem o número máximo de reflexões determinado.

As maiores distâncias percorridas, na primeira simulação, pelos raios superam os seis mil metros, podendo demorar até 20 segundos para atingir o receptor. Esses raios não serão relevantes para o resultado, uma vez que o tempo de reverberação é consideravelmente menor que isso, já que a maior parte da energia não levará tanto tempo para ser absorvida. O tempo de reverberação é dado pelo tempo necessário para o nível de pressão sonora cair 60 dB, como

mencionado anteriormente. Para valores de tempo maiores o nível de pressão sonora já terá caído muito, não fazendo parte da região do gráfico que será analisada.

Estes dados não influenciam diretamente nos resultados, são importantes apenas para percepção e consciência do funcionamento do programa. A sala 2 tem geometria semelhante a primeira sala em escala duas vezes maior, suas estatísticas podem ser observadas na Tab. 9.

Tabela 9 - Estatísticas dos resultados referentes à sala 2

Estatísticas sala 2	Combinação fonte/receptor					
	1	2	3	4	5	6
Número de raios que não atingiram o receptor	5143	5323	5211	5145	5175	5188
Número de raios que atingiram o receptor	2238	2058	2170	2236	2206	2193
Maior distância total percorrida por raios que atingiram o receptor [m]	12360,28	12441,37	13208,18	11645,87	13139,69	12473,42
Maior tempo transcorrido até que um raio atinja o receptor [s]	36,14	36,38	38,62	34,05	38,42	36,47

Fonte: Própria autoria

Na simulação da segunda sala pode-se perceber que um número menor de raios atingiu o receptor, em média 2184 raios, representando 29,59%, a grande queda é ocasionada pelo maior volume da sala. O número de raios continua sendo mais que o suficiente para observar a queda de energia no recinto.

A distância máxima percorrida, assim como o maior tempo transcorrido, foi aproximadamente duas vezes maior, acompanhando o aumento das dimensões do recinto, havendo raios que atingiram o receptor com tempos maiores que 38 segundos.

Os dados estatísticos dos resultados obtidos da simulação da sala 3 estão representados na Tab. 10.

Tabela 10 - Estatísticas dos resultados referentes à sala 2

Estatísticas sala 3	Combinação fonte/receptor					
	1	2	3	4	5	6
Número de raios que não atingiram o receptor	4661	4691	4700	4646	4614	4596
Número de raios que atingiram o receptor	2720	2690	2681	2735	2767	2785
Maior distância total percorrida por raios que atingiram o receptor [m]	3358,40	3632,58	3601,47	3568,62	3796,95	3509,25
Maior tempo transcorrido até que um raio atinja o receptor [s]	9,82	10,62	10,53	10,43	11,10	10,26

Fonte: Própria autoria

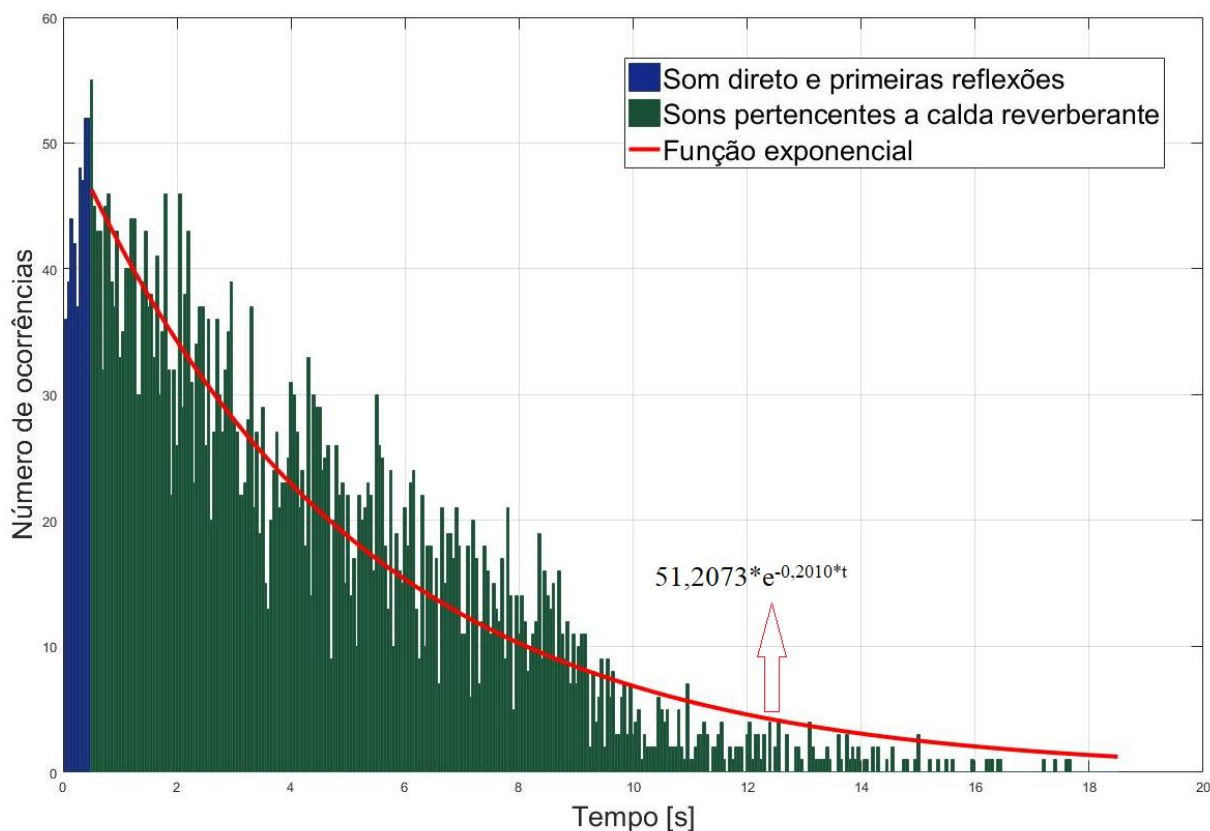
Na simulação da sala 3, em média, 2730 raios atingiram o receptor, o que corresponde a 36,99% dos raios. A porcentagem significativamente menor que na primeira simulação, também é ocasionada pelo maior volume da sala 3, quando comparada a sala 1. O número de raios é novamente suficiente para observar a queda de energia no recinto.

As distâncias máximas percorridas são intermediárias às outras simulações, porém os valores de maior tempo transcorrido até que um raio atinja o receptor são os menores dentre as três salas.

Mesmo com variações consideráveis na posição das fontes e receptores muitos dos primeiros resultados gerados foram bastante semelhantes, não havendo aparente variação considerável de comportamento do som na sala, em uma mesma simulação.

No histograma apresentado na Fig. 20 é apresentado a quantidade de raios que chegaram no receptor em cada intervalo de tempo para a primeira simulação, fonte “F_PROFESSOR” e receptor “R_ALUNO_2”.

Figura 20 - Histograma do tempo de chegada dos raios, para sala 1

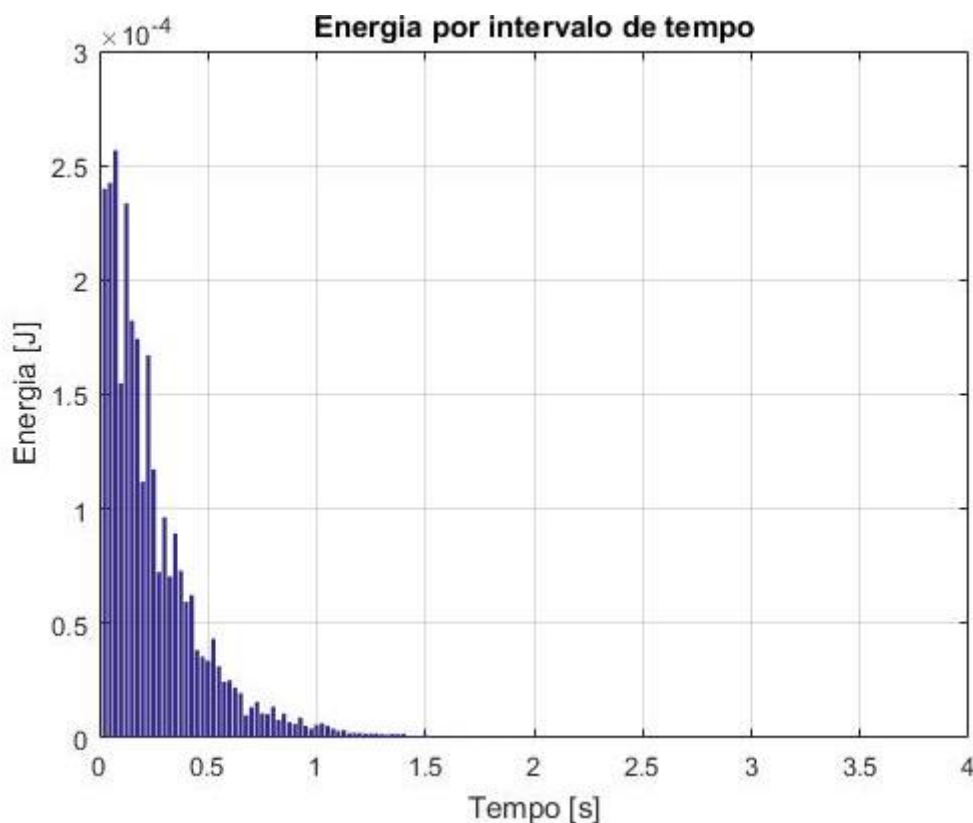


Fonte: Própria autoria

Este histograma não leva em conta a energia carregada por cada raio, traz informações apenas no que se diz respeito às quantidades de raios que são absorvidos pelo receptor em cada intervalo de tempo. Pode-se observar um crescimento nas ocorrências em tempos muito pequenos, isto porque os raios diretos chegam primeiro e em menor quantidade, depois os raios refletidos começam a chegar em maior quantidade e suas ocorrências diminuem com o tempo.

A energia assimilada pelo receptor em cada um dos intervalos de tempo está ilustrada pelo gráfico de barras da Fig. 21. A figura refere-se à queda de energia na sala obtida pela simulação para fonte “F_ALUNO” e receptor “R_ALUNO_1” de posições descritas anteriormente na Tab. 1.

Figura 21 - Gráfico de barras da energia sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1 em sua primeira combinação de fonte e receptor



Fonte: Própria autoria

Na Fig. 21 observa-se o decaimento logarítmico, no entanto fica difícil observar o decaimento de energia após pouco tempo, já que os valores se tornam muito pequenos para a escala linear da energia do gráfico. Quando é calculado o nível de pressão sonora, apresenta-se

a energia sonora em escala logarítmica e, assim, mais apropriada para a análise e obtenção dos resultados, como pode ser observado na Fig. 22.

Figura 22 - Gráfico de barras do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1 em sua primeira combinação de fonte e receptor

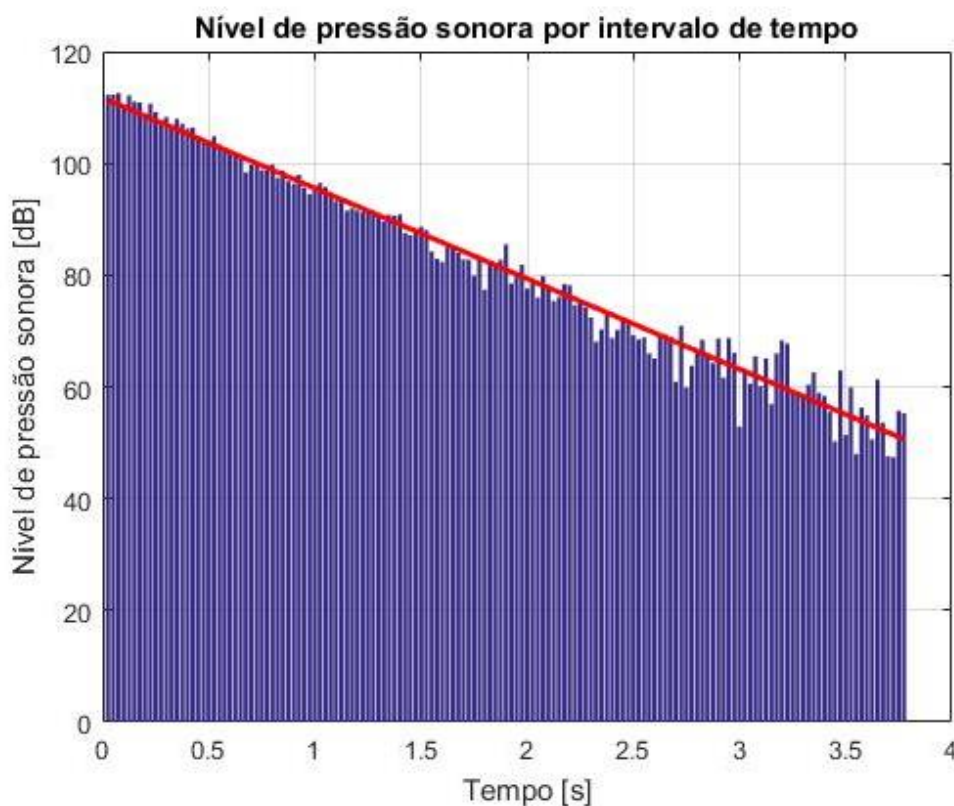


Fonte: Própria autoria

No gráfico apresentado na Fig. 22 observa-se linearidade no decaimento de energia, isso se dá porque apesar da energia do recinto ter uma queda logarítmica, conforme exposto na Fig. 21, ao converter os valores para dB é aplicada a função logarítmica tornando o decaimento linear.

A análise do tempo de reverberação se torna um pouco complicada pelos gráficos serem de intervalos, não sendo contínuos, cujos dificultam a avaliação de uma queda de exatamente 60 dB, para encontrar o T60. Faz-se uso da regressão linear para aproximar os valores em uma reta, permitindo encontrar o tempo de reverberação nesta. Na Fig. 23 é exibido novamente o gráfico de barras para as configurações da fonte "F_ALUNO" e receptor "R_ALUNO_1", porém com a adição da regressão linear para entrar o tempo de reverberação.

Figura 23 - Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1 em sua primeira combinação de fonte e receptor

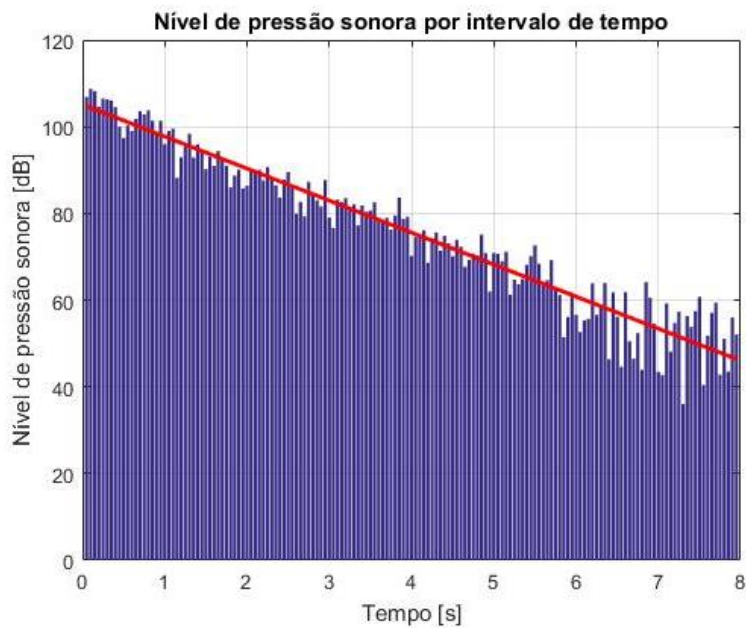


Fonte: Própria autoria

Com a inclinação da reta conhecida o intervalo de tempo para decaimento de 60 dB é encontrado, chegando-se assim no tempo de reverberação de 3,7057 segundos. Os demais gráficos para as outras combinações de fonte receptor tem comportamento análogo e podem ser encontrados no Apêndice B.

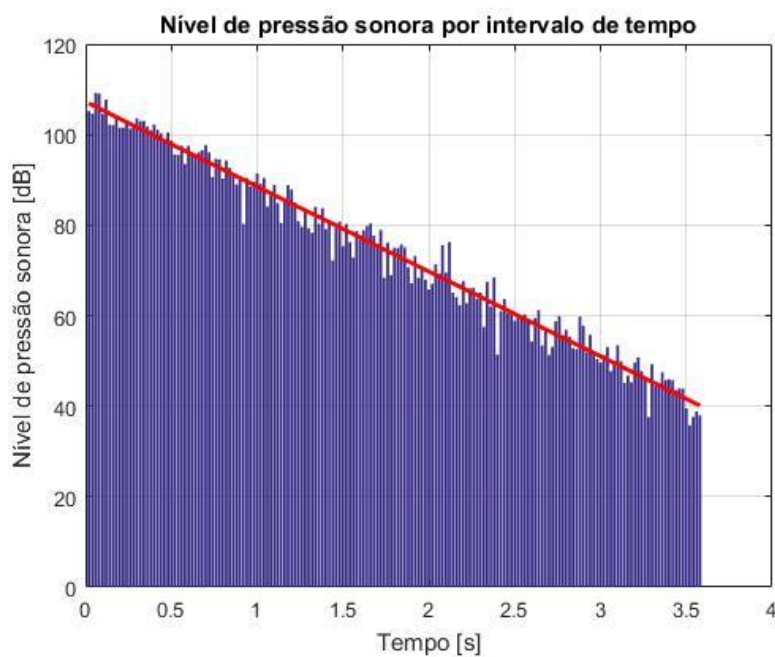
Os gráficos de barras e regressões lineares dos níveis de pressão sonora para as primeiras combinações de fonte e receptor para as salas 2 e 3 são apresentados nas Figs. 20 e 21, respectivamente.

Figura 24 - Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 2 em sua primeira combinação de fonte e receptor



Fonte: Própria autoria

Figura 25 - Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 3 em sua primeira combinação de fonte e receptor



Fonte: Própria autoria

Os tempos de reverberação de todas as simulações assim como para os métodos estatísticos são expostos na Tab. 11.

Tabela 11 – Tempo de reverberação para as salas 1, 2 e 3

Tempos de reverberação					
Sala	Método	Posição da fonte [m]	Posição do receptor [m]	Tempo de reverberação [s]	
Sala 1	Eyring	-	-	3,77	
	Eyring-Norris	-	-	3,81	
	Sabine	-	-	3,89	
	Raios acústicos	F_ALUNO [7, 1.5, 1]	[4.35, 2.35, 1.00]	3,71	
			[6.35, 6.35, 1.00]	3,74	
			[1.85, 3.35, 1.00]	3,72	
		F_PROFESSOR [2, 7.5, 1.5]	[4.35, 2.35, 1.00]	3,56	
			[6.35, 6.35, 1.00]	3,80	
			[1.85, 3.35, 1.00]	3,69	
		Média	-	3,70	
Sala 2		Eyring	-	-	7,54
		Eyring-Norris	-	-	7,62
	Sabine	-	-	7,78	
	Raios acústicos	F_ALUNO [10, 3, 1]	[8.70, 8.70, 1.00]	8,12	
			[12.70, 12.70, 1.00]	7,92	
			[4.20, 5.70, 1.00]	7,69	
		F_PROFESSOR [5, 15, 1.7]	[8.70, 8.70, 1.00]	8,41	
			[12.70, 12.70, 1.00]	7,40	
			[4.20, 5.70, 1.00]	7,34	
		Média	-	7,81	
Sala 3		Eyring	-	-	3,10
		Eyring-Norris	-	-	3,13
	Sabine	-	-	3,20	
	Raios acústicos	F_ALUNO [6.36, 9.26, 1]	[14.85, 14.85, 1.00]	3,20	
			[21.92, 19.16, 1.00]	3,24	
			[22.63, 24.11, 1.00]	3,59	
		F_PROFESSOR [25.81, 29.42, 1.1]	[14.85, 14.85, 1.00]	3,63	
			[21.92, 19.16, 1.00]	3,17	
			[22.63, 24.11, 1.00]	3,20	
		Média	-	3,34	

Fonte: Própria autoria

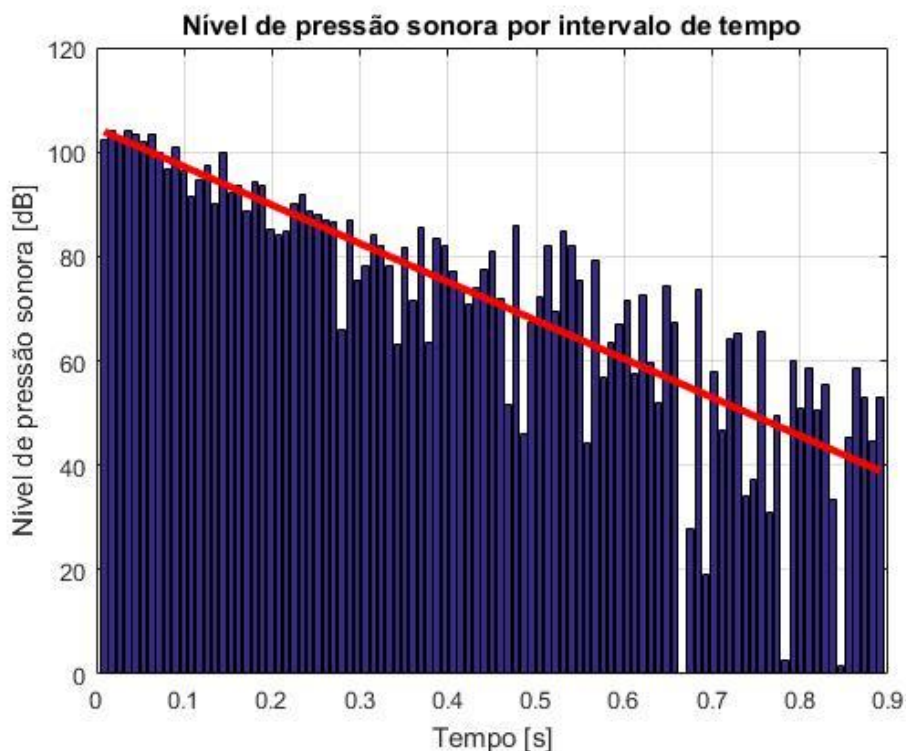
Observa-se na Tab. 11 que os tempos de reverberação encontrados para todas as três salas pelo método do traçado de raios acústicos foram próximos aos encontrados usando os métodos estatísticos. Algumas simulações apresentaram um distanciamento maior dos valores

encontrados através dos métodos estatísticos, usados como parâmetro. Justificam-se tais resultados pelo método considerar a geometria da sala e dessa forma, pondera as peculiaridades das regiões da sala. É possível existir variações entre os valores de diferentes combinações de posições para fonte e receptor.

Apesar de evidenciadas peculiaridades de certas regiões de cada sala é evidente a proximidade dos resultados da simulação com os valores calculados pelos métodos de Sabine, Eyring e Eyring-Norris, o que era esperado, uma vez que as salas têm geometrias simples e distribuição uniforme do coeficiente de absorvidade.

Com o programa já testado e validado o programa foi executado com os mesmos parâmetros apresentados na Tab. 7 alterando apenas a absorvidade do material do teto para 0,5. O gráfico de barras e regressão linear dos níveis de pressão sonora para a primeira combinação de fonte e receptor para as salas 1 com material absorvedor é exibido na Fig. 26.

Figura 26 - Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1 com material absorvedor, em sua primeira combinação de fonte e receptor



Fonte: Própria autoria

Comparando os gráficos que representam os níveis de pressão sonora da sala 1 com e sem material absorvedor, pode-se observar uma diminuição do nível de pressão sonora mesmo para tempos reduzidos e um aumento brusco do decaimento do nível de pressão sonora quando colocado o material absorvedor. A redução de 60 dB, ocorre em um tempo aproximadamente quatro vezes menor, quando comparada à sala sem material absorvedor.

Os tempos de reverberação encontrados pelos métodos estatísticos assim como pela execução do código criado, usando o método geométrico do traçado de raios acústicos estão dispostos na Tab. 12.

Tabela 12 – Tempo de reverberação para sala 1 com material absorvedor

Tempos de reverberação				
Sala	Método	Posição da fonte [m]	Posição do receptor [m]	Tempo de reverberação [s]
Sala 1 com absorvedor	Eyring	-	-	0,83
	Eyring-Norris	-	-	0,84
	Sabine	-	-	0,92
	Raios acústicos	F_ALUNO [7, 1.5, 1]	[4.35, 2.35, 1.00]	0,81
			[6.35, 6.35, 1.00]	0,85
			[1.85, 3.35, 1.00]	0,84
		F_PROFESSOR [2, 7.5, 1.5]	[4.35, 2.35, 1.00]	0,84
			[6.35, 6.35, 1.00]	0,87
			[1.85, 3.35, 1.00]	0,73

Fonte: Própria autoria

Novamente os resultados dos métodos estatísticos e geométrico não se distanciaram significativamente, mas pode-se notar expressiva redução do tempo de reverberação pela troca de material do teto. A média de tempo de reverberação caiu de 3,70 para 0,83 segundos o que representa uma queda de 77,7% do tempo de reverberação e tem grande impacto na percepção e audibilidade do recinto.

6. CONCLUSÃO

Os métodos estatísticos se mostraram uma ferramenta interessante para estimar o tempo de reverberação de salas simples pela simplicidade e velocidade de cálculo, mas é importante lembrar que os métodos são adequados para geometrias simples ou distribuições de coeficientes de absorvidade relativamente uniformes.

O método geométrico se mostrou notoriamente mais custoso computacionalmente, o que já era esperado, devido à grande quantidade de cálculos e funções dentro dos laços de repetição.

Os tempos de reverberação encontrados usando o programa criado com base no algoritmo do método do traçado dos raios acústicos e obtidos através dos métodos de Sabine, Eyring e Eyring-Norris foram satisfatoriamente próximos, salvo algumas combinações de posição de fonte e receptor específicas, o que é esperado de um método geométrico que revela mais sobre o comportamento do som na sala.

Os resultados validam o programa criado para fazer a aquisição dos dados geométricos de um desenho em AutoCAD salvo em formato “.dxf” e realizar todos os cálculos referentes ao algoritmo de cálculo do tempo de reverberação através do método do traçado de raios acústicos.

A mudança de parâmetro do material do teto da sala 1 causou uma significativa redução do tempo de reverberação médio, de 77,7%, caindo de 3,7 segundos para 0,83 segundo. Os valores encontrados nos diversos métodos foram novamente muito próximos uns dos outros. Métodos estatísticos conseguem ter uma boa aproximação para geometrias simples como as usadas, mas são incapazes de perceber as mudanças provenientes das diferentes posições e distribuições que a área de material absorvedor pode ser aplicada na sala.

Para salas simples, quando não há preocupação com as possíveis variações nas diferentes posições de absorvedores, fontes e receptores, métodos estatísticos conseguem prever bem e com baixo custo computacional. Já em casos de salas com formas geométricas complexas, com distribuições de materiais absorvedores ou quando se deseja prever os tempos de reverberação em diferentes posições da sala, métodos geométricos, como o método do traçado de raios acústicos, são mais adequados.

As maiores dificuldades encontradas durante o trabalho estão ligadas à programação, gerando um código que possui diversas funções e, ao mesmo tempo, fosse simples e permitisse ser alterado futuramente para diversos estudos com diferentes considerações. Uma grande

quantidade de tempo e energia foram gastos para identificar os erros do código e corrigi-los, assim como para criar as funções utilizadas no programa.

O trabalho possibilitou um grande crescimento das habilidades de programação e dos conhecimentos a respeito de acústica de recintos. Este trabalho contribuiu para o desenvolvimento de uma ferramenta que poderá ser utilizada em muitos estudos no futuro.

Trabalhos futuros podem refinar o programa de forma a criar uma ferramenta mais ampla em vários sentidos, permitindo escolha entre vários tipos de fonte com diferentes direcionalidades, inserir uma tabela com diferentes coeficientes de absorvidade de diferentes materiais para que o usuário possa escolher pelo material, no caso de não conhecer o coeficiente específico das paredes e objetos. Há possibilidade de adaptar o programa para usar uma malha de receptores gerando mais informações sobre o recinto e suas peculiaridades, em vez de simular apenas para as posições especificadas de receptor. Dessa forma essa se tornará uma ferramenta mais ampla e completa.

Pode-se distribuir a mesma área de material absorvedor de diferentes formas na sala, como por exemplo: metade no teto e porções em outras paredes, variar entre a metade da frente do teto e a de trás com material absorvedor, assim como a distribuição nas outras paredes. Dessa forma pode-se estudar as diferenças causadas pelas diferentes distribuições de uma mesma área de material absorvedor em um recinto, o que não é possível ser feito usando métodos estatísticos, que não percebem estas diferenças de posicionamento.

7. REFERÊNCIAS

- ARANHA, A. L. K. Estudo da Relação Entre o Decréscimo do Nível Sonoro em Função da Distância e as Propriedades de Absorção em Ambientes Industriais. Tese de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1995.
- BISTAFA, Sylvio R. Acústica aplicada ao controle do ruído. 2.ed. São Paulo: Blucher, 2011.
- BRANDÃO, E. Acústica de salas: Projeto e Modelagem. São Paulo: Edgard Blücher, 2016.
- GERGES, S.N.Y. Ruído: Fundamentos e controle. 2. Ed. Florianópolis: UFSC, 2000.
- GOMES, M. H. A. Obtenção de Parâmetros para a Avaliação da Qualidade Acústica de Salas Através da Técnica MLS e Acústica de Raio. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 1998.
- GROTTA, D. L. Materiais e Técnicas Contemporâneas para controle de Ruído Aéreo em Edifícios de Escritórios: Subsídios para Especificações. Tese de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009.
- KUTTRUFF, H. Room acoustics. 5.ed. London: Spon Press, 2009.
- MENEZES, J. V. P. Caracterização Acústica de Salas: Um Método Híbrido Combinando Os Métodos do Traçado de Raios e das Fontes Virtuais. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2018.
- MORAES, D. S. Medição e Previsão Numérica do Comportamento Acústico de um Teatro Experimental Para a UFPA. Tese de Mestrado. Universidade Federal de do Pará. Belém, PA, 2007.
- PORTELA, M. S. Caracterização de Fontes Sonoras e Aplicação na Auralização de Ambientes. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2008.
- PORTELA, M. S. Um Sistema de Baixo Custo para o Aluno de Acústica de Salas, Revista ACÚSTICA E VIBRAÇÕES, v. 37, junho de 2006.
- RINDEL, J. H. Modelling in Auditorium Acoustics – From the Ripple Tank and Scale Models to Computer Simulation. In The 3rd EEA European Congress on Acoustics. Forum Acusticum, Sevilla, 2002.
- SILVA, H. G., NETO, M. G. F. e RESENDE, P. A. Influência da Escolha do Raio do Receptor no Método do Traçado de Raios Acústicos. In: XXV CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA, vol. 4., 2018, Brasília, DF.
- STIERLIN, H. Encyclopedia of Word Architecture., 2. Ed. Cologne: Editora Benedikt Taschen Verlag GmbH, 1994. 493 p.

APÊNDICE A - Código do algoritmo do traçado de raios e funções auxiliares

A.01

```

clc
clear all
close all

%%

% Universidade Federal de Goiás
% Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
% Trabalho de Conclusão de Curso
% Autor:Henrique Gebran Silva
% Coautor: Marlipe Garcia Fagundes Neto
% Data:05/05/2019

%% Programa principal

%% Importar geometria do AUTOCAD para dados de entrada no MATLAB

%A SEGUINTE FUNÇÃO IMPORTA OS PLANOS DE DESENHO EM ARQUIVO .DXF
[plano plano_nome] = p_plano('sala_1.dxf');
%A SEGUINTE FUNÇÃO IMPORTA POSIÇÕES DE RECEPTORES E FONTES DE ARQUIVO .DXF
[fonte Fonte_nome receptor Receptor_nome] = p_ponto('sala_1.dxf');

%Como consequência das limirações dos métodos utilizados para calcular a
%normal, assim como a matriz referente aos coeficientes das equações dos
%planos, mais especificamente, limitações intrinsecas a inversão de
%matrizes, foi necessário deslocar alguns dos pontos. Foi criada uma função
%que identificasse os pontos iguais(nos diferentes planos) para
%deslocá-los, assim todos os pontos de uma das faces da sala são deslocados
%levemente, dessa forma evitamos o paralelismo das superficies com os
%planos de referência.

%o deslocamento é feito na ordem de alguns centézimos, dessa forma não
%altera a forma da sala, sendo desprezível a alteração do ponto de vista
% da construção civil, assim como da análise acústica.

[plano] = correcao_paralelismo(plano);

%função que calcula a normal de cada plano
[nd,A,B,C] = normal(plano, fonte);

%% Parâmetros do programa

%Número referente a combinação de fonte receptor: cada vez que uma
%combinação de fonte/receptor for utilizada será acrescido 1 ao valor desta
%variável

```

```

nc=0

%os dois laços for a seguir irão fazer o código principal se repetir para
%as combinações fontes/receptor de todas as fontes e receptores
%importados do arquivo ".dxf", referente ao desenho da sala, fontes e
%receptores.

%irá se repetir para cada diferente fonte (sendo "size(fonte,2)") o
%número de fontes
for n_fon=1:size(fonte,2)
%Parâmetros da fonte

% posição inicial da fonte
xf(n_fon,1)=fonte(1,n_fon);
yf(n_fon,1)=fonte(2,n_fon);
zf(n_fon,1)=fonte(3,n_fon);

%irá se repetir para cada diferente receptor (sendo "size(receptor,2)") o
%número de receptores
for n_recep=1:size(receptor,2)

%toda vez que este laço for se repetir será acrescido 1 ao valor desta
variável
%Corresponde ao número da combinação fonte/receptor

nc=nc+1

%Parâmetros do receptor

%posição do receptor
% ADEQUAÇÃO PARA AUTOMATIZAR PARA OS VÁRIOS RECEPTORES
xr(n_recep)=receptor(1,n_recep);
yr(n_recep)=receptor(2,n_recep);
zr(n_recep)=receptor(3,n_recep);

% Parâmetros dos materiais

%absortividade=alfa

alfa=[0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 0.04 ]

%energia total e de cada raio
%energia total

Ent=.1;

%obs:percorrendo as direções em um plano em 2*pi radianos e no outro plano
%em pi radianos varremos todas as direções do espaço.
%distância angular de um raio ao outro nas duas direções, de forma que
%(180/ir+1)/(360/ir+1)dá o número de raios saindo da fonte

ir=3;
En=Ent/(180/ir+1)/(360/ir+1);

%foi criada a variável disttotal para armazenar a soma das distâncias

```

```

%percorridas por cada raio até atingir o receptor.

disttotal=0;

%contador p_n conta os raios, cada vez que a função direc_emis for chamada
%será somado 1 ao valor de p_n

p_n=0;

% Parâmetros dos receptores
%rr= raio do receptor em metros

rr=0.2;

% Parâmetros do raio acústico

%nr=número de reflexões
% Após o número de reflexões determinado consideramos a energia do raio
% desprezível.
%os intervalos entre acertos,do raio no receptor, para n[umeros elevados
%de reflexões é cada vez maior. Um número de reflexões muito alto eleva o
%custo computacional e provavelmente o raio chegará ao receptor com uma
%energia muito pequena e um instante de tempo que não será relevante para
%o cálculo do tempo de reverberação, já que a o decaimento da energia não é
%tão lento.

nr=1000;

%

%% Propagação do raio acústico
%Os raios serão emitidos de forma distribuida, em todas as direções,
%mantendo o mesmo intervalo angular nas distribuições horizontal e
%vertical (=ir)
%Percorrendo na horizontal os ângulos de 0 à 360 e na vertical de -90 à 90
%percorre-se todos os octantes.

for hr=0:ir:360

    for vr=-90:ir:90

        %zera a matriz nld que carrega os valores da combinação anteriores de
        fonte/receptor
        nld(:,:)=zeros(3,nr);

        %função que calcula a direção de emissão de um raio(p_n)
        %nld(:,1)é a direção de partida do raio com os ângulos hr e vr
        %dist_aux a variavel que irá armazenar a distância percorrida é zerada
        %p_n é usado como variável de um contador, sendo o número correspondente a
        qual raio

        [nld(:,1),dist_aux,p_n] = direc_emis(hr,p_n,vr);
    end
end

```

```

%zera a matriz pin, referente aos possíveis pontos de intersecção,
%que carrega os valores da combinação anteriores de fonte/receptor

pin=zeros(3,size(plano,3),nr);

%para começar o "for" correspondente as reflexões de um raio a energia
%atual do raio deve ser igual a energia de cada raio.
En_atual=En;
for j=1:nr

    for i=1:size(plano,3)

        %para os planos poderem ser interceptados pelo raio, o
        %produto escalar da sua direção pela normal deve ser<0
        h=dot(nd(:,i),nld(:,j));
        if h<=0

            %A seguinte função deverá determinar os prováveis pontos
            de intersecção do raio
            %analisado com cada plano, entre eles o de menor distância
            será o ponto
            %real de colisão

            [pin(:,i,j), distancia(i)] =
pin_dist(A,B,C,nld,fonte,i,j,xf,yf,zf,n_fon);

            else

                distancia(i)=1e+8;
                %uma distância muito grande é salva na variável de modo
                %que esta não seja a menor distância (e este plano não
                %seja escolhido)
            end
        end
    end
    %a menor distância e o plano referente a ela (plano atingido)
    [z,p]=min(distancia);
    %em alguns casos mais de um plano terão mesma distância, isso
    %ocorre porque na mesma -parede foram definidos mais de um plano (mais de
    %um material), nesses casos uma função será usada para determinar qual o
    %real plano atingido, o real valor de "p".
    %para isso determinamos se há mais de um valor de distância mínima, e suas
    %posições, que serão os planos "candidatos".

    distancia==z;
    pos=distancia==z;

    %a função irá retornar quais os possíveis planos (distancia são iguais a z)
    %retornando um vetor com mesma dimensão de "distancia" formado por "0" nas
    %posições onde o valor é diferente de "z" e "1" para valores iguais a "z"

    plan_candid=find(pos);

    %se houver mais de um plano com a distância mínima então será necessário uma
    %função para especificar qual será atingido.

```

%se ponto_polygon for 1 o poligono formado pelas arestas desse plano contem
%o ponto de intersecção, e este é o plano atingido.

```

if size(plan_candid,2)>1
    [p] = escolha_parede(plan_candid, nd, pin,plano,j);
else
    p=plan_candid;
end

```

%de acordo com as propriedades da parede atingida uma parcela da eergia é
%perdida. É calculada a nova energia do raio após colidir com a parede.
%o esp é nulo, então o termo $*(1-esp(p))$ não fará diferença no resultado

```
En_atual=En_atual*(1-alfa(p)*(1-esp(p));
```

```

%Ponto de intersecção com o plano atingido
pinreal(:,j)=pin(:,p,j);
%distância percorrida total
dist_aux=dist_aux+distancia(p);

```

%Caso o raio reflita todas as nr vezes e não colidir com o receptor sua
%energia não deve ser computada ao final das colizões, então o seu
%valor é zerado.

```

if j==nr
    En_atual=0;
    break
end

```

%a nova direção do raio e ponto de origem da nova reflexão, caso não se
tenha

%atingido o receptor são dadas respectivamente por:

```

nld(:,j+1)=nld(:,j)-(2*nd(:,p)*(dot(nld(:,j),nd(:,p))));
xf(n_fon,j+1)=pin(1,p,j);
yf(n_fon,j+1)=pin(2,p,j);
zf(n_fon,j+1)=pin(3,p,j);

```

%distancia entre raio e o receptor, para verificação de colisão com
%receptor

```
[distR] = dist_recep(xf,yf,zf,xr,yr,zr,j,nld,n_fon,n_recep);
```

%se colidir com o receptor este raio foi "absorvido", interrompendo o "for"
%referente as reflexões deste raio

```

if distR(j)<rr
    break
end

```

```
end
```

```
disttotal(p_n)=dist_aux;
```

%A matriz auxiliar (M_auxil) irá guardar uma série de informações
importantes

%para posterior análise dos resultados.

```

%Suas linhas são formadas respectivamente pelo número do raio, o número de
%reflexões de cada um deles, a energia ao atingir o receptor, a distancia
%percorrida e o tempo, respectivamente.
    [M_auxil(:,p_n,nc)] = energ_result(En_atual,p_n,j,dist_aux,nc);

    end

end

end

end
end
%
%For para salvar todas as matrizes de resultado (M_auxil)
%save só salva matrizes de 2 dimensões => transcrever os dados de M_auxil
%para matriz 2 dimensões

for n_auxil=1:nc;
    for linha=1:5;
        linha_dados=linha+(n_auxil-1)*5;
        M_dados(linha_dados,:)=M_auxil(linha,:,n_auxil);
    end
end

%Salva os resultados para as diferentes combinações de posições em uma
%matriz, as posições de fonte e de receptor

save('Resultados_sala1.txt','-ascii','M_dados')
save('Receptores_sala1.txt','-ascii','receptor')
save('Fontes_sala1.txt','-ascii','fonte')

```

A.02

```

% Universidade Federal de Goiás
% Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
% Autor:Henrique Gebran Silva
% Coautor: Marlipe Garcia Fagundes Neto
% Data:25/04/2019
%
%
% Retorna as posições x,y,z de pontos que formam diferentes planos de
% arquivo em .dxf salvo em AutoCAD R12/LT2
% DXF
%
%
%sendo R o nome do arquivo em .dxf entre aspas simples
%
%Os planos deiferentes devem ser feitos em layers diferentes, usando a
%função FACE3D, o nome das layers deve começar por "M_", seguido de
%complemento que permita diferenciação e identificação dos planos.
% Exemplo:
% [plano plano_nome] = p_plano('face_piso_layer_azul_fonte_receptor_3.dxf')
%

```

```

%RESPOSTA PARA 6 Planos:
%
% plano(:, :, 1) =
%
%      8.7000      8.7000         0         0
%           0      8.7000      8.7000         0
%           0         0         0         0
%
%
% plano(:, :, 2) =
%
%      8.7000      8.7000         0         0
%      8.7000      8.7000      8.7000      8.7000
%           0      3.4000      3.4000         0
%
%
% plano(:, :, 3) =
%
%      8.7000      8.7000         0         0
%           0         0         0         0
%           0      3.4000      3.4000         0
%
%
% plano(:, :, 4) =
%
%           0         0         0      -0.0000
%           0      8.7000      8.7000         0
%           0         0      3.4000      3.4000
%
%
% plano(:, :, 5) =
%
%      8.7000      8.7000      8.7000      8.7000
%           0      8.7000      8.7000         0
%           0         0      3.4000      3.4000
%
%
% plano(:, :, 6) =
%
%      8.7000      8.7000         0         0
%           0      8.7000      8.7000         0
%      3.4000      3.4000      3.4000      3.4000
%
%
% plano_nome =
%
%      'M_PISO'      'M_FRENTE'      'M_FUNDO'      'M_P_ESQUERDA'
%      'M_P_DIREITA'      'M_TETO'
%desta forma são dadas as posições dos 4 pontos que determinam o plano

function [plano plano_nome] = p_plano(R)

FID=fopen(R);

B=fgetl(FID);
aux_plano=1;

while ischar(B)

```

```

B=fgetl(FID);
%o matlab lê as linhas do arquivo como caracteres (mesmo os números)
% dessa forma irá ler linha por linha até o final do programa, quando
% retornará fgetl=-1
    if strcmp(B, '3DFACE')

        B=fgetl(FID);
        B=fgetl(FID);
        B=fgetl(FID);
        B=fgetl(FID);

        if strcmp(B(1:2), 'M_')

            plano_nome{aux_plano}=B;

            for ii=1:4

                B=fgetl(FID);
                B=fgetl(FID);

                x_plano(ii)=str2num(B);

                B=fgetl(FID);
                B=fgetl(FID);

                y_plano(ii)=str2num(B);

                B=fgetl(FID);
                B=fgetl(FID);

                z_plano(ii)=str2num(B);

            end

            plano(:, :, aux_plano)=[x_plano; y_plano; z_plano];
            aux_plano=aux_plano+1;

        end

    end
end
% passar para próxima linha
end

fclose(FID);

```

A.03

```

% Universidade Federal de Goiás
% Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
% Autor: Henrique Gebran Silva
% Coautor: Marlipe Garcia Fagundes Neto
% Data: 25/04/2019
%

```

```

%
% Retorna as posições x,y,z de um ponto em .dxf salvo em AutoCAD R12/LT2
%
% pontos referentes a fontes sonoras devem ser feitos em layers com nome
% iniciado por 'F_' o restante do seu nome servirá para identificar e
% diferenciar as fontes
%
% pontos referentes a receptores sonoros devem ser feitos em layers com
nome
% iniciado por 'R_' o restante do seu nome servirá para identificar e
% diferenciar os receptores.
% DXF
%
% [fonte Fonte_nome receptor Receptor_nome] = p_ponto(R)
% sendo R o nome do arquivo acompanhado de .dxf entre aspa simples
% Exemplo:
% [fonte Fonte_nome receptor Receptor_nome] =
p_ponto('face_piso_layer_azul_fonte_receptor_3.dxf')
% resposta:
% fonte =
%
%      4.0000      4.3500
%      4.0000      4.3500
%      1.6000      1.0000
%
%
% Fonte_nome =
%
%      'F_PROFESSOR'      'F_ALUNO'
%
%
% receptor =
%
%      2.0000      6.0000
%      2.0000      6.0000
%      1.6000      1.6000
%
%
% Receptor_nome =
%
%      'R_ALUNO'      'R_ALUNO'

```

```
function [fonte Fonte_nome receptor Receptor_nome] = p_ponto(R)
```

```
FID=fopen(R);
```

```
B=fgetl(FID);
```

```
aux_fonte=1;
```

```
aux_receptor=1;
```

```
while ischar(B)
```

```
    B=fgetl(FID);
```

```
    %o matlab lê as linhas do arquivo como caracteres (mesmo os números)
```

```
    %dessa forma irá ler linha por linha até o final do programa, quando
```

```
    %retornará fgetl=-1
```

```
        if strcmp(B,'POINT')
```

```

B=fgetl(FID);
B=fgetl(FID);
B=fgetl(FID);
B=fgetl(FID);

    if strcmp(B(1:2),'F_')
        Fonte_nome{aux_fonte}=B

%
        B=fgetl(FID);
        B=fgetl(FID);

        x_fonte(aux_fonte)=str2num(B);

        B=fgetl(FID);
        B=fgetl(FID);

        y_fonte(aux_fonte)=str2num(B);

        B=fgetl(FID);
        B=fgetl(FID);

        z_fonte(aux_fonte)=str2num(B);
        fonte(:,aux_fonte)=[x_fonte(aux_fonte);
y_fonte(aux_fonte); z_fonte(aux_fonte)]
        aux_fonte=aux_fonte+1;

    end

    if strcmp(B(1:2),'R_')
        Receptor_nome{aux_receptor}=B
        B=fgetl(FID);
        B=fgetl(FID);

        x_receptor(aux_receptor)=str2num(B);

        B=fgetl(FID);
        B=fgetl(FID);

        y_receptor(aux_receptor)=str2num(B);

        B=fgetl(FID);
        B=fgetl(FID);

        z_receptor(aux_receptor)=str2num(B);

        receptor(:,aux_receptor)=[x_receptor(aux_receptor);
y_receptor(aux_receptor); z_receptor(aux_receptor)]
        aux_receptor=aux_receptor+1

    end

    end
% passar para próxima linha
end

fclose(FID);

```

A.04

```

% Universidade Federal de Goiás
% Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
% Autor:Henrique Gebran Silva
% Coautor: Marlipe Garcia Fagundes Neto
% Data:25/04/2019
%
%Essa função identifica os pontos iguais(nos diferentes planos) para
%deslocá-los, assim todos os pontos de uma das faces da sala são deslocados
%levemente, dessa forma evitamos o paralelismo das superfícies com os
%planos de referência.

% deslocamento é feito na ordem de alguns centésimos, dessa forma não
%altera a forma da sala, sendo desprezível a alteração do ponto de vista
% da construção civil, assim como da análise acústica.

% entrada: plano
%saída: plano

function [plano] = correcao_paralelismo(plano)

plano_alterar=plano(:, :, 1)

for plan=1:(size(plano,3))
    for col=1:(size(plano,2))
        for plan_1=1:(size(plano,2))
            if plano(:, col, plan)==plano_alterar(:, plan_1)
                plano(:, col, plan)=plano(:, col, plan)+(plan_1)/100
            end
        end
    end
end

end

```

A.05

```

% Universidade Federal de Goiás
% Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
% Autor:Henrique Gebran Silva
% Coautor: Marlipe Garcia Fagundes Neto
% Data:25/04/2019
%
% DEFINIDOS OS PONTOS DO PLANO, SERÃO CONSTRUIDAS MATRIZES, 1 PARA CASA
% PLANO, COM 3 PONTOS(O SUFICIENTE PARA DEFINIR O PLANO)
% ENCONTRAR OS COEFICIENTES DO PLANO, PARA ASSIM CALCULAR AS NORMAIS DOS

```

```

% PLANOS

function [nd,A,B,C] = normal(plano, fonte)
% PLANOS=plano

for i=1:size(plano,3)
    plano1(:, :, i)=plano(:, :, i) '

        M(:, :, i)=plano1(1:3,1:3,i);

end
%"N" APENAS AUXILIARÁ O CÁLCULO DOS COEFICIENTES DO PLANO (INVERSÃO DE
%MATRIZES)
N=[1;1;1];

for i=1: size(plano,3)
    T(:, :, i)=inv(M(:, :, i));
    v(:, i)=T(:, :, i)*N;
    A(i)=v(1, i);
    B(i)=v(2, i);
    C(i)=v(3, i);
end
% o programa irá calcular a normal dos planos das paredes da sala desenhada
% usando alguns critérios, ainda assim é preciso tomar precauções, pois
% deseja-se obter normais que apontem para dentro da sala e dependendo da
% sequencia de indicação dos pontos a normal obtida pode estar com sentido
% invertido (para fora da sala) pra isso foi criado um mecanismo que irá
% obter as duas normais e escolher a certa. Nada mais é que calcular o
% vetor normal que possui a menor distância de sua extremidade e um ponto
% interno a sala (a fonte por exemplo)

% for i=1: size(plano,3)
% p1=plano(1:3,1,i)';
% p2=plano(1:3,2,i)';
% p3=plano(1:3,3,i)';
%
%
% n1(:, i)=cross(p3-p1,p3-p2);
%
% nd1(:, i)=(n1(:, i)/norm(n1(:, i)));

    for i=1: size(plano,3)
p1=plano1(1,1:3,i);
p2=plano1(2,1:3,i);
p3=plano1(3,1:3,i);

n1(:, i)=cross(p3-p1,p3-p2);

nd1(:, i)=(n1(:, i)/norm(n1(:, i)));
    end

    for i=1: size(plano,3)
p1=plano1(1,1:3,i);
p2=plano1(2,1:3,i);
p3=plano1(3,1:3,i);

```

```

n2(:,i)=cross(p3-p2,p3-p1);

nd2(:,i)=(n2(:,i)/norm(n2(:,i)));

end
%escolha das normais de cada plano
for i=1: size(plano,3)
    %encontrar a posição da extremidade dos vetores das normais com origem
    %em um dos pontos de seu respectivo plano
    %PONTO DO PLANO (plano(:,1,i)) + A NORMAL (candidata à normal
    %adequada)
    extremidade_vetor1(:,i)=plano1(1,1:3,i)'+nd1(:,i);
    dist_1(i)=sqrt((fonte(1,1)-extremidade_vetor1(1,i))^2+(fonte(2,1)-
    extremidade_vetor1(2,i))^2+(fonte(3,1)-extremidade_vetor1(3,i))^2);
    extremidade_vetor2(:,i)=plano1(1,1:3,i)'+nd2(:,i);
    dist_2(i)=sqrt((fonte(1,1)-extremidade_vetor2(1,i))^2+(fonte(2,1)-
    extremidade_vetor2(2,i))^2+(fonte(3,1)-extremidade_vetor2(3,i))^2);

    if dist_1(i)<dist_2(i)
        nd(:,i)=nd1(:,i);
    else
        nd(:,i)=nd2(:,i);
    end
end

end
end

```

A.06

```

% Universidade Federal de Goiás
% Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
% Autor:Henrique Gebran Silva
% Coautor: Marlipe Garcia Fagundes Neto
% Data:25/04/2019
%
%Essa função irá calcular a direção nld de cada raio que parte da fonte
% entradas: hr, p_n, vr
%sendo hr e vr os ângulos nas duas direções do raio e p_n o número do raio

%saída nld, dist_aux, p_n

%nld(:,1)é a direção de partida do raio com os ângulos hr e vr
%dist_aux a variavel que irá armazenar a distância percorrida é zerada
%p_n é usado como variável de um contador, sendo o número correspondente a
qual raio

function [nld,dist_aux,p_n] = direc_emis(hr,p_n,vr)
dist_aux=0;

```

```

p_n=p_n+1;

tetaH=hr*pi/180;
tetaV=vr*pi/180;

nlx=cos(tetaH)*cos(tetaV);

nly=sin(tetaH)*cos(tetaV);

nlz=sin(tetaV);

n11(:,1)=[nlx nly nlz];
n1d(:,1)=n11(:,1)/norm(n11(:,1));

```

A.07

```

% Universidade Federal de Goiás
% Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
% Autor:Henrique Gebran Silva
% Coautor: Marlipe Garcia Fagundes Neto
% Data:25/04/2019
%
%A seguinte função deverá determnar os prováveis pontos de intersecção do
raio
%analisado com cada plano, entre eles o de menor distância será o ponto
%real de colisão

%para os planos poderem ser interceptados pelo raio, o produto escalar da
%sua direção pela normal deve ser<0

%determinar o ponto de intersecção com os planos pela resolução do
sistema

function [pin, distancia] =
pin_dist(A,B,C,nld,fonte,i,j,xf,yf,zf,n_fon)
M1(:,:,i)=[A(i) B(i) C(i) 0;1 0 0 -nld(1,j);0 1 0 -nld(2,j); 0 0 1 -
nld(3,j)];
N1(:,:,i)=[1;xf(n_fon,j);yf(n_fon,j);zf(n_fon,j)];

T1(:,:,i)=inv(M1(:,:,i));
v1(:,i)=T1(:,:,i)*N1(:,:,i);
%pontos possíveis de intersecção com os planos
pin=[v1(1,i); v1(2,i); v1(3,i)];
%distancia que deverá ser percorrida pelo raio, em uma reflexão"j"
específica,
%para atingir determinado plano
distancia=sqrt((xf(n_fon,j)-v1(1,i))^2+(yf(n_fon,j)-
v1(2,i))^2+(zf(n_fon,j)-v1(3,i))^2);

```

A.08

```

% Universidade Federal de Goiás
% Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
% Autor:Henrique Gebran Silva
% Coautor: Marlipe Garcia Fagundes Neto
% Data:10/11/2018
%
%com a menor distancia conhecida, encontrar todos as paredes que estão
%contidas nesse plano, ou seja, todas que tem a distância igual a menor.
%
%com todas as paredes candidatas para descobrir qual realmente é atingida
%teremos que analisar dentro de qual delas está o ponto de intersecção.
%as funções de pertencimento de ponto dentro de um poligono são para 2
%dimensões
%
%para os casos em que há mais de um material na mesma parede, serão
%definidas pelo mesmo plano, logo a distância será a mesma para as
%superfícies candidatas, mas o ponto de intersecção pertence a apenas uma
%destas, é preciso descobrir qual para descobrir qual alfa usar
%
%
function [p] = escolha_parede(plan_candid, nd, pin,plano,j)
    for aa=1:size(plan_candid,2)

        cand=plan_candid(aa);
        %Sendo nd a direção normal
            if nd(1,cand)==0 && nd(2,cand)==0

                ponto_polygon=inhull([pin(1,cand,j),pin(2,cand,j)],([plano(1,:,cand);plano(2,:,cand)]));

                    elseif nd(2,cand)==0 && nd(3,cand)==0

                ponto_polygon=inhull([pin(2,cand,j),pin(3,cand,j)],([plano(2,:,cand);plano(3,:,cand)]));

                    elseif nd(1,cand)==0 && nd(3,cand)==0

                ponto_polygon=inhull([pin(1,cand,j),pin(3,cand,j)],([plano(1,:,cand);plano(3,:,cand)]));

                        else
                            %Para o caso de a normal não ser paralela a nenhum dos
                            %eixos

                ponto_polygon=inhull([pin(1,cand,j),pin(2,cand,j),pin(3,cand,j)],([plano(1,:,cand);plano(2,:,cand);plano(3,:,cand)]));
                    end
                if ponto_polygon==1
                    p=cand;
                end

            end
    end
end

```

A.09

```

% Universidade Federal de Goiás
% Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
% Autor:Henrique Gebran Silva
% Coautor: Marlipe Garcia Fagundes Neto
% Data:25/04/2019
%
%DISTANCIA PONTO à RETA // Interceptação pelo receptor.
% Sendo ndl(1,j)=A; ndl(2,j)=B; ndl(3,j)=C, coeficientes da reta
%E xf(1,j),yf(1,j) e zf(1,j) ponto pertencente a reta
%vetor ponto da reta->receptor
function [distR] = dist_recep(xf,yf,zf,xr,yr,zr,j,nld,n_fon,n_recep)

fr=[xr(n_recep)-xf(n_fon,j+1),yr(n_recep)-yf(n_fon,j+1),-zr(n_recep)-
zf(n_fon,j+1)];
% % sendo a distancia da reta ao ponto R
% distR(j)=norm(cross(fr,nld(:,j)))/(norm(nld(:,j)));

fr_fr_ant=[xf(n_fon,j)-xf(n_fon,j+1),yf(n_fon,j)-yf(n_fon,j+1),zf(n_fon,j)-
zf(n_fon,j+1)];

distR(j)=norm(cross(fr,fr_fr_ant))/(norm(fr_fr_ant));

```

A.10

```

% Universidade Federal de Goiás
% Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
% Autor:Henrique Gebran Silva
% Coautor: Marlipe Garcia Fagundes Neto
% Data:25/04/2019
%
%Função responsável por criar a matriz que carrega a energia de cada raio,
%o tempo gasto para percorrer todo o caminho, a energia, e número de
%reflexões
% número de raio, número de reflexões, energia, distancia e tempo.
function [M_auxil] = energ_result(En_atual,p_n,j,dist_aux,nc)

Energia(p_n)=En_atual;
disttotal(p_n)=dist_aux;

n_reflexao(p_n)=j;

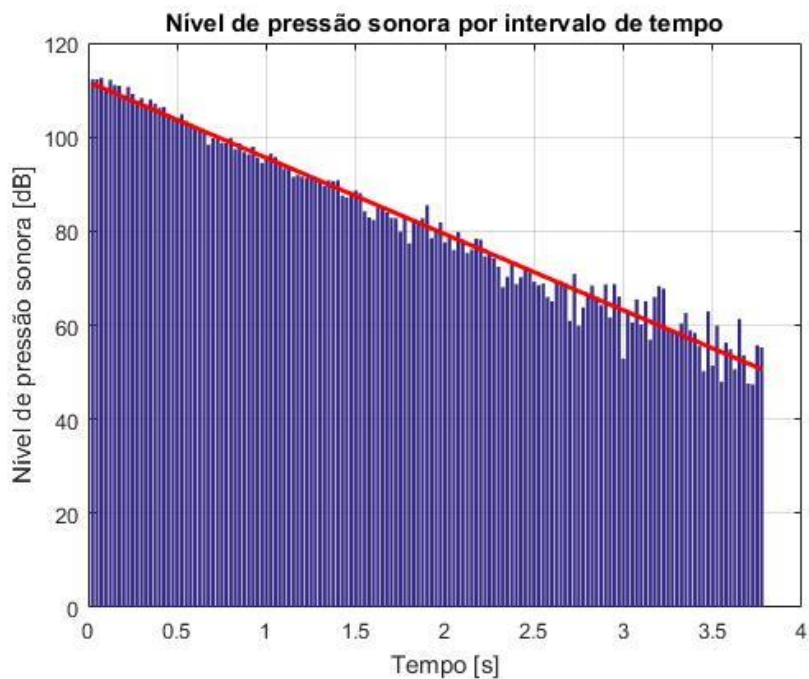
% número do raio/num de reflexões/Energia/dist_aux/tempo
M_auxil(1)=p_n;
M_auxil(2)=n_reflexao(p_n);

```

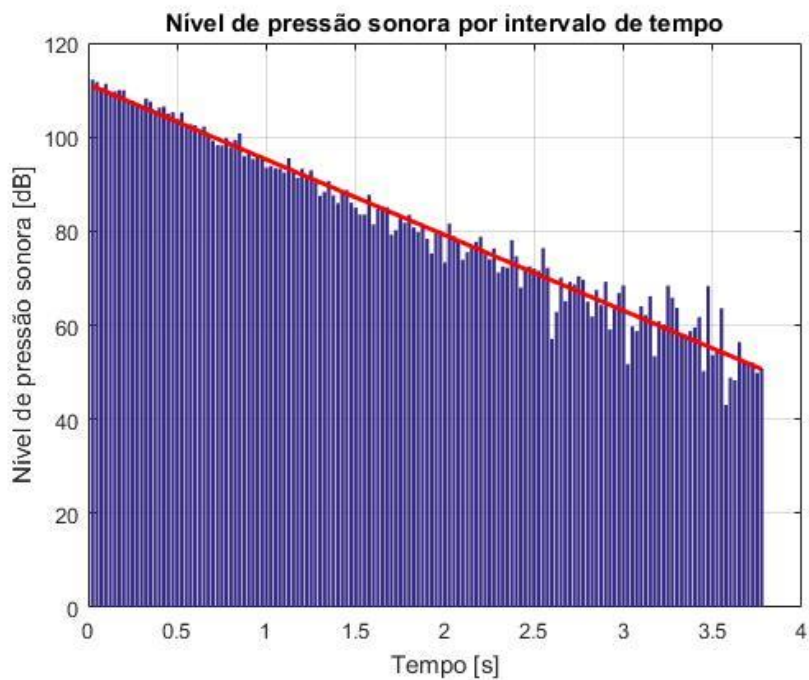
```
M_auxil(3)=Energia(p_n);  
M_auxil(4)=disttotal(p_n);  
tempo(p_n)=dist_aux/342;  
M_auxil(5)=tempo(p_n);
```

APÊNDICE B

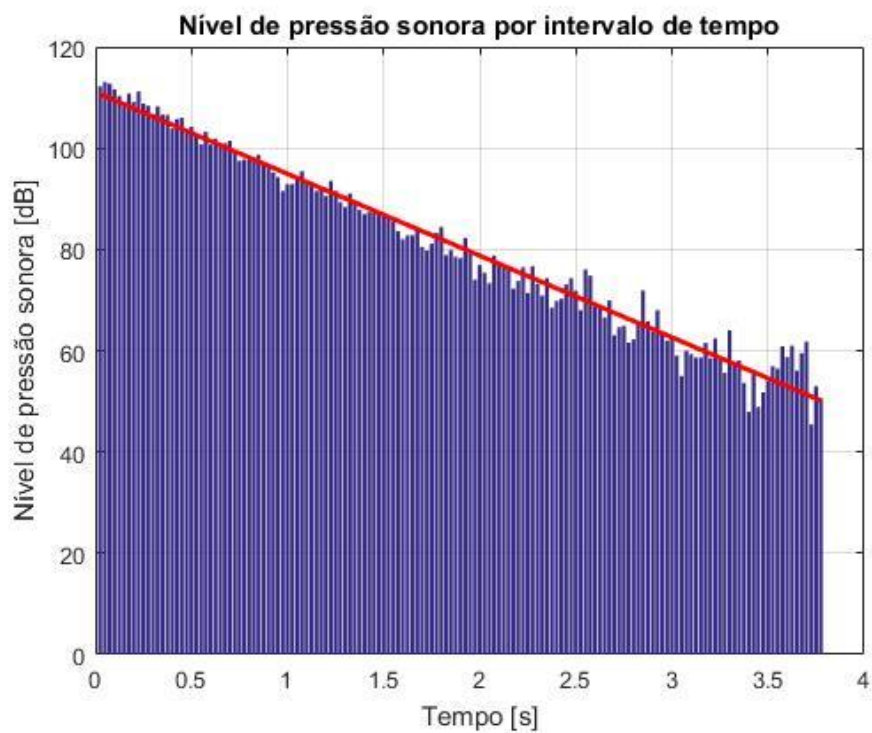
Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para as três salas em todas combinações de fonte e receptor



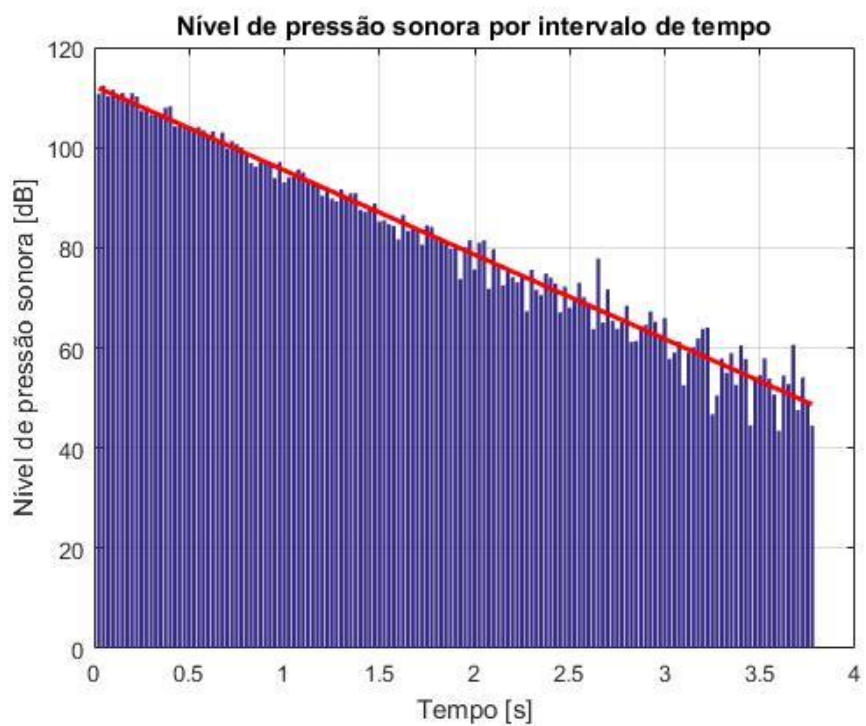
B.01 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1 em sua primeira combinação de fonte e receptor



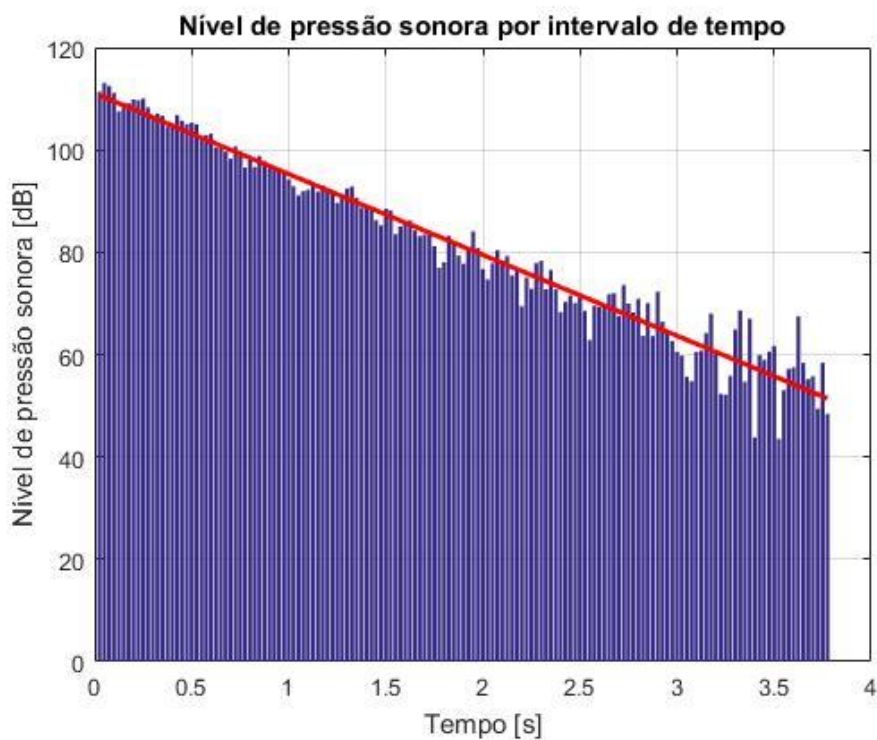
B.02 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1 em sua segunda combinação de fonte e receptor



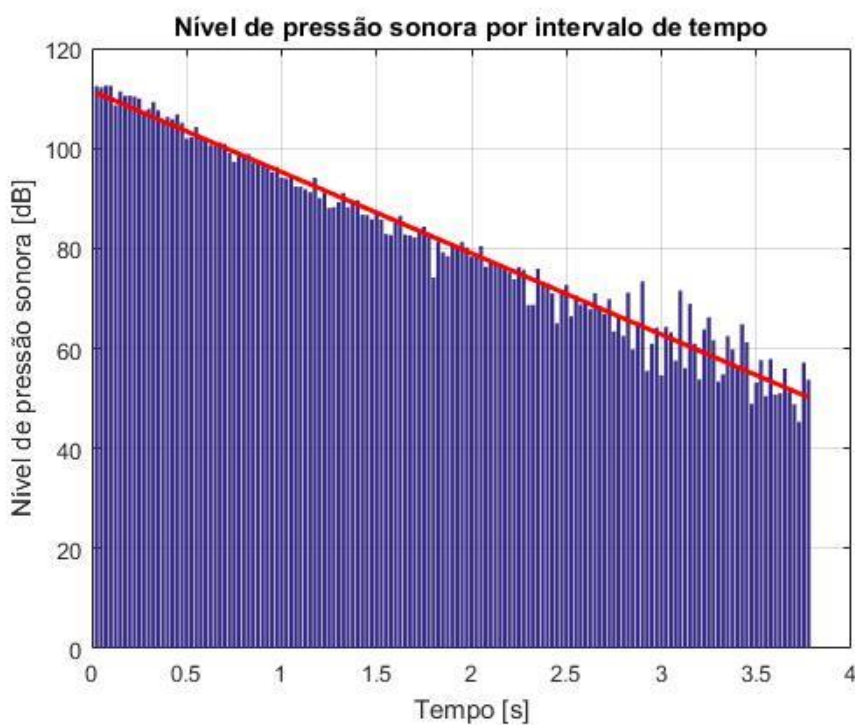
B.03 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1 em sua terceira combinação de fonte e receptor



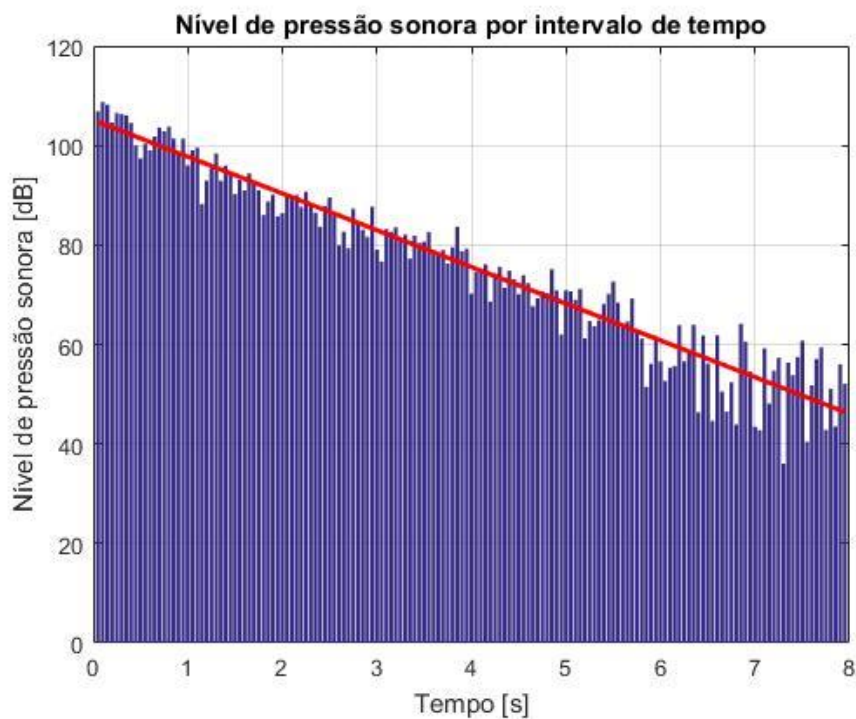
B.04 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1 em sua quarta combinação de fonte e receptor



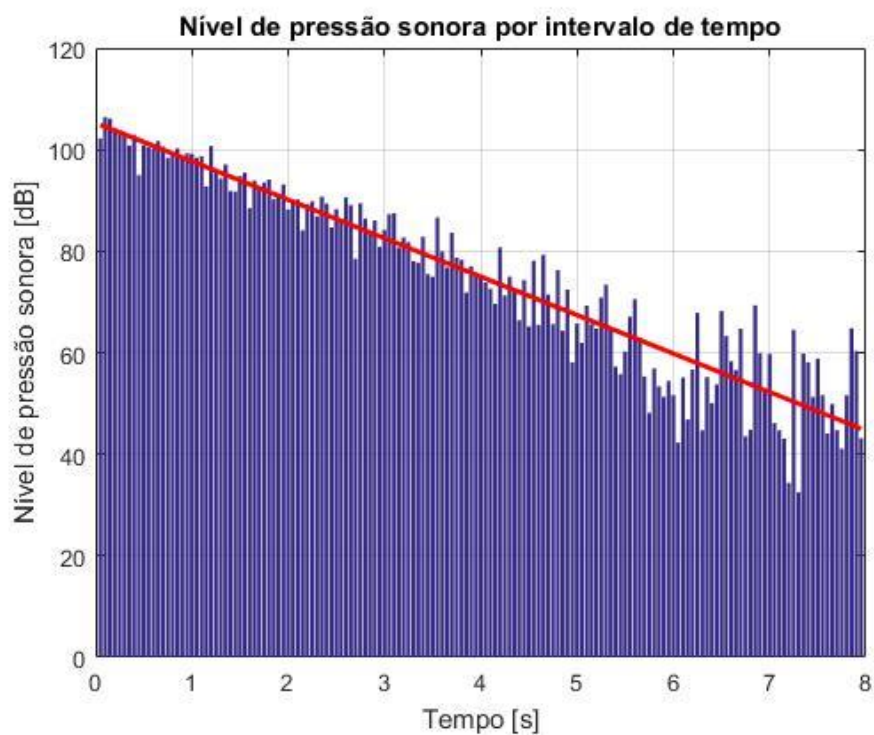
B.05 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1 em sua quinta combinação de fonte e receptor



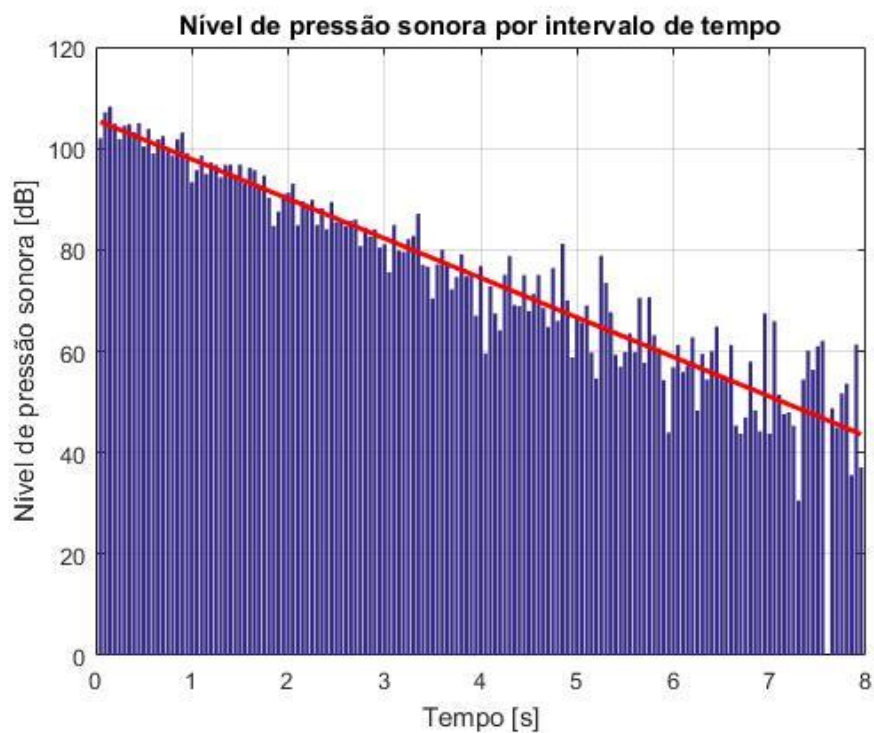
B.06 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1 em sua sexta combinação de fonte e receptor



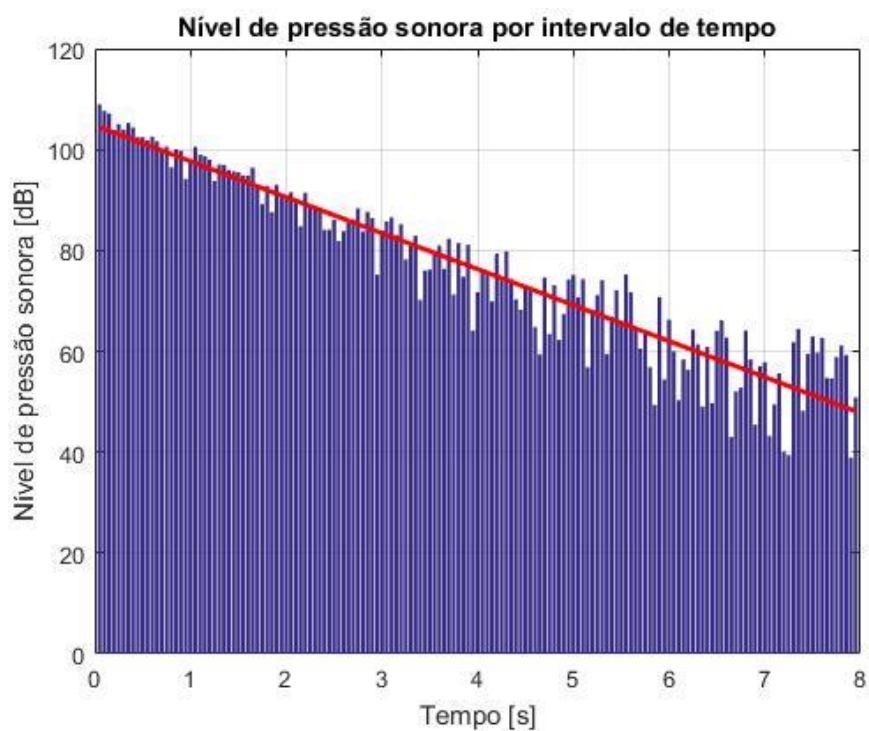
B.07 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 2 em sua primeira combinação de fonte e receptor



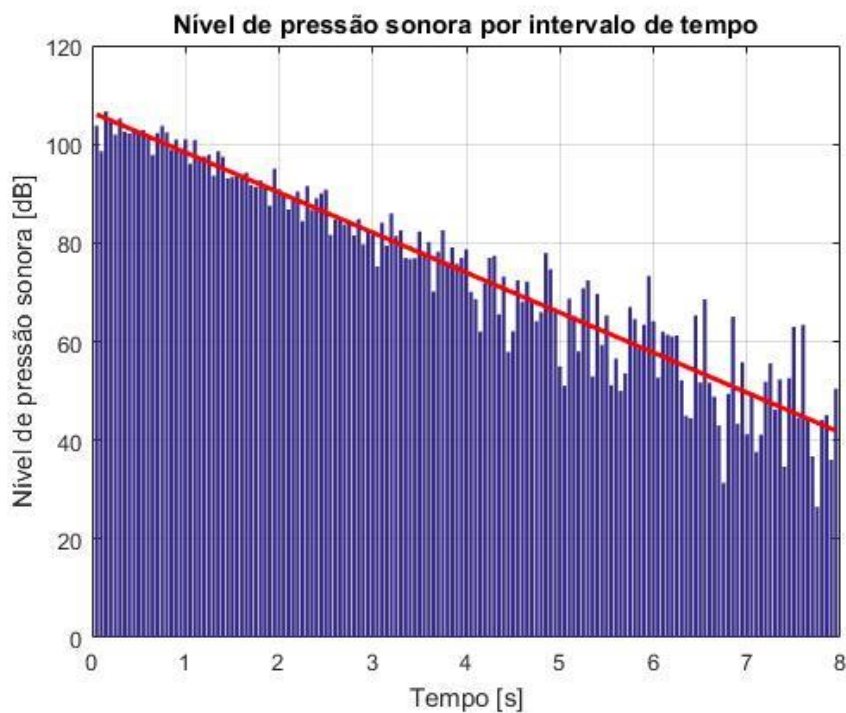
B.08 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 2 em sua segunda combinação de fonte e receptor



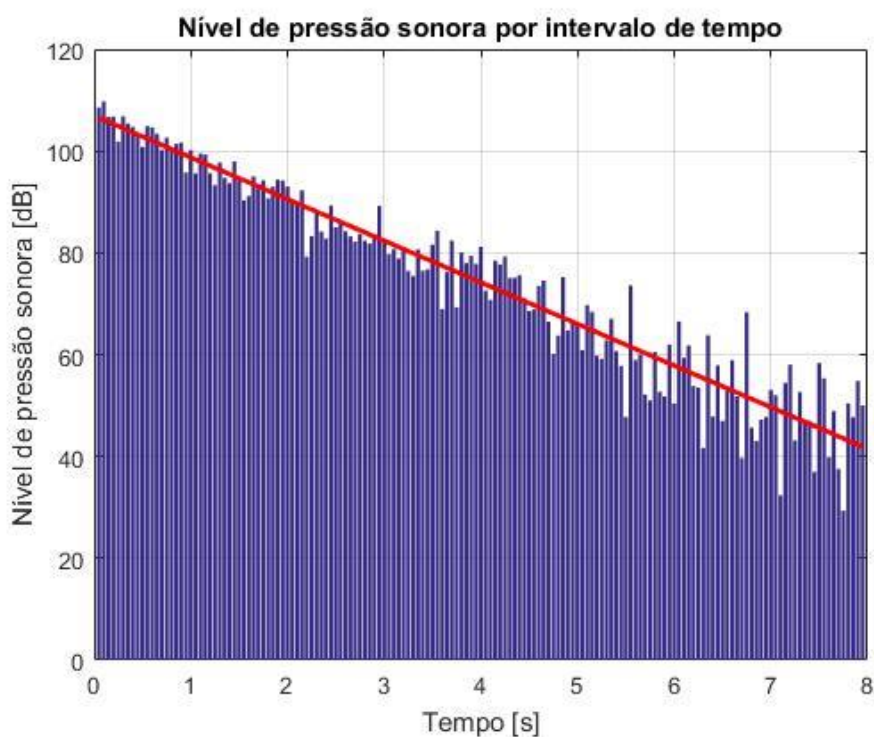
B.09 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 2 em sua terceira combinação de fonte e receptor



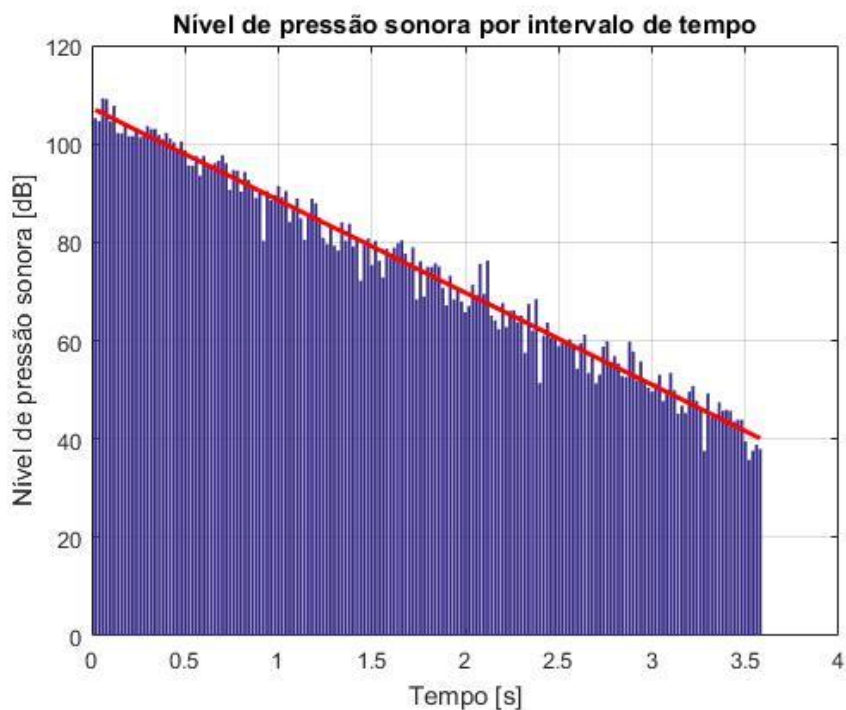
B.10 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 2 em sua quarta combinação de fonte e receptor



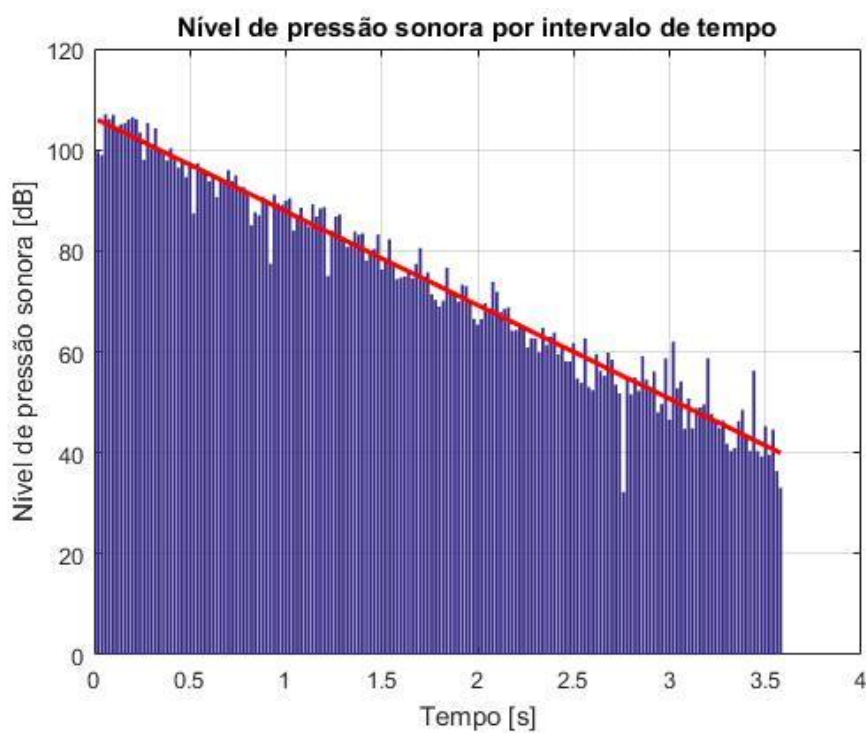
B.11 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 2 em sua quinta combinação de fonte e receptor



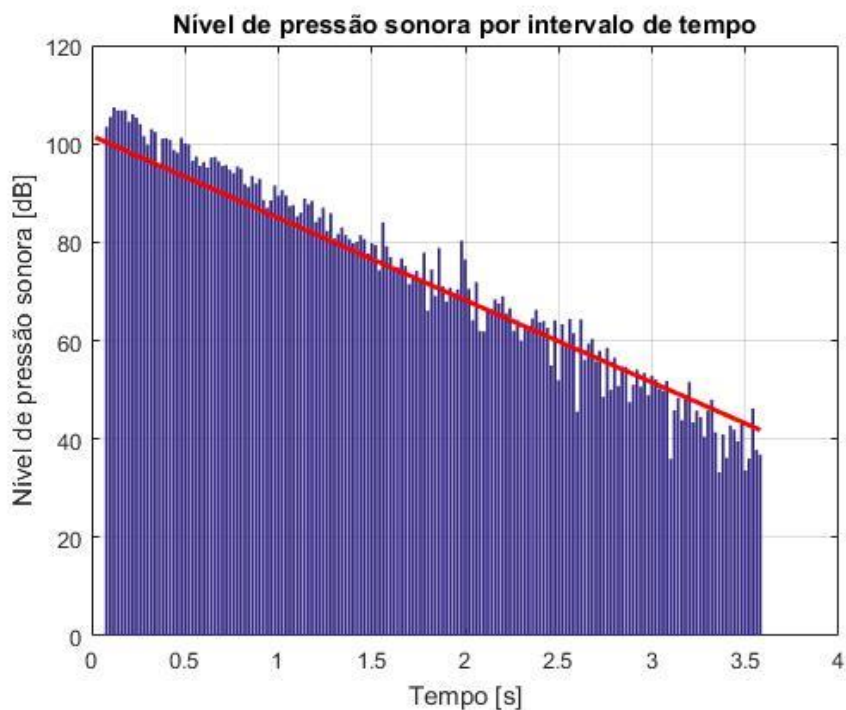
B.12 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 2 em sua sexta combinação de fonte e receptor



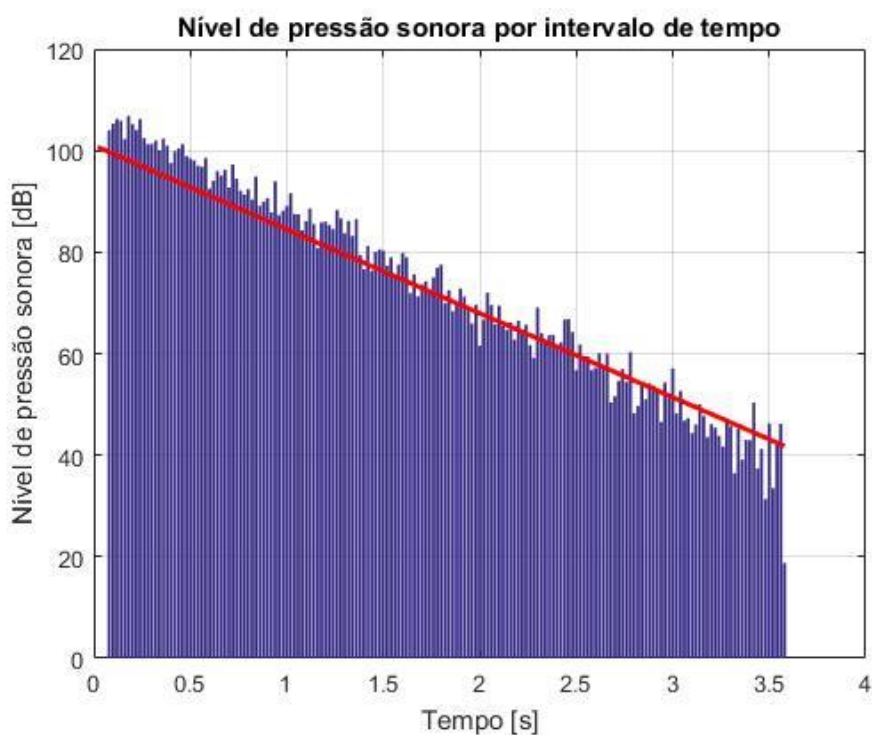
B.13 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 3 em sua primeira combinação de fonte e receptor



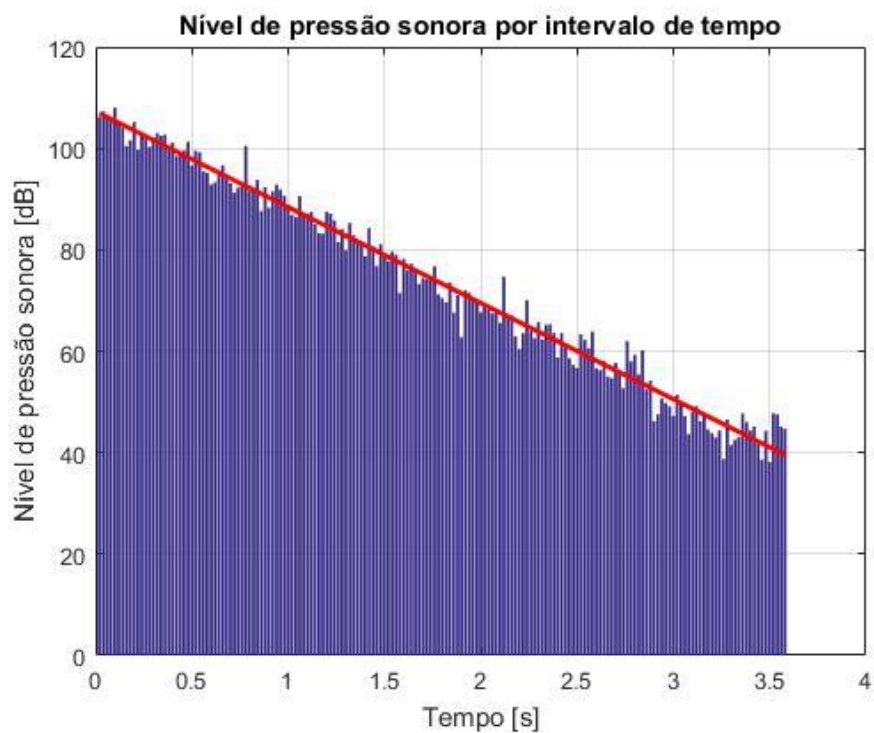
B.14 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 3 em sua segunda combinação de fonte e receptor



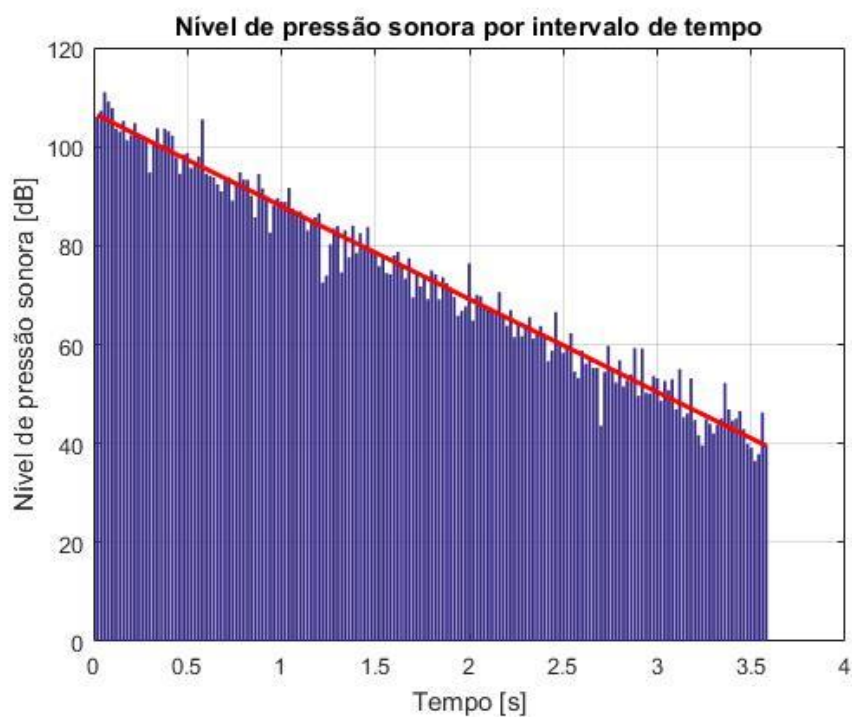
B.15 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 3 em sua terceira combinação de fonte e receptor



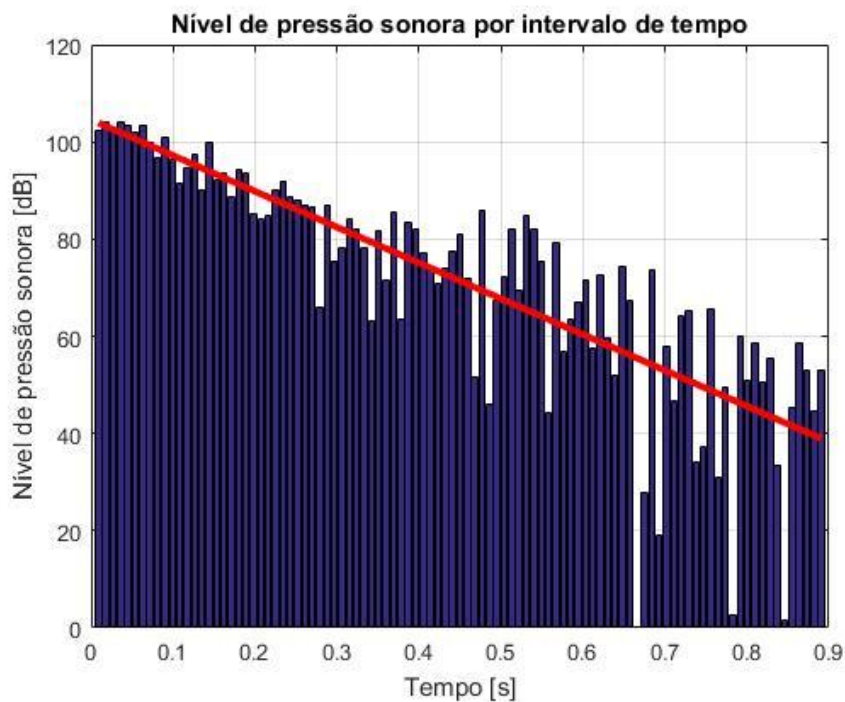
B.16 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 3 em sua quarta combinação de fonte e receptor



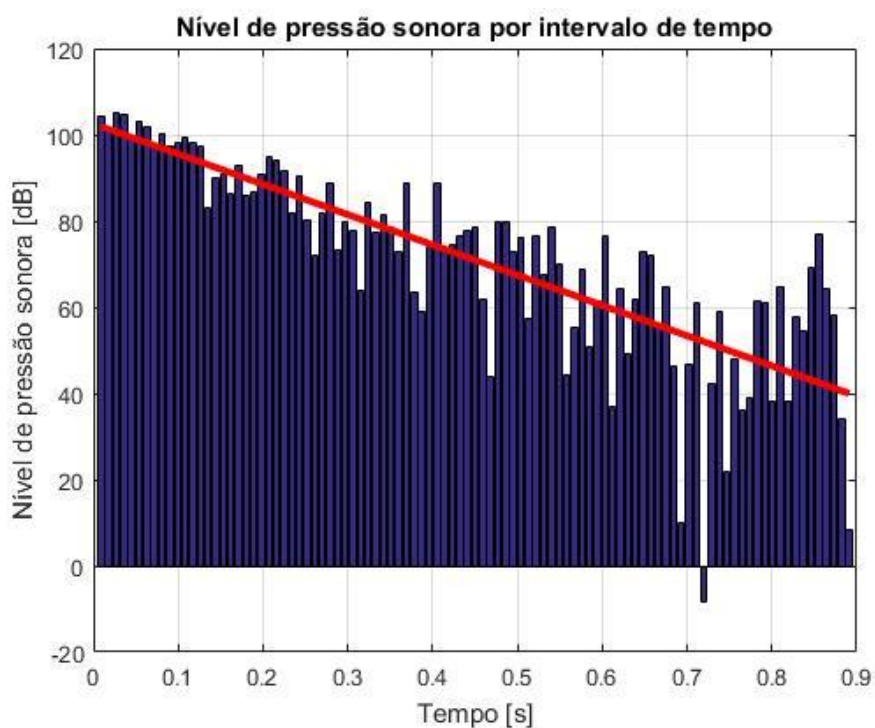
B.17 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 3 em sua quinta combinação de fonte e receptor



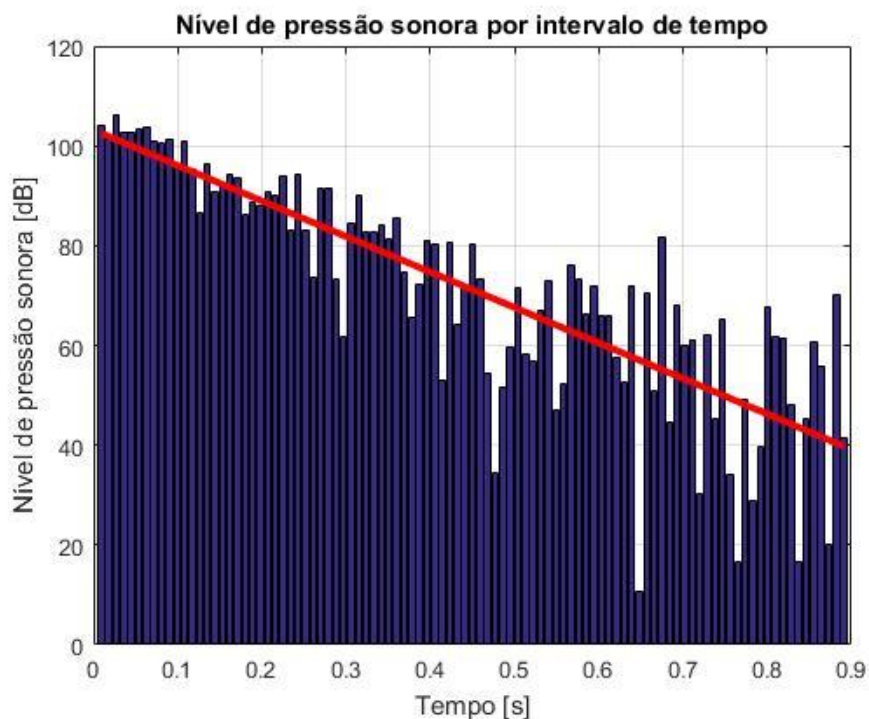
B.18 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 3 em sua sexta combinação de fonte e receptor



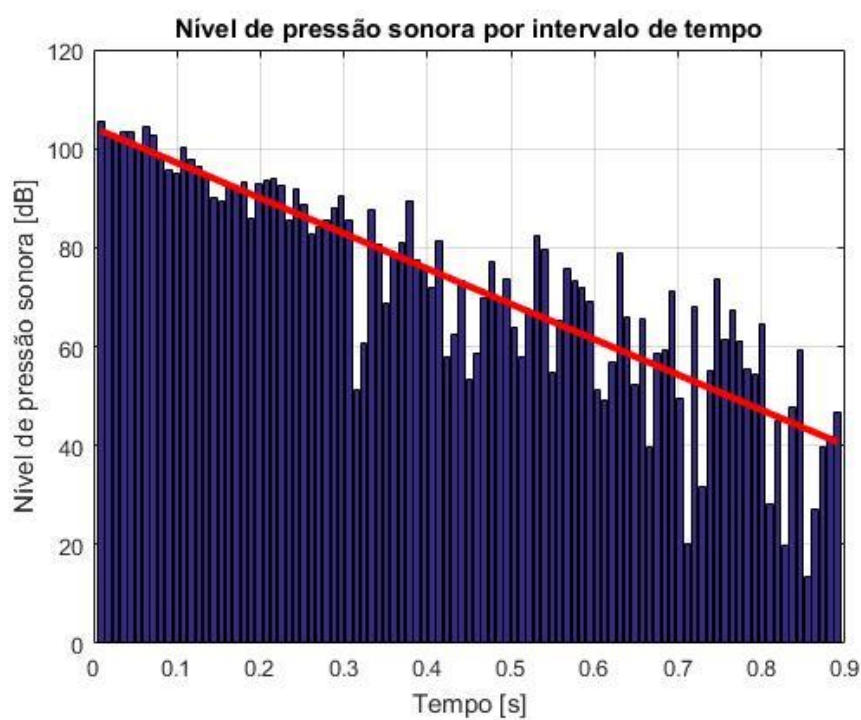
B.19 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1, com material de absorção, em sua primeira combinação de fonte e receptor



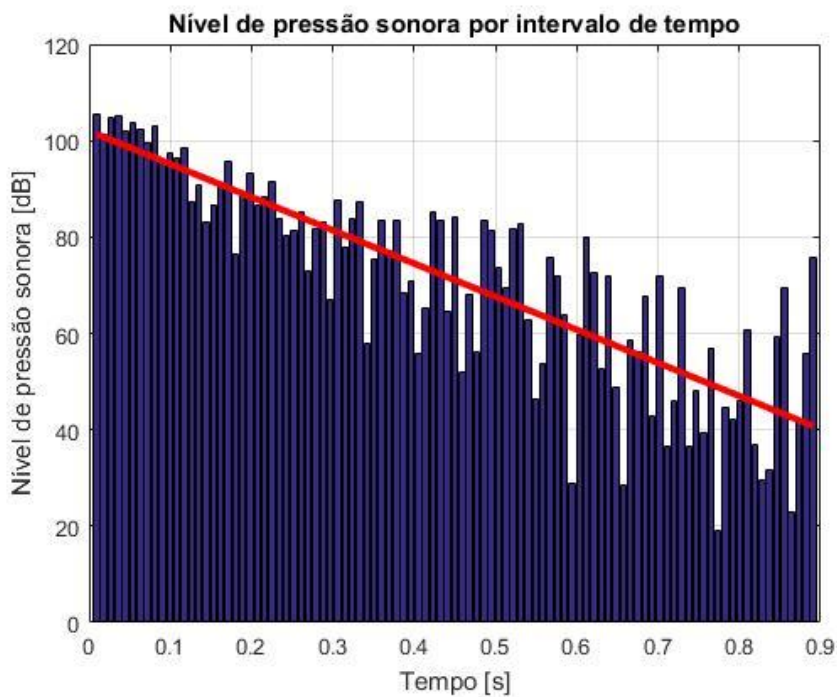
B.20 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1, com material de absorção, em sua segunda combinação de fonte e receptor



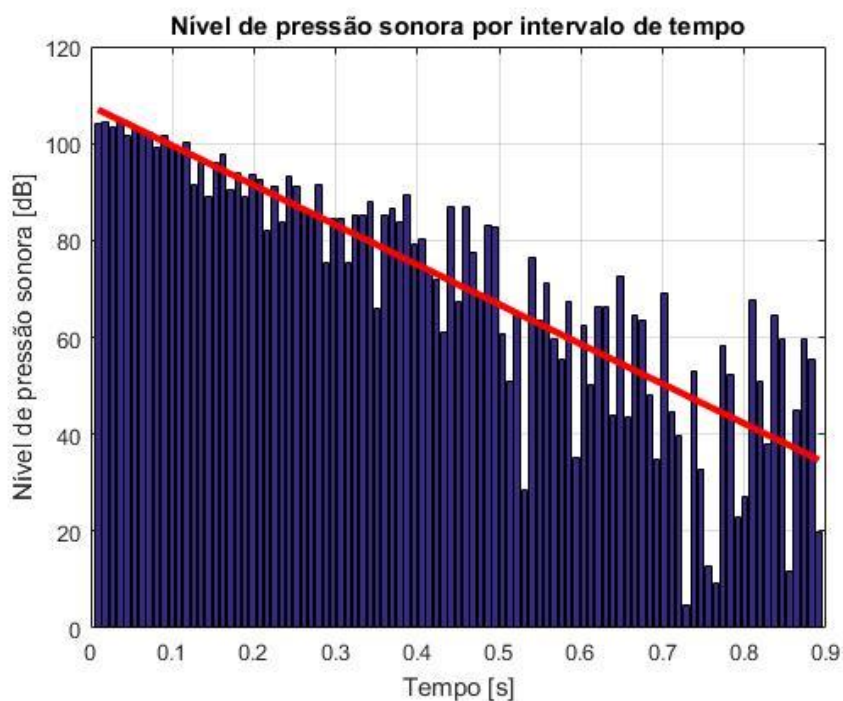
B.21 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1, com material de absorção, em sua terceira combinação de fonte e receptor



B.22 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1, com material de absorção, em sua quarta combinação de fonte e receptor



B.23 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1, com material de absorção, em sua quinta combinação de fonte e receptor



B.24 – Gráfico de barras (azul) e regressão linear (vermelho) do nível de pressão sonora em cada intervalo de tempo, para sala 1, com material de absorção, em sua sexta combinação de fonte e receptor

APÊNDICE C



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO



PLANO DE TRABALHO DO PROJETO FINAL

Título: **Acústica de Salas via Técnica Geométrica dos Raios Acústicos**

Dados	Henrique Gebran Silva		
Nº de Matrícula	201301590		
Telefones	(62) 9 8141-8811		
E-mail	henriquegebransilva@hotmail.com		
Orientador(a):	Marlipe Garcia Fagundes Neto		
Curso:	Eng. Elétrica ()	Eng. de Computação ()	Eng. Mecânica (x)
Certif. Estudos	Não (x) Sim ()		

Resumo

A qualidade acústica de um ambiente fechado é essencial para que o ambiente seja saudável e permita desenvolver as atividades para as quais é projetado, isto é, a acústica de uma sala de aula é diferente de uma sala de estudo ou uma sala de tv, por exemplo. Diante disso, existem vários estudos previsionais da qualidade acústica de um ambiente a fim de enquadrá-los nas características desejáveis, bem como identificar e corrigir problemas na fase de projeto, evitando custos maiores de modificação dos ambientes quando já construídos. Dentre as técnicas da acústica geométrica, a metodologia dos raios acústicos permite realizar o estudo previsional do campo sonoro e analisar a qualidade acústica do ambiente, no entanto os vários programas computacionais disponíveis no mercado são pagos ou restritos em uma única frequência de simulação. Assim, objetiva-se desenvolver um código computacional do método dos raios acústicos e aplicá-lo no estudo da qualidade acústica de uma sala de aula da UFG.

I. Objetivos

Os objetivos macros deste projeto são:

- Capacitar o aluno a analisar a qualidade acústica de um ambiente fechado;
- Desenvolver um programa para análise acústica via raios acústicos.

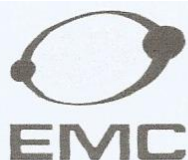
Os objetivos específicos do presente projeto são:

- Compreender o estado da arte da acústica de ambientes fechados;
- Estudar a técnica dos raios acústicos;
- Simular e analisar a acústica de um ambiente fechado com os raios acústicos.

II. Metodologia

A metodologia utilizada neste projeto será:

- Revisão bibliográfica sobre acústica de ambiente fechado;
- Principais característica da acústica geométrica e raios acústicos;
- Algoritmo e implementação do raio acústico;
- Simulação e validação;
- Análise dos resultados;
- Redação do trabalho final de curso.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO



Cronograma.

O cronograma das atividades a serem realizadas é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Cronograma das atividades.

Etapas do Projeto	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL
1) Revisão bibliográfica sobre acústica de ambiente fechado	X				
2) Principais característica da acústica geométrica e raios acústicos		X			
3) Algoritmo e implementação do raio acústico		X	X		
4) Simulação e validação			X	X	
5) Análise dos resultados				X	
6) Redação do trabalho final de curso				X	X

Goiânia, 20 de fevereiro de 2019.

Henrique Gebram Silva
Assinatura do aluno
Matrícula: 201301590

Marlize S.F. Neto
Assinatura do(a) Prof.(a) Orientador(a):