



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

ALDO CEZAR BITTENCOURT GUIMARÃES



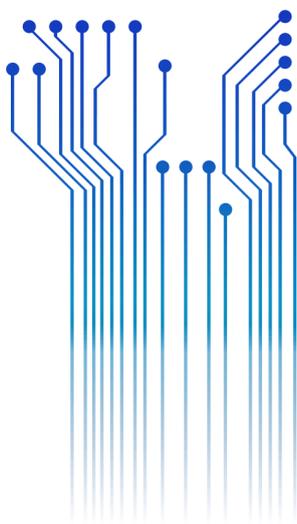
Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Utilização de absorvedores de membrana e adequação dos
parâmetros acústicos em auditórios.



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2017

ALDO CEZAR BITTENCOURT GUIMARÃES

Utilização de absorvedores de membrana e adequação dos parâmetros acústicos em auditórios.

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Acústica arquitetônica

Orientador:

Professor Edmar Candeia Gurjão, D. Sc.

Campina Grande
2017

ALDO CEZAR BITTENCOURT GUIMARÃES

Utilização de absorvedores de membrana para adequação dos parâmetros acústicos em auditórios.

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Acústica Arquitetônica.

Aprovado em / /

Avaliador

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande

Professor Edmar Candeia Gurjão, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a Deus, que certamente esteve presente durante toda a minha vida, e também à minha família que sempre me apoiou independentemente da situação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que participaram de forma direta ou indireta para o meu contínuo aprendizado.

Em especial gostaria de agradecer à minha família, minha mãe, Stela Maria Bittencourt Guimarães, que apesar das incertezas que a vida nos proporcionou sempre esteve ao meu lado prestando o seu enorme apoio em minhas decisões. Meu pai, Aldo Cezar Costa Guimarães, que apesar de todas as dificuldades e saudade de ter um filho morando longe de casa pôde com muito amor e dedicação contorná-las e assim tornar a minha experiência acadêmica a mais prazerosa possível. Aos meus irmãos, Julia e Victor que sempre entenderam as minhas dificuldades e fizeram de tudo para minimizá-las.

Não poderia deixar de enfatizar também os meus sinceros agradecimentos aos meus colegas de curso que com muita paciência e companheirismo puderam tornar os meus dias durante toda essa jornada mais agradáveis e alegres.

Ao professor Edmar Gurjão, que sempre esteve disposto a me ajudar e aconselhar durante este trabalho.

Aos funcionários da UFCG, em especial ao Departamento de Engenharia Elétrica pela presteza e carinho dedicados aos alunos.

Por último, expressei meus profundos agradecimentos à minha namorada Mariana Ávila que fez questão de participar e vivenciar cada momento da minha vida acadêmica, e compartilhar comigo momentos de tristeza e alegria.

“A dor é passageira, a honra é eterna”

Major Schmidt.

RESUMO

Este trabalho faz o levantamento dos principais parâmetros acústicos, tempo de reverberação (RT), tempo de decaimento inicial (EDT) de três auditórios localizados no Campus de Campina Grande da UFCG. Auditório do Bloco-CJ, Auditório do DEE e Auditório do Bloco-CG. Utilizando os dados adquiridos nas medições. Após a análise dos dados obtidos foi sugerido a utilização de absorvedores de membrana como forma de melhorar os modos acústicos dos auditórios.

Palavras-chave: acústica arquitetônica, conforto acústico, auditórios, absorvedores de membrana.

ABSTRACT

This work compares the main acoustic parameters, reverberation time (RT), initial decay time (EDT) of three auditoriums located at the Campina Grande Campus of the UFCG. Auditorium of the Bloco-CJ, Auditorium of the DEE and Auditorium of the Bloco-CG. After the analysis of the obtained data it was suggested the use of membrane absorbers as a way to improve the acoustic modes of the auditoriums.

Key words: architectural acoustics, acoustic comfort, auditoriums, membrane absorber.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tubo infinito com um pistão em uma das extremidades oscilando em movimento harmônico simples.....	17
Figura 2- Escala de Decibéis	18
Figura 3 - Contribuição da absorção, reflexão especular e reflexão difusa.	19
Figura 4 - Região periférica Sistema Auditivo Humano (SAH).....	22
Figura 5 - Cóclea	23
Figura 6 - Contorno subjetivo da sensação auditiva por Robinson e Dadson.....	24
Figura 7 - Regiões de análise modelo estático e modelo normal.....	26
Figura 8 - Número de modos acústicos vs. frequência em duas salas de volume similar (note que as escalas são diferentes)	28
Figura 9 - Diagrama de um sistema Linear Invariante ao Tempo	28
Figura 10 - O som direto e suas reflexões em uma sala	29
Figura 11 - Resposta ao impulso de uma sala.....	30
Figura 12 - Taxa de acerto em percentual em relação ao sinal-ruído.	32
Figura 13 - Densidade de energia (em escala logarítmica) em função do tempo	33
Figura 14 - Tempo de reverberação sugerido para salas de acordo com seu volume e finalidade.	35
Figura 15 - Exemplo de absorvedor acústico.	37
Figura 16 - Absorvedor de membrana	38
Figura 17 - Reflexão de uma onda cilíndrica em uma superfície perfeitamente plana usando modelo FDTD (Finite Difference Time Domain). Os números indicam a ordem dos instantes em que se captou a imagem.	40
Figura 18 - Reflexão de uma onda cilíndrica em um difusor de Schroeder calculada usando o modelo FDTD.	42
Figura 19 - Dispersão espacial e temporal gerada por um difusor Schroeder	42
Figura 20 - Formas de distribuição de plateia em um auditório: área relativa ocupada e distância média relativa	44
Figura 21 - Especificações, resposta espacial e resposta em frequência do microfone Behringer ECM8000.	46
Figura 22 - Microfone inserido no tripé e conectado à interface de áudio durante medições	47
Figura 23 - Falante utilizado no experimento.....	47
Figura 24 - Interface de áudio Behringer UMC22 utilizada no experimento.	48
Figura 25 - Auditório Bloco-CJ.....	50
Figura 26 - Auditório do DEE.....	51
Figura 27 - Auditório Bloco-CG	52
Figura 28 - Fonte sonora no formato Dodecaedro.	54
Figura 29 - Esquema do arranjo dos equipamentos durante as medições.....	55
Figura 30 - Arranjo durante as medições.....	55
Figura 31 - Posicionamento medições Auditório Bloco-CJ	56
Figura 32 - Posicionamento medições Auditório CEEI.....	57
Figura 33 - Posicionamento medições Auditório Bloco-CG	58
Figura 34 – Resultado obtido representado com base no sugerido pela Figura 14.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - T30	60
Tabela 2 - T20	60
Tabela 3 - EDT	61
Tabela 4 - T30	61
Tabela 5 - T20	62
Tabela 6 - EDT	62
Tabela 7 - T30	63
Tabela 8 - T20	63
Tabela 9 - EDT	64

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Ilustrações	ix
Lista de Tabelas	ix
Sumário	xi
1 Introdução	13
1.1 Motivação	13
1.2 Objetivo	14
1.3 Metodologia	14
1.4 Estrutura do trabalho	14
2 O Som	16
2.1 Velocidade do som	16
2.2 Pressão Sonora	17
2.3 Fenômeno sonoro em superfícies	19
2.3.1 Absorção	19
2.3.2 Reflexão Especular	21
2.3.3 Reflexão Difusa	21
3 Sistema Auditivo Humano	21
3.1 Região Periférica	22
3.2 Cóclea	22
3.3 Intensidade subjetiva	23
3.4 Mascaramento Sonoro	24
4 Acústica Arquitetônica	25
4.1 Dimensionamento de Sala	25
4.1.1 Modos acústicos	27
4.2 Resposta ao Impulso	28
4.2.1 Varredura do Seno	30
4.3 Inteligibilidade da fala (IF)	31
4.4 Parâmetros Acústico	32
4.4.1 Tempo de Reverberação (RT)	33
4.4.2 <i>Early Decay Time</i> (EDT)	35
4.4.3 Clareza (C)	36
4.5 Materiais Acústicos	36
4.5.1 Absorvedores	37
4.5.2 Difusores	40

4.6	Acústica de auditórios.....	43
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL		45
5	Materiais Utilizados.....	46
5.1	Microfone.....	46
5.2	Falantes	47
5.3	Software utilizado	48
5.4	Interface de áudio.....	48
6	Descrição dos Ambientes em estudo	49
6.1	Auditório do bloco-CJ.....	49
6.2	Auditório do CEEI	50
6.3	Auditório do Bloco-CG.....	51
7	Medição.....	53
7.1	Norma ISO 3382.....	53
7.2	Montagem dos equipamentos.....	54
7.3	Posicionamento das medições.....	56
RESULTADOS		59
7.4	Parâmetros acústicos medidos	60
7.4.1	Auditório Bloco-CJ.....	60
7.4.2	Auditório DEE.....	61
7.4.3	Auditório Bloco-CG	63
7.5	Análise dos Resultados	64
7.5.1	Auditório Bloco-CJ.....	65
7.5.2	Auditório do DEE.....	67
7.5.3	Auditório do Bloco-CG	67
8	Conclusão	69
Referências		70

1 INTRODUÇÃO

Historiadores comprovam que desde o período romano (650 antes de cristo – 400 depois de cristo) já havia uma preocupação com o comportamento do som em locais destinados a eventos de entretenimento para militares e políticos. No entanto, só no século XX, Wallace Clement Sabine deu início ao estudo da acústica de salas com uma visão mais formal, deixando para trás conceitos subjetivos e substituindo-o por parâmetros físicos inerentes à própria sala (LONG, M., 2006).

As salas podem ser modeladas como sistemas lineares invariantes no tempo (LIT) onde as características de transmissão acústica entre um par fonte-receptor são descritas pela resposta impulsiva (RI) da sala. O conceito de RI é hoje em dia largamente aceito como um modelo físico-matemático do comportamento de um sistema LIT (Sarris, J.C, 2003) caracterizado por apenas uma entrada e uma saída.

A obtenção da RI de uma sala torna possível calcular uma série de parâmetros acústicos que tem a função de quantificar a qualidade acústica do ambiente. Tal caracterização é de extrema importância para locais onde se deseja torná-lo acusticamente mais agradável, para qualquer que seja a finalidade, reprodução musical, gravação, mixagem de áudio ou reprodução da voz humana.

1.1 MOTIVAÇÃO

As impressões que são tiradas de um auditório quando no primeiro contato são na sua grande maioria a respeito da questão estética, acabamento dos materiais ali inseridos ou se os equipamentos para reprodução de mídias são da nova geração, mas inerentemente nada pode se observar quanto ao conforto acústica da sala. Mas isso não torna a importância de uma boa representação sonora no interior de uma sala menos importante, na verdade, um dos maiores propósitos de um auditório é passar informação tanto visual quanto sonora de forma clara e precisa, para isso, é imprescindível um estudo acústico desse tipo de ambiente. Pessoas que têm a chance de vivenciar a experiência de assistir à uma palestra ou à uma aula ministrada em um ambiente devidamente projetado tem

maiores chances de entender com clareza o que está sendo passado e conseqüentemente ter a aprendizagem facilitada.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivos:

- 1- Medir os parâmetros acústicos (T20, T30, EDT) de três auditórios da Universidade Federal De Campina Grande no Campus de Campina Grande e
- 2- Utilizando os resultados experimentalmente obtidos, sugerir utilização de materiais acústicos e um projeto de absorvedores de membrana como forma de melhoramento dos parâmetros, caso necessário,

1.3 METODOLOGIA

Inicialmente foi feito um estudo abrangendo diversos assuntos sobre o tema como forma de adquirir o maior embasamento teórico.

Após a revisão bibliográfica procurou-se um software que tornasse possível e precisa as medições dos parâmetros acústicos. Um *toolbox* (*ITA-TOOLBOX*) para o MatLAB® desenvolvido pelo Instituto de Acústica Técnica na Universidade de Aachen na Alemanha foi o *software* que melhor atendeu às necessidades deste trabalho, e após dedicar algum tempo lendo e praticando algumas atividades com este pacote de código aberto foi possível realizar as medições dos parâmetros acústicos nos auditórios aqui estudados.

Já com os dados das medições disponíveis foi feito um projeto de absorvedores de membrana e sugestões de outros dispositivos acústicos como forma de melhorar a acústica local.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em três partes:

- 1- Fundamentação Teórica: Etapa onde os conceitos básicos tanto do funcionamento do Sistema Auditivo Humano (SAH) como os do som e acústica arquitetônica são explorados.
- 2- Procedimentos Experimentais: Onde são detalhados os materiais utilizados e o procedimento adotado para realização do experimento e também é feita uma análise qualitativa dos auditórios estudados.
- 3- Análise de resultado: Etapa onde é feita a análise dos resultados de forma quantitativa. Fazendo sempre comparações com o que é encontrado em normas nacionais e internacionais. Feita sugestão de melhoramento para a sala.

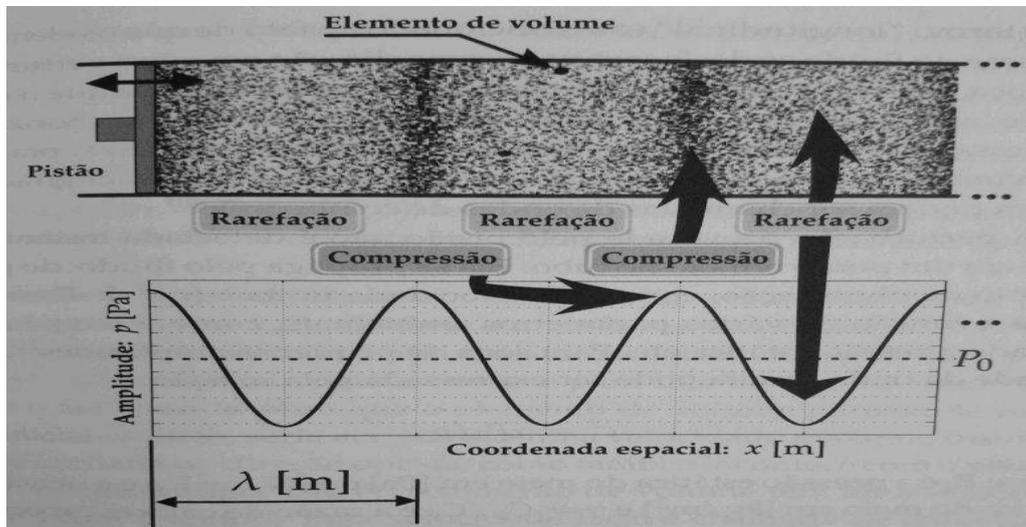
2 O SOM

O som é simultaneamente um evento físico e uma representação psicofísica. É um evento físico porque decorre de uma perturbação física que se aplica e se propaga na forma de energia mecânica através de um meio sólido, líquido ou gasoso. É também uma representação psicofísica porque, referindo-se ao comportamento do sistema auditivo de um animal, traduz a interpretação psicológica dada ao estímulo físico captado e processado pelo órgão auditivo. O som é assim todo o evento físico que dá origem a uma representação psicofísica: a sensação auditiva (PEREIRA, F., 2009).

2.1 VELOCIDADE DO SOM

Em um fluido a propagação de uma onda sonora dá-se longitudinalmente, ou seja, a direção com que a onda se propaga é paralela ao movimento induzido nas partículas do meio. A velocidade de propagação da onda mecânica depende da densidade média do fluido no qual o som se propaga (FAHY, F., 2001). É possível observar esse comportamento de forma mais ilustrativa na Figura 1.

Figura 1 - Tubo infinito com um pistão em uma das extremidades oscilando em movimento harmônico simples.



Fonte:(BRANDÃO, E., 2016)

A velocidade de propagação da onda é diretamente proporcional à densidade[kg/m^3] do meio (FAHY, F., 2001) sendo de aproximadamente 343m/s a velocidade no ar, 1.500m/s na água.

2.2 PRESSÃO SONORA

É um dos parâmetros acústicos mais relevantes uma vez que nosso sistema auditivo é bastante sensível as suas variações e também pela facilidade de medi-lo. O seu valor medido instantâneo não é uma medida relevante, mas sim o seu valor médio que é dado em Pascoal como segue.

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} p^2(t) dt} \quad [Pa] \quad (2.1)$$

Em que:

$p(t)$ – Pressão sonora instantânea;

T - Período;

t_1 - Período de integração.

Entretanto, nosso sistema auditivo percebe os estímulos de forma aproximadamente logarítmica e por isso é mais usual representarmos o nível de pressão sonora em dB SPL. A representação em decibel é uma escala logarítmica obtida a partir da razão de um valor com uma referência

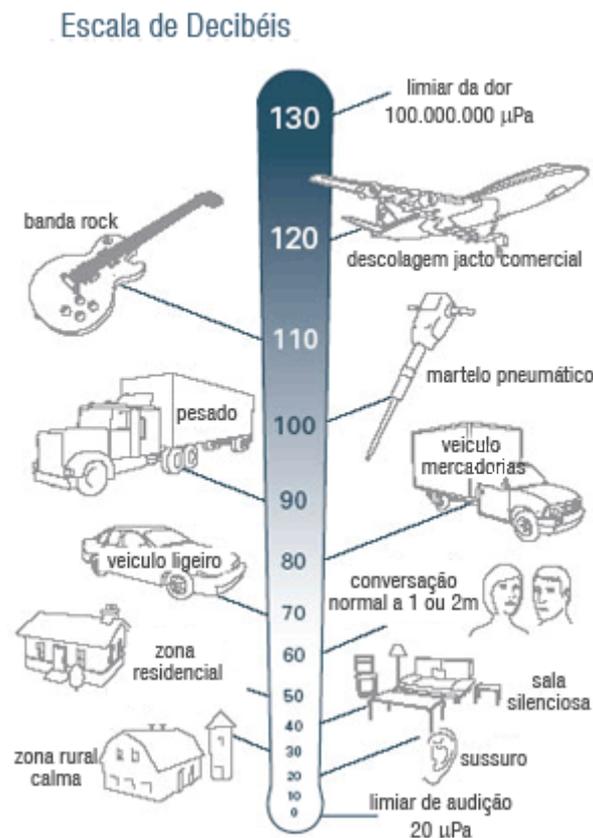
$$dB = 10 \log\left(\frac{\text{variável}}{\text{valor de referência}}\right) \quad (2.2)$$

Sendo o valor de referência, $p_{ref,rms}$ igual à 2.10^{-5} Pa correspondente à variação de pressão mínima que conseguimos escutar (BRANDÃO, E., 2016). Dessa forma, o nível de pressão sonora é dado por

$$L_p = 20 \log_{10}\left(\frac{p_{rms}}{p_{ref,rms}}\right)[dB SPL] \quad (2.3)$$

Na Figura 2 é possível observar o nível de pressão sonora de alguns tipos de ruídos.

Figura 2- Escala de Decibéis

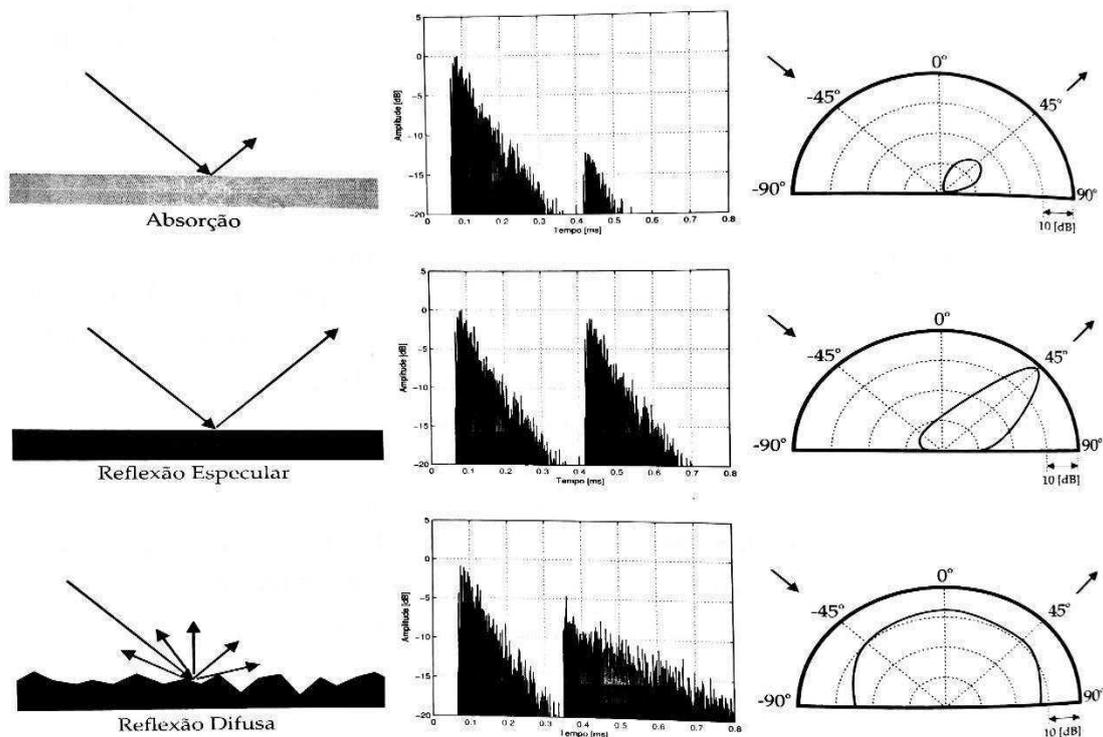


Fonte: www.explicatorium.com, acesso em: 25/04/17

2.3 FENÔMENO SONORO EM SUPERFÍCIES

As ondas sonoras estão sempre de encontro com diversos tipos de superfícies dentro de um ambiente (p. ex., dispositivos absorvedores, difusores, pilastras, paredes, pessoas etc.) e essas superfícies interferem na onda sonora que as atinge e conseqüentemente compõem a resposta acústica do ambiente. Três fenômenos ocorrem quando uma frente sonora atinge uma superfície: absorção, reflexão especular e reflexão difusa (BRANDÃO, E., 2016), ilustrados na Figura 3.

Figura 3 - Contribuição da absorção, reflexão especular e reflexão difusa.



Fonte: (BRANDÃO, E., 2016)

2.3.1 ABSORÇÃO

A superfície absorve parte da energia incidente e reflete parte da energia de forma especular. Como existe absorção, a energia do raio refletido é menor que a energia do raio incidente. Isso se expressa na resposta temporal com o som incidente tendo uma amplitude maior que o som refletido, sendo ambos um pico no domínio do tempo, espaçados por um intervalo de tempo t_0 [S] (o tempo que a onda sonora leva para se propagar do receptor à superfície e voltar (Brandão E., 2016).

2.3.2 REFLEXÃO ESPECULAR

A reflexão especular é similar à absorção, mas nesse caso a energia acústica do raio refletido é similar a energia acústica do raio incidente. Isso se expressa na resposta temporal pelo som direto, tendo quase a mesma amplitude do som refletido.

2.3.3 REFLEXÃO DIFUSA

Já no caso da reflexão difusa não há absorção, mas a energia sonora do raio refletido é distribuída no espaço. Para que haja conservação da energia, a soma das energias dos raios distribuídos no espaço deve ser igual à energia do raio incidente (para absorção nula). No domínio do tempo, isso, muitas vezes, pode ser expresso por uma distribuição temporal (alongamento) do pico da reflexão especular, ou seja, a energia do raio refletido tende a ser temporalmente espalhada em algum grau (Brandão E., 2016).

3 SISTEMA AUDITIVO HUMANO

A experiência da audição é bastante subjetiva, dependente de fatores como a vivência do indivíduo, das memórias e de seu perfil psicológico. O sentido da audição pode, portanto, ser estudado e caracterizado de diferentes perspectivas, em função da área em que se pretenda situar o seu impacto (PEREIRA, F., 2009). Neste trabalho de conclusão de curso pretende-se caracterizar o sentido da audição quanto a forma como processa a informação acústica que atinge as aurículas. Desta forma, o sistema auditivo humano, SAH, pode ser dividido em duas partes: região periférica e região central. A região periférica é responsável pela conversão de energia acústica em informações neuronal, onde posteriormente é interpretada pela região central.

3.1 REGIÃO PERIFÉRICA

Dentro da região periférica destacam-se três sub-regiões: o ouvido externo, ouvido médio e o ouvido interno. A primeira inclui o pavilhão auricular (orelha) e o canal auditivo que captam e conduzem as ondas sonoras até o tímpano, colocando-o em oscilação. O tímpano por sua vez transmite a energia mecânica através de três ossículos (martelo, bigorna, estribo). O conjunto de todas essas estruturas possuem uma frequência de ressonância próximo aos 3kHz, o que explica o ser humano possuir uma maior sensibilidade auditiva para essa faixa de frequência sonora. (PEREIRA, F., 2009)

Figura 4 - Região periférica Sistema Auditivo Humano (SAH).



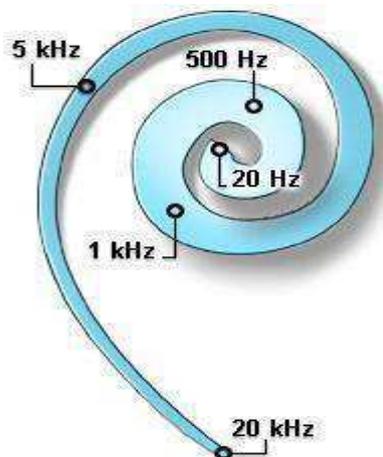
Fonte: www.mdsaude.com, acesso em: 25/04/17

3.2 CÓCLEA

A cóclea é uma estrutura rígida (óssea), localizada no ouvido interno e com um formato de caracol. O aspecto interessante sobre essa estrutura é o fato de ser nela que ocorre a análise ou decomposição espectral do sinal sonoro, o que explica em grande parte a capacidade do SAH em interpretar e discriminar sons. É na cóclea que de fato ocorre a conversão de energia mecânica em impulsos nervosos, e este fenômeno ocorre devido a presença de milhares de células ciliadas distribuídas ao longo de uma membrana flexível. Devido também a sua geometria, essa estrutura possui características mecânicas de

ressonância que variam ao longo do seu comprimento, o que permite a sua atuação como um analisador espectral. Uma ilustração de como é a cóclea pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Cóclea

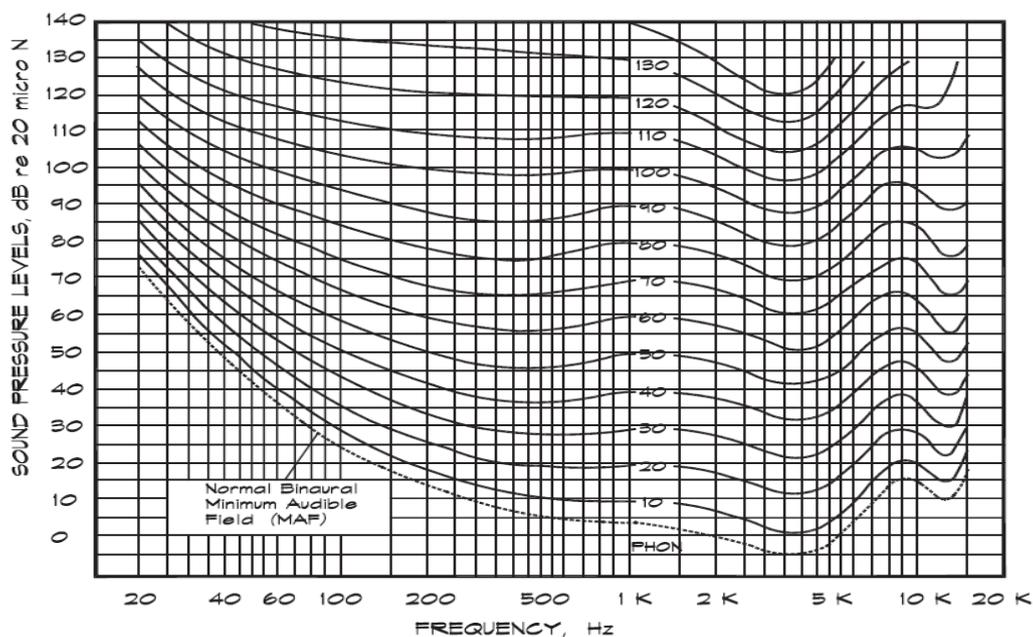


Fonte: www.cochlea.eu, acesso em: 23/04/17

3.3 INTENSIDADE SUBJETIVA

Diferentemente de um dispositivo de captação de áudio que pode ser projetado e fabricado para ter um mesmo ganho para diferentes frequências, o SAH não funciona desta forma. Quando dizemos que um determinado som está com um volume maior que outro, na verdade é a sensação sonora que está maior naquela determinada frequência, e isso não deve ser confundido com o real nível de pressão sonora. Foi pensando nisso que os cientistas Fletcher e Munson em 1933 decidiram fazer experimentos com pessoas e montar uma curva de idêntica intensidade sonora (*equal-loudness contours*) (LONG, M., 2006), o procedimento consistiu em submeter os ouvintes à um tom de 1000Hz a uma intensidade sonora fixa de 10db e compará-lo subjetivamente à sensação de volume sonoro com outros tons de 20Hz a 20kHz e com amplitude variando de 0 a 120db. Em 1956, depois de alguns avanços tecnológicos, Robinson e Dadson repetiram o experimento de Fletcher e Munson. O resultado obtido por eles pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Contorno subjetivo da sensação auditiva por Robinson e Dadson.



Fonte: (MARSHAL, L., 2006)

O que pode ser lido da Figura 6, por exemplo, é que para um indivíduo ter a mesma sensação de volume sonoro que um tom puro de 3kHz a 0 dB este deverá ser submetido a um tom puro de 500 Hz a 10 dB .

3.4 MASCARAMENTO SONORO

O mascaramento sonoro é o efeito no qual um som audível mais fraco se torna inaudível quando um sinal sonoro mais forte ocorre simultaneamente. O mascaramento depende também do espectro em frequência dos dois sinais e suas variações no tempo (KAHRS & BRANDENBURG, 2002). Esse foi o grande trunfo dos padrões de áudio MP3, que consistem em eliminar as informações sonora mascaradas, reduzindo assim significativamente o tamanho dos arquivos de áudio. O fenômeno do mascaramento não é uma característica da onda mecânica (som) mas sim da fisiologia auditiva do corpo humano, e por esse motivo suas medições são sempre subjetivas, levando em consideração as diferenças auditivas de cada indivíduo.

4 ACÚSTICA ARQUITETÔNICA

O projeto de acústica de salas é uma mistura entre teoria e prática e trata o problema de como o som se propaga em um ambiente. De fato, estamos interessados na apresentação tempo-espaço-frequência dos sinais sonoros que se propagam no interior de um ambiente, de forma que ele se torne acusticamente adequado ao seu uso principal (BRANDÃO, E., 2016). Como forma de reduzir a complexidade para a elaboração de um projeto acústico de uma sala foi elaborado conceitos, parâmetros e vocabulários, no entanto ainda se precisa de uma boa dose de intuição e gosto pessoal pois, mesmo com todas as definições, ainda há muito a ser compreendido e estudado no mundo da acústica (DUNN et al., 2105). Pesa também a questão do gosto pessoal, um projeto bem elaborado seguindo todas as normas pode agradar à maioria, mas não a todos.

Em geral, o projeto de uma sala, segue-se a seguinte ordem de etapas:

1. Projeto acústico inicial: depois de definida a finalidade acústica, trabalhar com arquiteto e engenheiro civil para definir as dimensões e formato da sala.
2. Simulação computacional da acústica da sala;
3. Simulação física em escala reduzida (uso de maquete);
4. Medições na obra acabada;
5. Aplicação de medidas corretivas

4.1 DIMENSIONAMENTO DE SALA

Escolher as dimensões da sala deve ser o primeiro cuidado em um projeto acústicos. O comportamento do som em uma sala pode ser dividido em 4 regiões, a depender do comprimento de onda em relação às dimensões da sala em estudo. Nesta seção será mostrado o estudo na região onde há a ocorrência de modos acústicos. Nesta região as ondas sonoras possuem a mesma densidade de energia em todos os pontos da sala, ou seja, existe a mesma probabilidade de que o som chegue de qualquer direção (LONG, M., 2006). Vale ressaltar que a preocupação na escolha do dimensionamento da

sala é relevante apenas para a análise de ondas sonoras de baixa frequência, abaixo da frequência de Schroeder.

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{TR}{V}} \quad (4.1)$$

Em que:

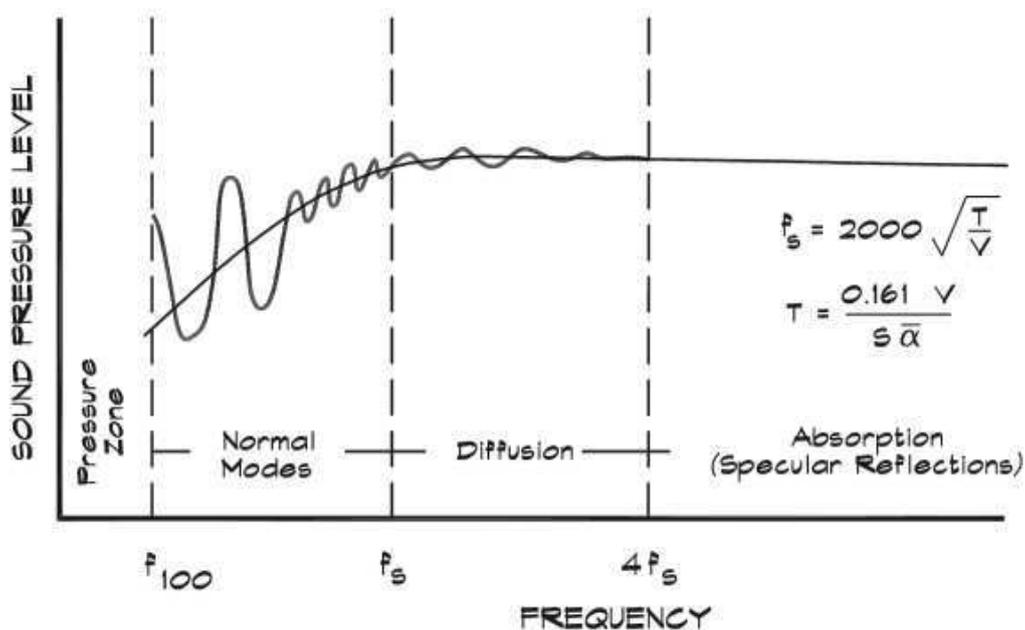
f_s – Frequência de Schroeder em Hertz [Hz]

TR – Tempo de reverberação da sala em segundos [s].

V – Volume da sala em metros cúbicos [m³].

A frequência de Schroeder permite dividir o comportamento acústico da sala em regiões. Analisando a Figura 7 pode-se observar a divisão do comportamento da sala em relação a frequência de Schroeder.

Figura 7 - Regiões de análise modelo estático e modelo normal



Fonte: (LONG, M., 2006).

O comportamento do som acima da frequência de Schroeder se assemelha ao comportamento de bolas de bilhar em uma mesa, colidindo diversas vezes com outras bolas e superfícies até cessar a energia, é onde se utiliza dos aparatos acústicos que serão citados na seção 4.5 para controlar o comportamento sonoro. Já na região logo abaixo da frequência de Schroeder é a região conhecida como ondulatória, onde o comportamento sonoro é como um ressoador, podendo a energia das ondas de somarem ou se subtraírem a depender do ponto em que se está captando a informação.

4.1.1 MODOS ACÚSTICOS

Devido à grande complexidade em se tratar de modos acústicos em salas não retangulares, apenas será abordado neste capítulo o estudo de modos acústico para salas retangulares. Considerando então uma sala com dimensões L_x, L_y e L_z , sendo L_x o lado de maior dimensão da sala e uma fonte sonora emitindo um som na frequência de f_0 , surge uma ressonância de primeira ordem na direção entre as duas paredes paralelas com distancia L_x dada por:

$$f_1 = \frac{c_0}{2L_x} \quad (4.2)$$

Onde c_0 é a velocidade do som.

Os demais modos como os tangenciais, envolvendo quatro paredes, e os modos oblíquos podem ser determinado como segue

$$f = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (4.3)$$

Sendo:

f , a frequência [Hz] do modo;

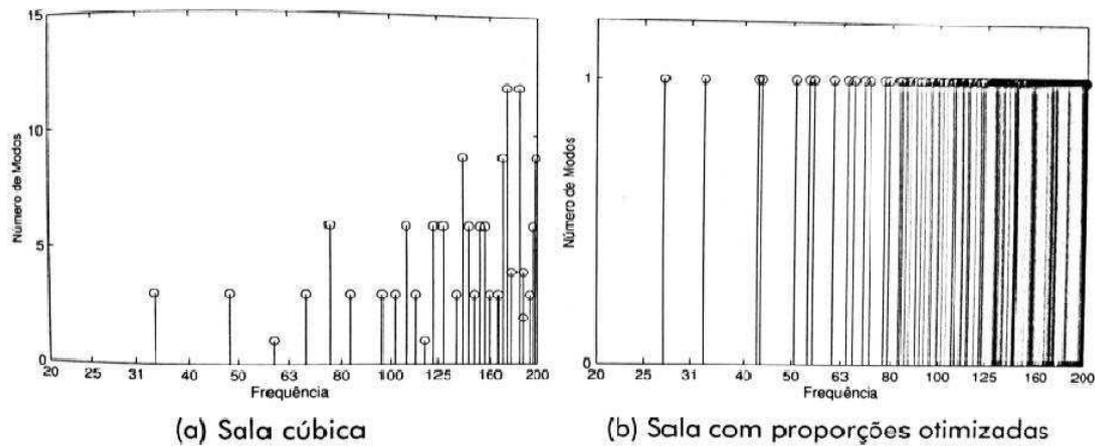
c_0 , a velocidade do som [m/s];

n_x, n_y e n_z , números naturais;

L_x, L_y e L_z , as dimensões [m] da sala.

No projeto de uma sala, o que se deseja é que a energia se distribua no espectro de forma mais uniforme possível. Em outras palavras, quer-se distribuir os modos acústicos concentrados nos espaços vazios entre os modos. Na Figura 8 pode-se notar a diferença do número de modos coincidentes para uma sala cúbica e uma sala com proporções otimizadas.

Figura 8 - Número de modos acústicos vs. frequência em duas salas de volume similar (note que as escalas são diferentes)

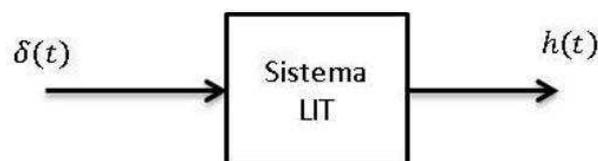


Fonte: (BRANDÃO, E., 2016).

4.2 RESPOSTA AO IMPULSO

Quando um sistema linear e invariante no tempo é estimulado por um impulso ideal, isto é, quando o sinal de entrada $x(t)$ for uma função delta de Dirac $\delta(t)$, o sinal de saída $y(t)$ é denominado a resposta impulsiva $h(t)$ do sistema, como pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Diagrama de um sistema Linear Invariante ao Tempo

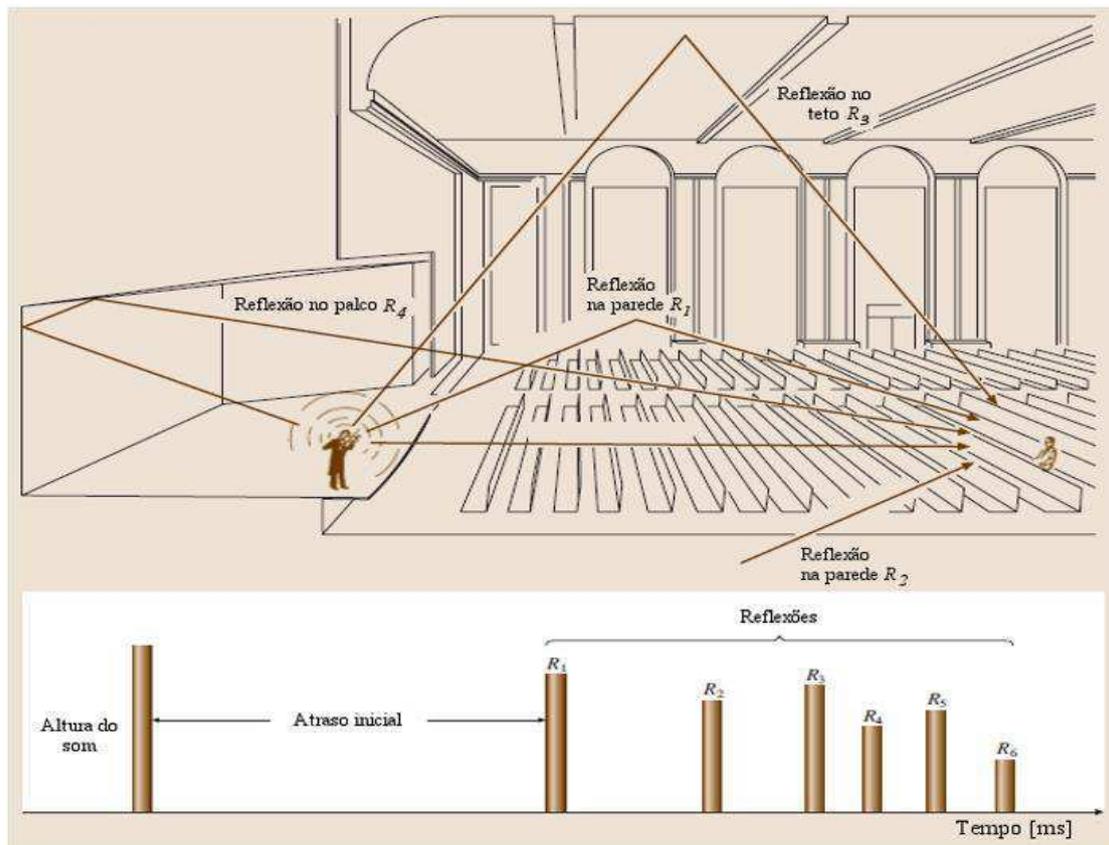


Fonte: Própria

Em outras palavras, pode-se extrair toda a informação sobre a acústica da sala se esta for excitada por um impulso sonoro e o som proveniente das diversas colisões nas superfícies do ambiente for captado e analisado (DUNN et al., 2015).

Dentro de uma sala o som que percebemos é uma soma proveniente da onda sonora que vem diretamente da fonte e daquelas que sofrem reflexão. Este fenômeno pode ser ilustrado como mostra a Figura 10.

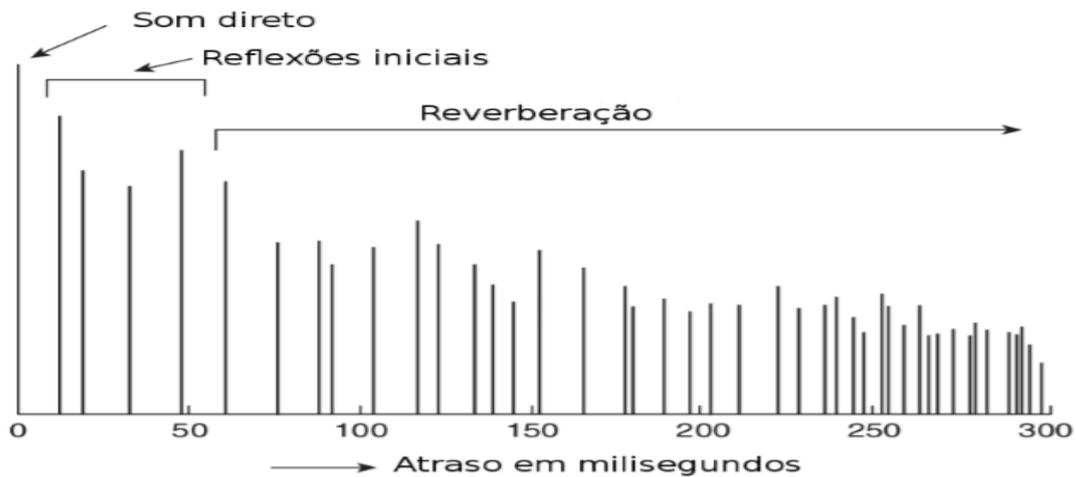
Figura 10 - O som direto e suas reflexões em uma sala



Fonte: (DUNN et al., 2015)

O som que sai da fonte em direção ao receptor sem receber qualquer tipo de reflexão é chamado de som direto e é aquele que chega primeiro aos ouvidos do receptor. Todos as demais ondas sonoras sofrem o efeito da reflexão e por isso chegam ao receptor com um certo atraso, como toda reflexão há perdas de energia, as ondas refletidas também são atenuadas. Este fenômeno fica mais evidente se observado a Figura 11.

Figura 11 - Resposta ao impulso de uma sala



Fonte: (EVEREST; POHLMANN, 2001).

4.2.1 VARREDURA DO SENO

Este método utiliza da varredura exponencial do seno como forma de excitação sonora da sala. Como uma das principais vantagens deste método, proporciona uma boa rejeição dos efeitos não lineares e apresenta uma melhor relação sinal ruído para baixas frequência frente ao método de varredura linear. Esta vantagem se deve ao fato de que no início do sinal a taxa de crescimento da frequência instantânea é pequena, o que permite que o sinal permaneça mais tempo nas frequências graves se comparado com uma varredura linear. Porém este método não é recomendada quando há presença de ruídos tonais e ruídos de impacto (GUIDORZI et al., 2015)

O sinal de excitação do ambiente deve variar sua frequência exponencialmente ao longo do tempo. O sinal pode ser expresso como segue:

$$s(t) = \text{sen}[\theta] = \text{sen} \left[\frac{t_{total}\omega_1}{\ln \frac{\omega_2}{\omega_1}} \times \left(\exp^{\frac{t}{L}} - 1 \right) \right] \quad (4.4)$$

Onde L é igual a

$$L = \frac{t_{total}}{\ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} \quad (4.5)$$

E ω_1 e ω_2 são respectivamente a frequência angular inicial e final da medição (20Hz à 20kHz) e t_{total} é a duração total da medição.

4.3 INTELIGIBILIDADE DA FALA (IF)

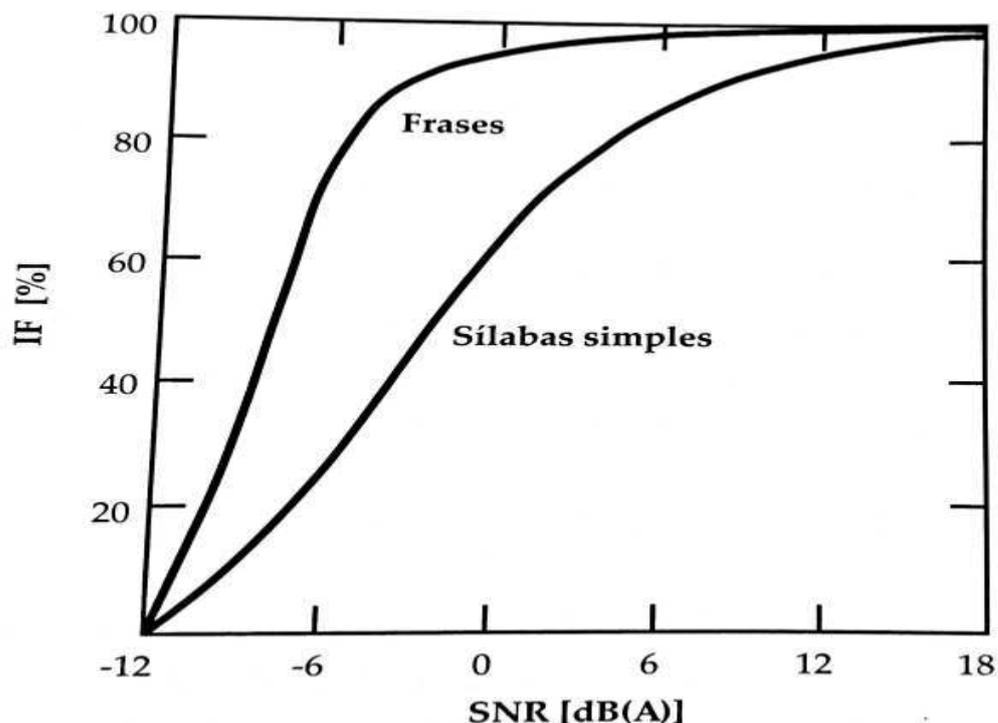
O critério de inteligibilidade de uma sala é avaliado pelo percentual de palavras acertadas por um ouvinte quando este é submetido a diversas tentativas de entendimento de frases, palavras e sílabas.

Quanto aos fatores que interferem na inteligibilidade da fala, há dois fatores predominantes:

- 1- A relação sinal-ruído (SNR) entre o nível de pressão sonora gerado pelo interlocutor no ambiente e o ruído de fundo presente no seu interior; e
- 2- A reverberação presente na sala.

O primeiro parâmetro a mensurar a inteligibilidade da fala surgiu de análises da diferença entre o Nível de Pressão Sonora (NPS_F) e o Nível de Pressão Sonora gerado pelo ruído de fundo presente no ambiente (NPS_R). De acordo com (KINSLER et al.), o parâmetro “*Speech Interference Level*” (SIL) é definido como a média aritmética do Nível de Pressão sonora gerado pelo ruído (NPS_R) nas quatro bandas de oitava de 500 [Hz] a 4 [kHz]. O SIL é, então, comparado ao Nível de Pressão Sonora gerado pela fala de um interlocutor (NPS_F) na sala estudada e uma relação sinal-ruído ($SNR = NPS_F - NPS_R$) pode ser obtida (BRANDÃO, E., 2016). Essa SNR, dada em [dB] ou [dB(A)], pode ser usada para calcular a IF esperada. Na Figura 12 pode-se observar um gráfico sugerido por (KINSLER et al., 1990) que relaciona o SNR e a IF.

Figura 12 - Taxa de acerto em percentual em relação ao sinal-ruído.



Fonte: (BRANDÃO, E., 2016)

Vale notar que a IF de sílabas simples é menor que a IF de frases completas. Isso acontece devido a capacidade dos seres humanos de extrair o significado pelo contexto que uma frase fornece, o que não acontece com sílabas ou vocabulários isolados. A IF para frases é de cerca de 95% e para sílabas isoladas de cerca de 60%, com SNR de 0 [dB(A)]. Para aplicações em sistemas de recados que usam nomes (p. ex. chamadas em aeroportos, hospitais estações rodoviárias etc.), que não podem ser inferidos por contexto, a SNR deve ser superior a +6 [dB(A)] para garantir uma inteligibilidade de sílabas superior a 85%.

4.4 PARÂMETROS ACÚSTICOS

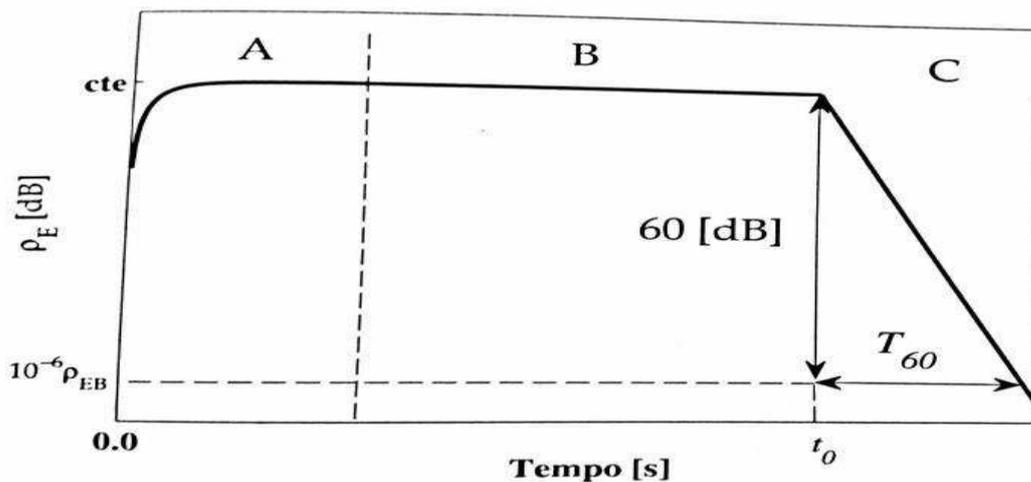
A experiência auditiva de qualquer pessoa em uma sala é uma expressão subjetiva, que é descrita muitas vezes por expressões como: “Esta sala tem um som muito brilhante”, “Esta sala é muito viva”, “Esta sala é muito seca”, “O som é confuso”, “O som é acolhedor”. O uso de conjunto de parâmetros objetivos é então necessário para

quantificar uma ou mais experiências ou dimensões subjetivas (BRANDÃO, E., 2016). Devido às suas maiores usabilidades será abordado neste trabalho os seguintes parâmetros acústicos: Tempo de reverberação (T_{30} e T_{20}), *Early Decay Time* (EDT) e Clareza (C).

4.4.1 TEMPO DE REVERBERAÇÃO (RT)

O tempo de reverberação, definido por Wallace Clement Sabine, foi o primeiro parâmetro objetivo definido. Ele mensura o tempo que a densidade de energia leva para decair a um milionésimo da energia de estado estacionário. Dessa forma pode-se observar que, em uma escala decibel como a da Figura 13, o tempo de reverberação T_{60} pode ser definido em [dB] por intermédio da Equação 4.4 (BRANDÃO, E., 2016).

Figura 13 - Densidade de energia (em escala logarítmica) em função do tempo



Fonte: (BRANDÃO, E., 2016).

$$10 \log \left(\frac{10^{-6} \rho_{EB}}{\rho_{EB}} \right) = -60 [dB] \quad (4.4)$$

No entanto, uma queda de 60 dB é extremamente difícil de se chegar na prática devido ao ruído de fundo presente nas salas. Devido à isso, criou-se uma forma de medir o T_{60} a partir de uma queda de 30 dB e extrapolando o valor encontrado para encontrar o tempo correspondente à queda de 60 dB. Esse valor é chamado de T_{30} e tem um valor bastante próximo ao valor do T_{60} . Dessa mesma forma foram também criados os parâmetros T_{20} e T_{10} (JARUSZEWSKA et al., 2015). O parâmetro T_{30} e T_{20} podem ser obtidos a partir das equações

$$T_{30} = 60dB \frac{t_{-35} - t_{-5}}{-5dB - (-35dB)} \quad (4.5)$$

$$T_{20} = 60dB \frac{t_{-25} - t_{-5}}{-5dB - (-25dB)} \quad (4.6)$$

Onde t_{-x} corresponde ao tempo o qual a curva caiu x dB abaixo do seu nível inicial.

Além de definir o que seria o T_{60} , Sabine encontrou uma formula empírica que relaciona o tempo de reverberação de um ambiente com o seu volume e área de absorção. Essa equação se baseia no fato de que o som viaja pela sala como feixes que, ao se encontrar com uma superfície, são parcialmente absorvidos e parcialmente refletidos (KINSLER et al., 1990). Esta equação é chamada de equação de Sabine dada por

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{A} [s] \quad (4.7)$$

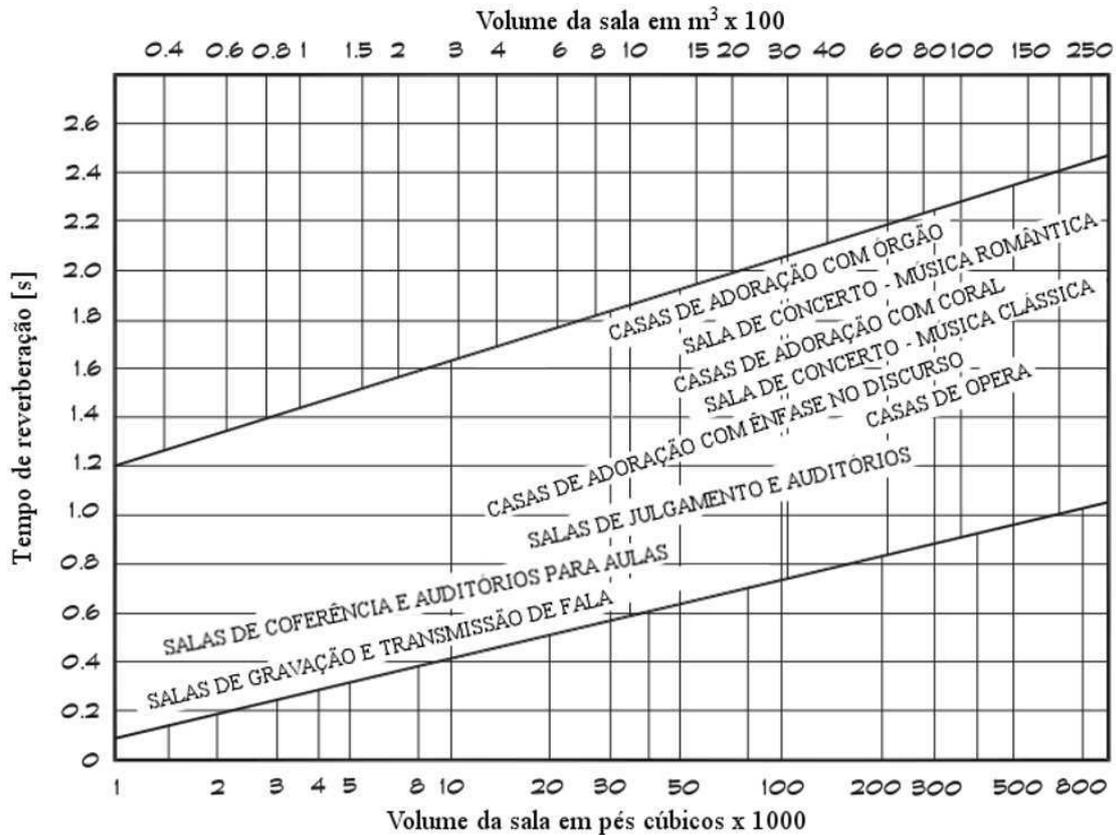
Onde V é o volume total da sala e A é o total de área absorvente em Sabins. O total de área absorvente de uma sala é calculado multiplicando a área de uma região pelo seu coeficiente de absorção correspondente, e somando este resultado com o de todas as outras regiões da sala como na Equação 4.8.

$$\bar{A} = \sum_i S_i a_{Ei} \quad [Sabins] \quad (4.8)$$

Onde S_i representa a área de uma dada superfície representada pelo índice i e a_{Ei} corresponde ao coeficiente de absorção dessa mesma superfície.

Depois de Sabine, muitos cientistas têm tentado identificar o tempo de reverberação ideal para determinada finalidade da sala. Um gráfico que sugere qual o tempo de reverberação indicado para uma sala de acordo com o seu uso e seu volume total é ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Tempo de reverberação sugerido para salas de acordo com seu volume e finalidade.



Fonte: (LONG, M., 2005).

4.4.2 EARLY DECAY TIME (EDT)

Como pôde ser observado no item anterior, a taxa de decaimento da pressão sonora é errática entre 0 e -5 [dB], o que deve às primeiras reflexões, e por isso a medição T_{60} foi restrita a faixas menores que -5[dB]. De forma a levar em conta a faixa inicial, um novo parâmetro objetivo foi sugerido: o *Early Decay Time* (EDT), que é uma medida do T_{60} realizada entre 0 [dB] e -10 [dB] (BRANDÃO, E., 2016). O parâmetro EDT foi sugerido inicialmente por Bolt e Doak (BOLT, R.; DOAK, P., 1950) como um parâmetro que se correlacionava melhor com a experiência subjetiva da reverberação. Jordan propôs a expressão para o EDT dada por:

$$EDT = 60dB \frac{t_{-10} - t_0}{-0dB - (-10dB)} \quad (4.9)$$

4.4.3 CLAREZA (C)

De acordo com Rossing (ROSSING, T., 2007), Claridade é um parâmetro objetivo que está relacionado à capacidade subjetiva de distinguir sons em sequência (“clareza” de um sinal sonoro). Quando as primeiras reflexões chegam ao ouvido do receptor num intervalo menor que 80 ms depois do som direto, está tende a ser integrada pelo SAH. Assim, se as primeiras reflexões apresentarem bastante energia, o som direto tende a ser experimentado como amplificado em detrimento da cauda reverberante. Se as primeiras reflexões apresentarem baixa energia e/ou se a cauda reverberante for consideravelmente longa, esta última será mais facilmente percebida, e tenderá a mascarar o próximo som direto que atinge o ouvinte. Dessa forma, a “clareza” é um termo subjetivo que descreve o grau em que os detalhes da performance são percebidos em relação ao mascaramento desse detalhe pela cauda reverberante (BRANDÃO, E., 2016).

De acordo com a norma ISSO 3382, os parâmetros objetivos associados à “clareza” devem medir as razões entre a energia contida nas primeiras reflexões e a energia do restante da resposta ao impulso ou à sua energia total (BRANDÃO, E., 2016).

O parâmetro da Clareza é dado por

$$C = 10 \log_{10} \left[\frac{\int_0^{80ms} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right] [dB] \quad (4.10)$$

Sendo:

$h(t)$ – A resposta ao impulso do sistema LIT.

Quanto maior o valor obtido por C, maior a predominância das reflexões iniciais e maior a impressão de clareza.

4.5 MATERIAIS ACÚSTICOS

O som que é ouvido nos ambientes é uma combinação do som direto com a soma das reflexões decorrentes das diversas superfícies e objetos (COX; D’ANTONIO, 2009). Conseqüentemente, um dos principais pontos de interesse no estudo de acústica em salas é como manipular essas reflexões (Fig. 3) que afetam a forma como o som se propaga e finalmente é percebido pelos ouvintes. O uso de absorvedores e difusores acústicos é então essencial para controlar a qualidade acústica do ambiente.

4.5.1 ABSORVEDORES

É um dispositivo acústico, em geral, bem maleável e não suporta muitas adversidades climáticas como sol e chuva constante. Sua principal função está no controle de reflexões e do tempo de reverberação de um ambiente, como foi visto nas equações de Sabine (Eq. 4.7). Como pode ser visto na (Fig. 3), parte da onda que incide no material é absorvida, e parte dela é refletida. A quantidade de energia absorvida por esse material é indicada a partir do seu coeficiente de absorção que é um valor geralmente entre 0 e 1, onde 1 representa um material totalmente absorvente e 0 representa um material totalmente refletivo (COX; D'ANTONIO, 2009).

Uma forma de medir o coeficiente de absorção de um material é a técnica utilizando um Tubo de impedância, que apesar de ser matematicamente simples, faz-se necessário o uso de materiais bem específicos e de custo elevado, tornando esse método muitas vezes restrito para o uso em laboratórios especializados. Por isso, o método de medição *in situ* é o mais usado para medir o coeficiente de absorção de um material qualquer, medindo-se o tempo de reverberação do ambiente com e sem o material e com base na diferença no tempo de reverberação e utilizando a Equação de Sabine 4.7, calcula-se o coeficiente de absorção do material. Na Figura 15 pode ser visto um absorvedor acústico bastante utilizado por ser de fácil implementação e baixo custo.

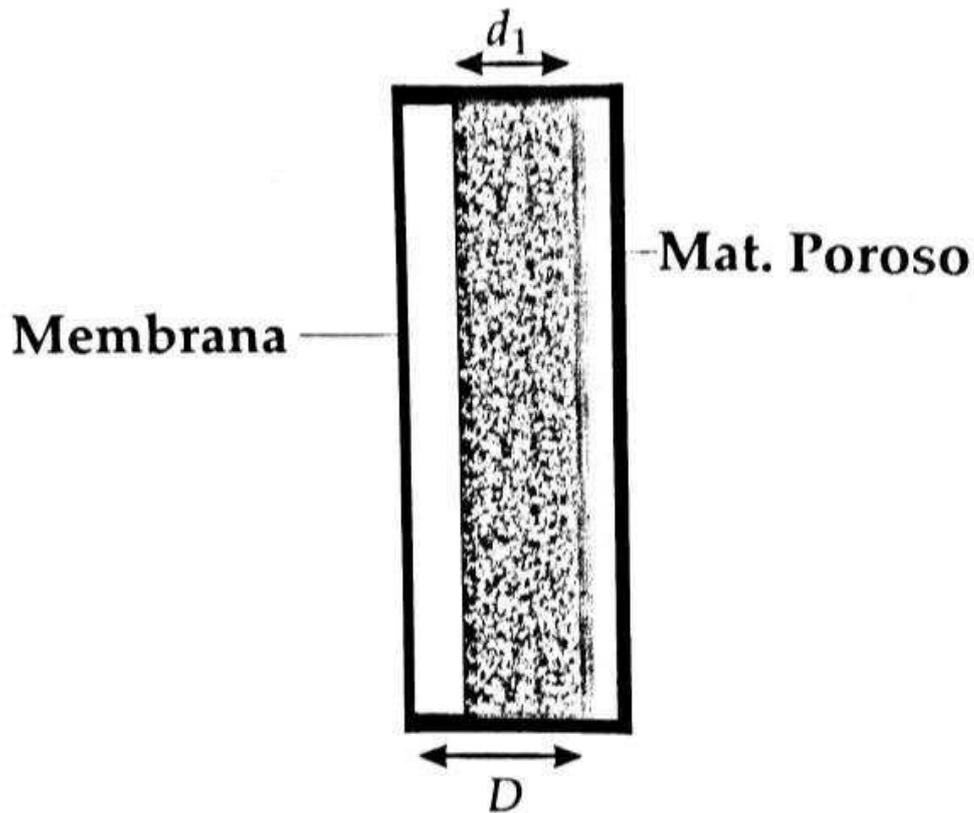
Figura 15 - Exemplo de absorvedor acústico.



4.5.1.1 ABSORVEDORES DE MEMBRANA

O absorvedor de membrana, ilustrado na Figura 16 é um tipo de absorvedor ressoante e seu mecanismo de absorção envolve uma massa vibrando sobre uma mola e amortecedor equivalente. Esse absorvedor consiste em uma cavidade fechada. A cavidade é lacrada por uma membrana flexível que é forçada a vibrar sobre o colchão de ar quando da ação de uma onda sonora (BRANDÃO, E., 2016).

Figura 16 - Absorvedor de membrana



Fonte: (BRANDÃO, E., 2016)

Para encontrar a frequência desse absorvedor, é necessário conhecer a sua massa e rigidez, dada por:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{mola}}{M}} \quad (4.11)$$

Em que f_{res} é a frequência de ressonância em [Hz], k_{mola} é a constante da mola em [N/m] e M é a massa em [kg]. Podendo ainda a constante k_{mola} ser expressa da forma:

$$-k_{mola} = \frac{\rho_0 c_0^2 S_m^2 m}{V} \quad (4.12)$$

A massa do absorvedor de membrana é representada pela massa da membrana (M , em [kg]), que é dada pelo produto entre a densidade volumétrica do material do qual é feito a membrana (ρ_m), a espessura (t_m) da membrana e sua área de superfície S_m [m^2], logo:

$$M = \rho_m \cdot t_m \cdot S_m \quad (4.13)$$

Logo, para calcular a frequência de ressonância de um absorvedor de membrana, cuja cavidade é preenchida somente com ar, pode-se usar as Equações (4.12) e (4.13) na Equação (4.11) e $V = S_m D$ tem-se (BRANDÃO, E., 2016),

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0 c_0^2}{D \rho_m t_m}} \quad (4.14)$$

Sendo $\rho_0 = 1.21 [kg/m^3]$; $c_0 = 343 [m/s]$ e $m'' = \rho_m t_m$ a densidade superficial da membrana dada em kg/m^2 . A Equação (4.14) pode ser reescrita como:

$$f_{60} = \frac{60}{\sqrt{m'' D}} \quad (4.15)$$

As Equações (4.14) e (4.15) servem como guia no início do projeto de um absorvedor de membrana. Elas mostram que, para se obter uma menor frequência de ressonância (região onde se concentra a absorção), deve-se ou aumentar a densidade superficial da membrana ou aumentar a profundidade da cavidade do absorvedor. No entanto, essas equações não mostram qual é o coeficiente de absorção do dispositivo. Para encontrar o coeficiente de absorção é necessário encontrar a impedância de superfície dada por:

$$Z_S = j\omega m'' + \frac{-jZ_{sp} \rho_0 c_0 \cot[k_0(D-d_1)] + (\rho_0 c_0)^2}{z_{sp} - j\rho_0 c_0 [k_0(D-d_1)]} \quad (4.16)$$

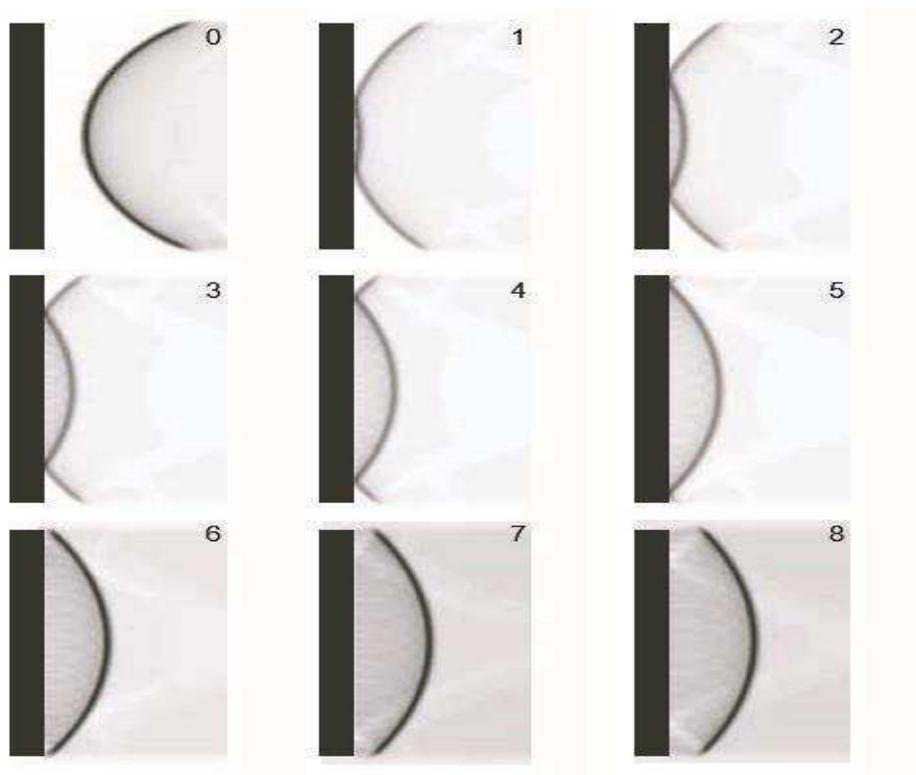
4.5.2 DIFUSORES

Um difusor sonoro é um painel acústico usado para tratamento de ecos e reflexões. Diferentemente de um absorvedor, este preserva o tempo de reverberação do ambiente uma vez que este dispositivo não absorve de forma significativa a energia sonora.

Por isso, é muito comum a utilização de difusores em locais de grande volume como casas de espetáculo, teatros e igrejas onde se deseja preservar a energia sonora de forma que todos os ouvintes, dos mais próximos à fonte sonora ao mais distantes, consigam perceber o som emitido com clareza e sem a necessidade de utilizar dispositivos eletroacústicos.

Na Figura 17 pode-se ser observado a reflexão ideal de uma frente de onda cilíndrica após o encontro com uma superfície perfeitamente planar (comprimento da onda muito menor que o comprimento da superfície). Um impulso sonoro foi gerado da direita para esquerda, e a onda simplesmente muda direção após a reflexão especular, onde o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Isso pode levar à reflexão sendo percebida como um eco. Portanto, o papel de um difusor é quebrar ou difundir a reflexão, de modo que a energia sonora é dispersa, e o som não permaneça em feixes estreitos.

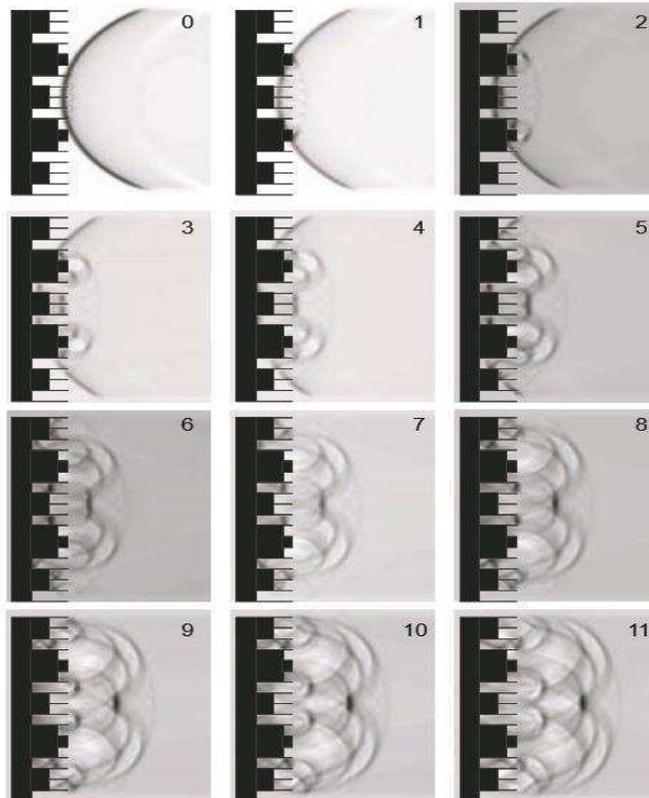
Figura 17 - Reflexão de uma onda cilíndrica em uma superfície perfeitamente plana usando modelo FDTD (Finite Difference Time Domain). Os números indicam a ordem dos instantes em que se captou a imagem.



Fonte: (COX; D'ANTONIO, 2009)

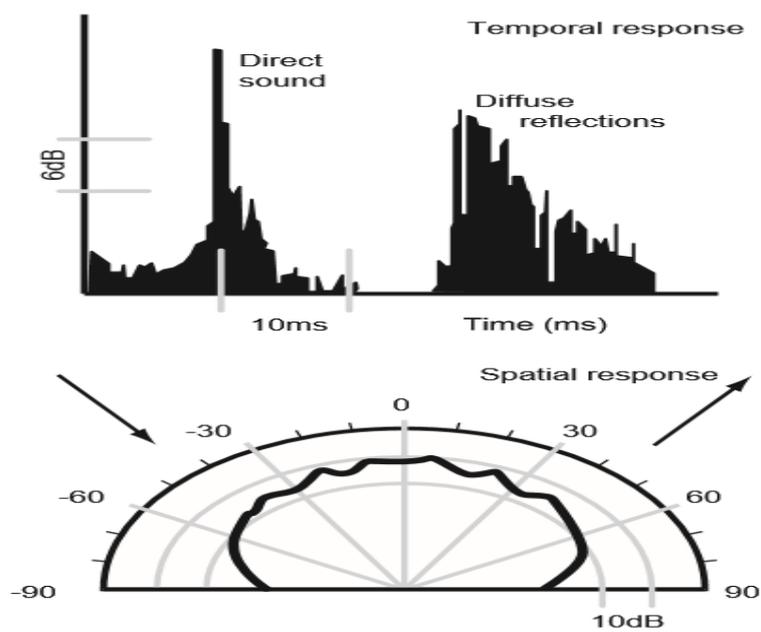
Já na Figura 18 é mostrado o efeito da utilização de um difusor de Schroeder, a frente de onda é muito mais complexa do que o exemplo anterior. Pode ser percebido que a onda sonora leva mais tempo para se propagar entre e fora das lacunas, essa diferença de tempo resulta numa complexa interferência no padrão de formas de onda. Como consequência, a onda refletida sofre dispersão espacial e temporal (Figura 19), dando assim maior conforto acústico àqueles no ambiente.

Figura 18 - Reflexão de uma onda cilíndrica em um difusor de Schroeder calculada usando o modelo FDTD.



Fonte (COX; D'ANTONIO, 2009).

Figura 19 - Dispersão espacial e temporal gerada por um difusor Schroeder



Fonte: (COX; D'ANTONIO, 2009)

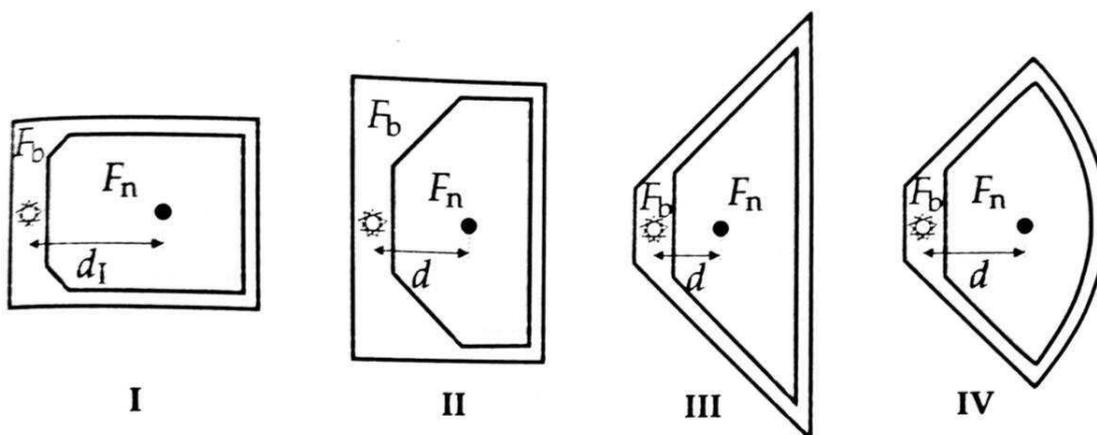
Diversos são os difusores presente na literatura, difusores geométricos, plano finito, piramidais, côncavos, convexos, difusores de Schroeder, difusores MLS, dufusor QRD e etc.

4.6 ACÚSTICA DE AUDITÓRIOS

Os auditórios para fala são salas destinadas a aulas e palestras e são, em geral, maiores que salas de aulas comuns. Por esse motivo, é essencial que se tome uma série de cuidados extras no projeto de tais salas. Em primeiro lugar é necessário controlar o volume da sala. O máximo volume aconselhado de um auditório para que um orador médio fale e seja compreendido sem o suporte de um sistema de áudio é de 3000 [m³] (LONG, M., 2005). O T_{60} ideal pode ser obtido da Figura 14. Para um bom projeto, também é necessário que a sala atenda à alguns critérios em relação ao ruído de fundo, sendo estipulado que todo ruído não deve exceder um nível máximo de 35 *dba* quando o nível de pressão sonora da voz for igual a 75 *dba*, medido a um metro do orador, e uma distância de até 7,6 metros entre a fonte sonora e o receptor mais distante (LONG, M., 2005)

Dadas as necessidades visuais de uma sala como essa, é importante também a distância máxima entre palestrante e ouvintes seja minimizada. Isso também ajuda a controlar o volume da sala, o que, por conseguinte, ajuda a controlar o tempo de reverberação. Nesse caso, alguns tipos de arranjos de plateia podem ajudar a minimizar as distâncias entre palestrante e ouvinte (BRANDÃO, E., 2016). Algumas ideias são ilustradas na Figura 20.

Figura 20 - Formas de distribuição de plateia em um auditório: área relativa ocupada e distância média relativa.



Fonte: (BRANDÃO, E., 2016)

Onde d representa a distância média entre palestrante e ouvinte, F_n é a área efetiva ocupada pela plateia e F_b é a área total do auditório. Na Figura 21 são mostradas as razões F_n/F_b de cada formato e as razões entre a distância média d em relação à distância média do arranjo I (d_I).

Figura 21 - Formas de distribuição de plateia em um auditório: área relativa ocupada e distância média relativa

	I	II	III	IV
F_n/F_b	0.63	0.55	0.64	0.67
d/d_I	1.00	0.83	0.78	0.79

Fonte: (BRANDÃO, E., 2016)

Pode-se notar que os arranjos III e IV apresentam a menor distância média entre o orador e o ouvinte em relação ao arranjo (I) e um melhor aproveitamento da área que o arranjo (II). Isso os torna mais adequados se a sua construção for possível (BRANDÃO, E., 2016).

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

5 MATERIAIS UTILIZADOS

Os seguintes materiais foram utilizados para a realização do experimento:

- 1- Microfone da marca Behringer modelo ECM8000;
- 2- Falantes 2.1 canais da marca Harman Kardon modelo Soundsticks III;
- 3- Notebook com o programa MatLAB® instalado em conjunto com o pacote ITA-toolbox;
- 4- Interface de áudio USB da marca Behringer modelo UMC22;

5.1 MICROFONE

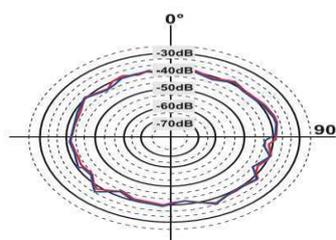
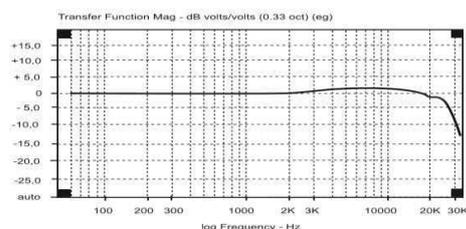
Microfone omnidirecional do tipo condensador, é o dispositivo ideal para uso em medições acústicas. Pode-se observar na que a resposta em frequência do microfone é aproximadamente linear entre 20Hz e 20kHz, o que garante uma representação fidedigna do som a ser medido. A resposta em frequência e diagrama polar deste microfone é mostrada na Figura 22, e como o mesmo foi utilizado durante as medições é ilustrada na figura 23.

Figura 22 - Especificações, resposta espacial e resposta em frequência do microfone Behringer ECM8000.

SPECIFICATIONS

Type
Impedance
Sensitivity
Frequency response
Connector
Phantom power
Weight

electret condenser, omni-directional
600 Ohms
-60 dB
15 Hz to 20 kHz
gold-plated XLR
+15 V to +48 V
app. 120 g



Fonte: Manual do usuário do fabricante.

Figura 23 - Microfone inserido no tripé e conectado à interface de áudio durante medições



Fonte: Própria.

5.2 FALANTES

Sistema de áudio de 2.1 canais com potência de 40W RMS, sendo 20W para o falante de baixa frequência e 10W RMS para cada falante de média e alta frequência. Segundo o fabricante, possui resposta em frequência entre 44Hz e 20Khz com distribuição equilibrada, o que é suficiente para realização do experimento. Ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Falante utilizado no experimento



Fonte: Própria.

5.3 SOFTWARE UTILIZADO

Todo o processamento do sinal sonoro reproduzido e gravado foi feito utilizando o software MatLAB® em conjunto com o pacote *ITA-toolbox*. Utilizou-se as rotinas e sinais predefinidos pelo pacote, que segundo os pesquisadores responsáveis (MATLAB Tollbox for the Comprehension of Acoustic Measurement and Signal Processing, 2010), atendem as exigências da IEC 61260.

5.4 INTERFACE DE ÁUDIO

É o dispositivo utilizado para enviar o sinal, via porta USB, da resposta ao impulso para os falantes e também digitalizar o sinal captado pelo microfone. Utilizou-se uma taxa de amostragem de 48.000 amostras por segundo e 16 bits de resolução por amostra. Ilustrado na Figura 25.

Figura 25 - Interface de áudio Behringer UMC22 utilizada no experimento.



Fonte: Própria.

6 DESCRIÇÃO DOS AMBIENTES EM ESTUDO

Foram escolhidos três auditórios para ser feita a medição dos parâmetros acústicos, Auditório do bloco-CJ; Auditório do DEE e Auditório do bloco-CG. Sendo os auditórios do bloco-CG e CJ mais utilizados para ministrar aulas, e o auditório do DEE mais utilizado para palestras e vídeo conferência. Por isso, o estudo acústico para os três terá foco na inteligibilidade da fala humana. Os três auditórios em estudo são localizados na UFCG no Campus de Campina Grande e pertencem ao CEEI (Centro de Engenharia Elétrica e Informática).

6.1 AUDITÓRIO DO BLOCO-CJ

Sala apropriada para acomodar 40 pessoas com dimensões de 7,8m x 5,9m x 3,4m totalizando um volume de 156,5m³, ilustrada na Figura 26. Sendo o piso de cerâmica, parede frontal e traseira revestida com azulejo, uma das paredes laterais possui persiana de tecido por toda sua extensão e cerca de 40 cadeiras acolchoadas em seu interior. Fazendo uma análise qualitativa dos materiais presente no interior da sala pode-se verificar pouca presença de material absorvente acústico, somente as cadeiras e a persiana. O que chama bastante atenção também são as paredes revestidas com azulejo, material que possui o índice de absorção próximo a 0, o que contribui consideravelmente para elevar o tempo de reverberação do ambiente.

Figura 26 - Auditório Bloco-CJ



Fonte: Própria.

6.2 AUDITÓRIO DO CEEI

Sala reformada recentemente com capacidade para 50 pessoas com dimensões de 7,9m x 5,9m x 2,4m totalizando um volume de 112m³, ilustrada na Figura 27. Fazendo um breve levantamento qualitativo dos materiais, vale ressaltar a presença de matérias que ajudam na absorção da energia sonora como as cadeiras acolchoadas, carpete na parte frontal da sala e persiana na parede traseira. Das três salas em estudo essa é que apresenta uma menor altura do teto, o que consequentemente diminui o volume da sala o que contribui para uma queda no tempo de reverberação ver Equação (4.7).

Figura 27 - Auditório do DEE



Fonte: Própria.

6.3 AUDITÓRIO DO BLOCO-CG

Sala com capacidade para suportar até 30 pessoas com dimensões de 8,0m x 4,9 x 3,4m totalizando um volume de 133,3m³, ilustrada na Figura 28. Este auditório possui características acústicas muito semelhante à encontrada no auditório do Bloco-CJ com ressalvas para a ausência de azulejos nas paredes frontais e traseiras da sala e também pelo seu volume ser 23m³ menor, o que pode ser visto como pontos positivos do ponto de vista acústico.

Figura 28 - Auditório Bloco-CG



Fonte: Própria.

7 MEDIÇÃO

Todas as medições foram realizadas no dia 20/03/2017, e com a ajuda de um colega de curso foi necessário cerca de 1h30min para realizar a medição em cada auditório, totalizando pouco mais de 4h de medições. O procedimento utilizado nas medições segue os padrões da norma internacional ISO 3382-1 (ISO, 2009).

7.1 NORMA ISO 3382

De acordo com a norma ISO 3382, a fonte sonora e o microfone devem ser o mais omnidirecional possível. Uma fonte sonora omnidirecional bastante utilizada em medições acústicas é o dodecaedro que pode ser visto na Figura 29. Porém, utilizar um dodecaedro como fonte sonora omnidirecional é inviável para o usuário comum, uma vez que o equipamento não é muito portátil e tem um custo financeiro elevado. Uma forma alternativa seria o uso de uma pistola calibre 28mm para gerar o impulso sonoro, mas este também é inviável dadas as circunstâncias das salas e devido à dificuldade de conseguir tal equipamento.

Apesar dos equipamentos exigidos pela norma requererem um alto investimento, foi possível realizar as medições mesmo sem seguir à norma a rigor. Questões como o processamento do sinal, número de medições e distâncias foram seguidas segundo a norma ISO 3382.

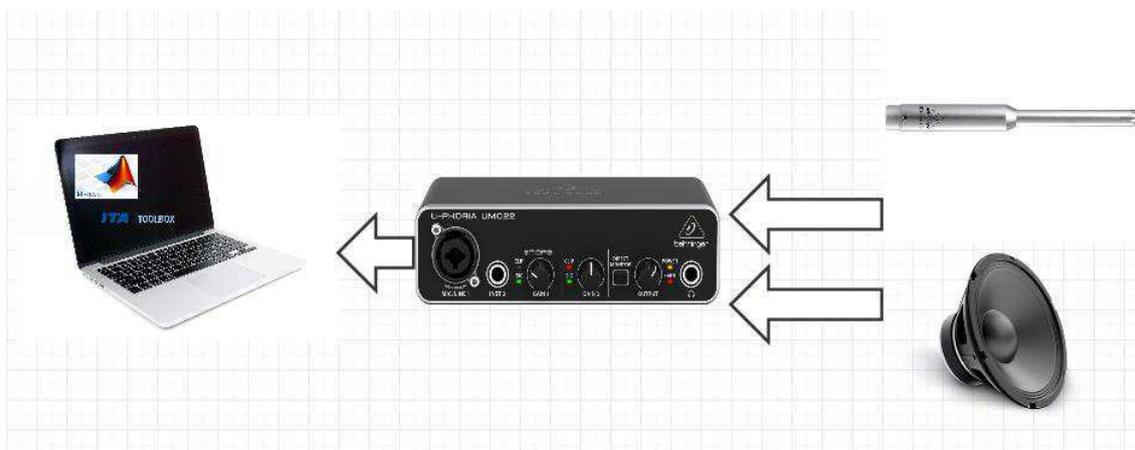
Figura 29 - Fonte sonora no formato Dodecaedro.



7.2 MONTAGEM DOS EQUIPAMENTOS

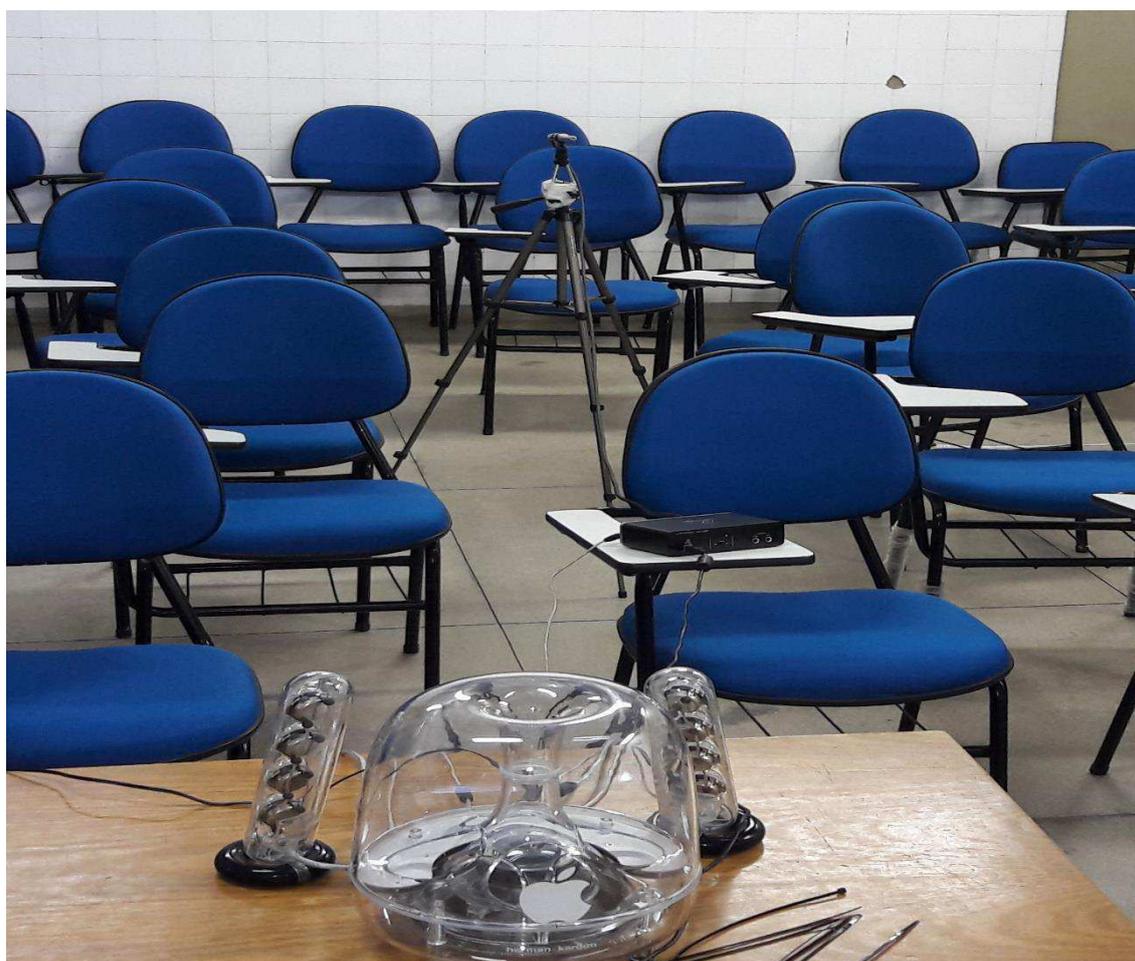
Com a utilização de um tripé, foi possível manter o microfone firme e com altura fixada à 1,35m do chão, utilizou-se um cabo XLR-XLR de 3 metros para fazer a conexão do microfone com a interface de áudio, e um cabo com terminais Jack 3,5mm para conectar os falantes à mesma interface de áudio. Já a interface estava conectada ao computador via cabo USB. Esquema da montagem pode ser visto na Figura 30 e na Figura 31 pode ser visto uma foto tirada no dia da montagem

Figura 30 - Esquema do arranjo dos equipamentos durante as medições.



Fonte: Própria.

Figura 31 - Arranjo durante as medições

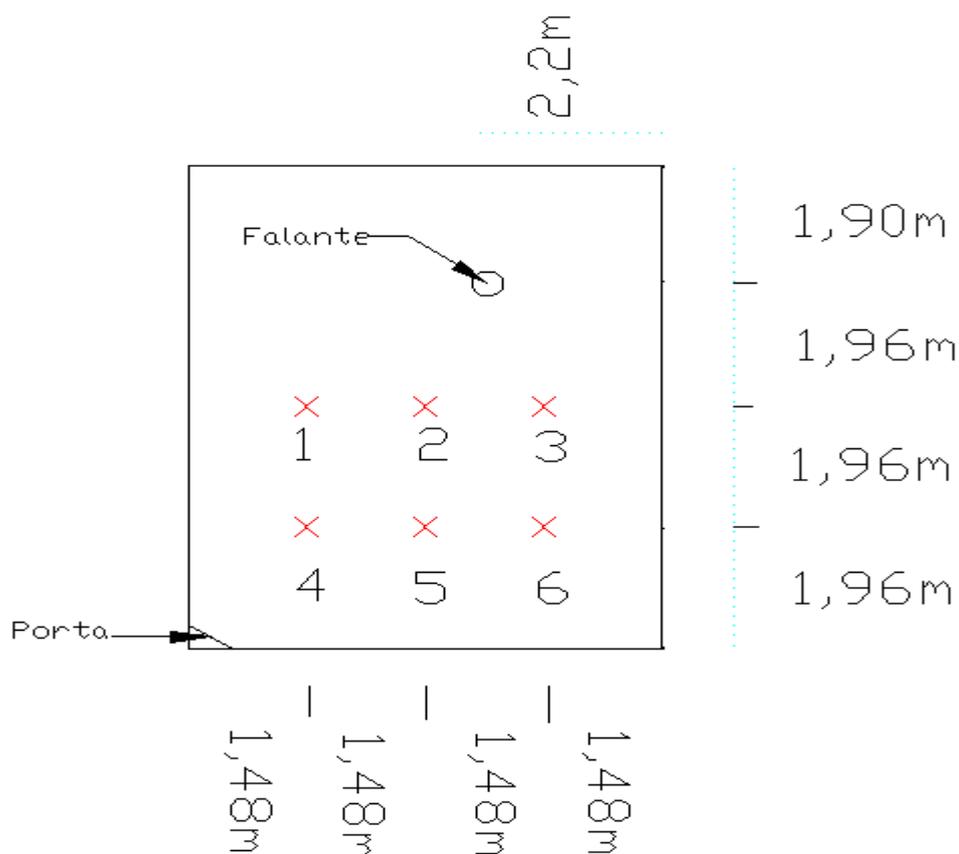


Fonte: Própria.

7.3 POSICIONAMENTO DAS MEDIÇÕES

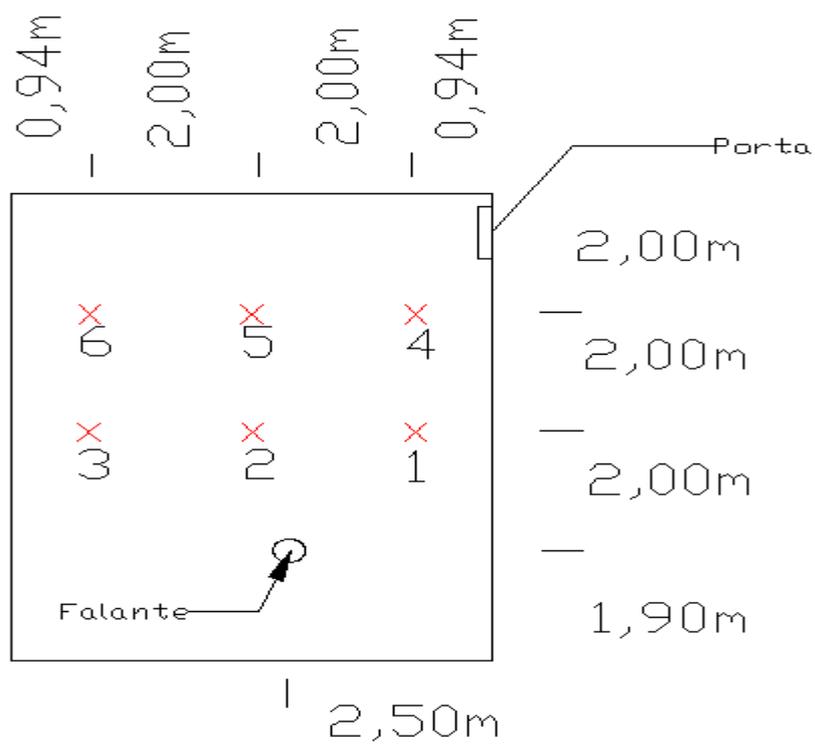
Nos três auditórios medidos a fonte sonora foi fixada a uma altura de 1m do solo na parte frontal da sala, simulando o posicionamento de um professor ou palestrante. Já o microfone teve o seu posicionamento alterado, seguindo os critérios da ISO 3382, como forma de gerar uma média de todos os ouvintes que possam estar na sala durante um evento, a altura do microfone também foi mantida fixa em $1,30\text{m}$ em todas as medições. Pode ser melhor compreendido se observado as Figuras 32, 33 e 34, ilustrando o posicionamento das medições do Bloco-CJ, CEEI e Bloco-CG, respectivamente.

Figura 32 - Posicionamento medições Auditório Bloco-CJ



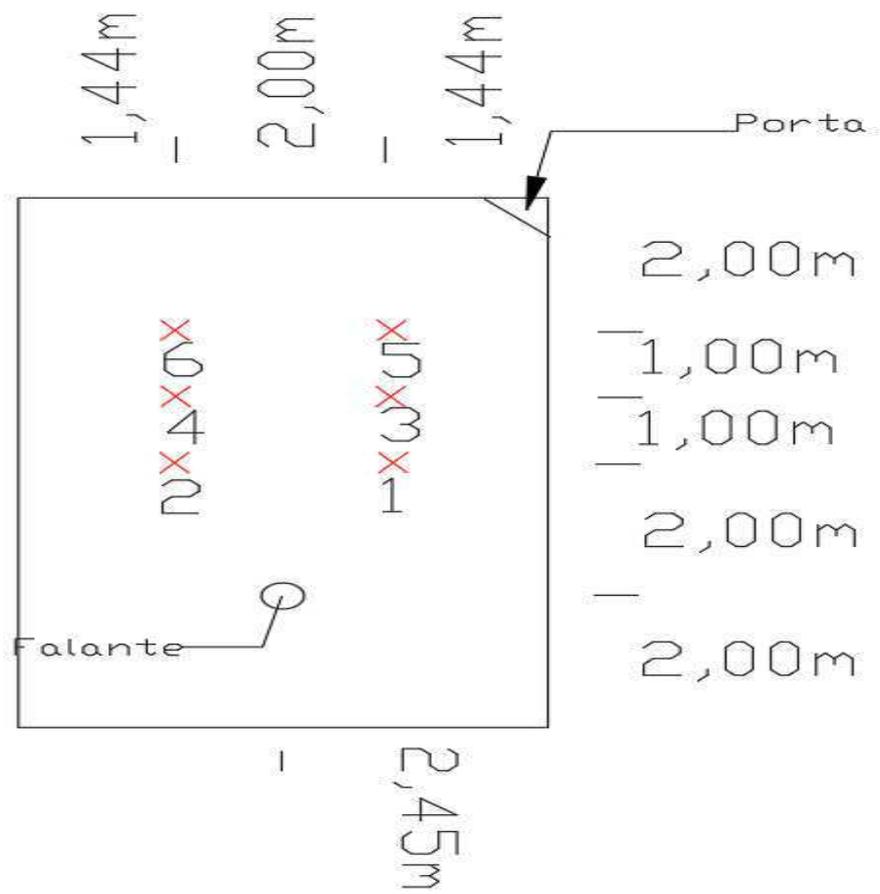
Fonte: Própria

Figura 33 - Posicionamento medições Auditório CEEI



Fonte: Própria

Figura 34 - Posicionamento medições Auditório Bloco-CG



Fonte: Própria

RESULTADOS

7.4 PARÂMETROS ACÚSTICOS MEDIDOS

Foi medido os parâmetros acústicos T_{30} , T_{20} e EDT nos três auditórios em estudo, e o resultado pode ser visto nas tabelas a seguir.

7.4.1 AUDITÓRIO BLOCO-CJ

Tabela 1 - T30

POSIÇÃO FREQ. (HZ)	1	2	3	4	5	6	MÉDIA
62,5	-	-	-	-	-	-	-
125	-	-	-	-	-	-	-
250	-	-	-	-	-	-	-
500	-	-	-	-	-	-	-
1000	0,92		0,87	0,92	0,94	0,91	0,91
2000	0,86	0,93	0,89	0,84	0,98	0,86	0,88
4000	0,68	0,73	0,84	0,69	0,71	0,71	0,73
8000	0,51	0,59	0,57	0,55	0,55	0,53	0,55
16000	0,34	0,38	0,35	0,36	0,36	0,37	0,36

Tabela 2 - T20

POSIÇÃO FREQ. (HZ)	1	2	3	4	5	6	MÉDIA
62,5	-	-	-	2,66	-	-	-
125	1,46	1,78	1,98	-	1,77	1,86	1,47
250	1,38	1,33	1,46	1,44	1,31	1,34	1,37
500	1,05	0,86	0,99	1,06	1,12	1,01	1,01
1000	0,92	0,97	0,88	0,92	0,94	0,92	0,92
2000	0,89	0,94	0,89	0,87	0,9	0,84	0,89

4000	0,34	0,78	0,8	0,74	0,77	0,74	0,69
8000	0,57	0,65	0,62	0,60	0,59	0,60	0,60
16000	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,36

Tabela 3 - EDT

POSICÃO FREQ. (HZ)	1	2	3	4	5	6	MÉDIA
62,5	1,62	3,20	3,16	1,97	2,86	2,18	2,49
125	1,61	1,93	2,25	1,71	2,15	1,90	1,92
250	1,38	1,54	1,62	1,27	1,38	1,25	1,41
500	0,89	0,88	0,99	1,08	0,80	0,99	0,94
1000	0,96	0,94	0,92	0,98	0,88	0,93	0,93
2000	0,92	0,96	0,89	1,02	0,99	0,91	0,95
4000	0,92	0,90	0,84	0,86	0,91	0,91	0,89
8000	0,74	0,69	0,73	0,75	0,76	0,76	0,74
16000	0,44	0,34	0,38	0,32	0,42	0,26	0,36

7.4.2 AUDITÓRIO DEE

Tabela 4 - T30

POSICÃO FREQ. (HZ)	1	2	3	4	5	6	MÉDIA
62,5	-	2,11	-	-	-	-	2,11
125	-	0,93	-	-	0,84	-	0,89
250	-	-	-	0,67	-	-	0,67
500	0,58	0,63	0,64	0,67	0,65	0,70	0,65
1000	0,62	0,64	0,66	0,63	0,66	0,65	0,64
2000	0,77	0,74	0,72	0,72	0,73	-	0,74
4000	0,69	0,67	0,66	0,67	0,66	0,67	0,67
8000	0,55	0,55	0,54	0,54	0,53	0,54	0,54

16000	0,33	0,31	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
--------------	------	------	------	------	------	------	------

TABELA 5 - T20

POSIÇÃO FREQ. (HZ)	1	2	3	4	5	6	MÉDIA
62,5	-	2,34	1,23	2,36	2,02	1,88	1,97
125	1,17	0,93	1,10	1,30	0,84	1,32	1,11
250	0,65	0,66	0,61	0,71	0,79	0,79	0,70
500	0,59	0,61	0,63	0,68	0,62	0,72	0,64
1000	0,62	0,62	0,61	0,59	0,63	0,69	0,63
2000	0,73	0,72	0,70	0,68	0,72	0,80	0,73
4000	0,73	0,68	0,69	0,70	0,69	0,71	0,70
8000	0,57	0,56	0,55	0,58	0,58	0,57	0,57
16000	0,32	0,33	0,31	0,30	0,32	0,32	0,32

Tabela 6 - EDT

POSIÇÃO FREQ. (HZ)	1	2	3	4	5	6	MÉDIA
62,5	2,45	2,57	0,83	1,56	2,05	1,72	1,86
125	0,89	0,97	1,01	0,90	1,16	1,06	1,00
250	0,51	0,58	0,69	0,55	0,48	0,6	0,57
500	0,73	0,69	0,63	0,75	0,59	0,52	0,65
1000	0,69	0,62	0,62	0,66	0,56	0,60	0,63
2000	0,72	0,69	0,68	0,80	0,69	0,68	0,71
4000	0,85	0,71	0,76	0,76	0,56	0,70	0,72
8000	0,56	0,73	0,58	0,58	0,55	0,50	0,58
16000	0,27	0,24	0,39	0,22	0,26	0,27	0,24

7.4.3 AUDITÓRIO BLOCO-CG

Tabela 7 - T30

POSIÇÃO FREQ. (HZ)	1	2	3	4	5	6	MÉDIA
62,5	-	-	-	-	-	-	-
125	-	-	-	-	-	-	-
250	-	-	-	-	-	-	-
500	0,70	0,73	-	0,75	0,85	0,69	0,74
1000	0,86	0,86	0,86	0,86	0,93	0,91	0,88
2000	0,81	0,81	0,81	0,86	0,81	0,81	0,82
4000	0,71	0,72	0,70	0,72	0,68	0,69	0,70
8000	0,56	0,59	0,53	0,54	0,54	0,53	0,55
16000	0,34	0,33	0,36	0,35	0,35	0,37	0,35

Tabela 8 - T20

POSIÇÃO FREQ. (HZ)	1	2	3	4	5	6	MÉDIA
62,5	2,42	2,64	2,70	2,49	2,37	2,40	2,50
125	2,10	2,05	-	1,82	2,18	2,01	1,69
250	1,08	1,11	1,03	1,03	1,19	0,98	1,07
500	0,68	0,74	0,77	0,73	0,83	0,68	0,74
1000	0,81	0,82	0,83	0,88	0,91	0,90	0,86
2000	0,82	0,82	0,81	0,87	0,87	0,84	0,84
4000	0,77	0,80	0,77	0,78	0,77	0,77	0,78
8000	0,58	0,62	0,56	0,58	0,60	0,61	0,59
16000	0,33	0,31	0,35	0,34	0,35	0,36	0,34

Tabela 9 - EDT

POSIÇÃO FREQ.(HZ)	1	2	3	4	5	6	MÉDIA
62,5	2,24	2,31	2,53	2,24	2,24	2,24	2,30
125	1,96	2,03	1,99	2,04	2,01	2,01	2,01
250	0,91	1,10	1,16	0,93	1,15	0,92	1,03
500	0,73	0,68	0,65	0,64	0,65	0,60	0,66
1000	0,76	0,81	0,90	0,77	0,83	0,86	0,82
2000	0,96	0,87	0,93	0,85	0,92	0,94	0,91
4000	0,81	0,85	0,86	0,86	0,94	0,91	0,87
8000	0,64	0,66	0,68	0,66	0,73	0,70	0,68
16000	0,32	0,15	0,30	0,30	0,30	0,27	0,27

7.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

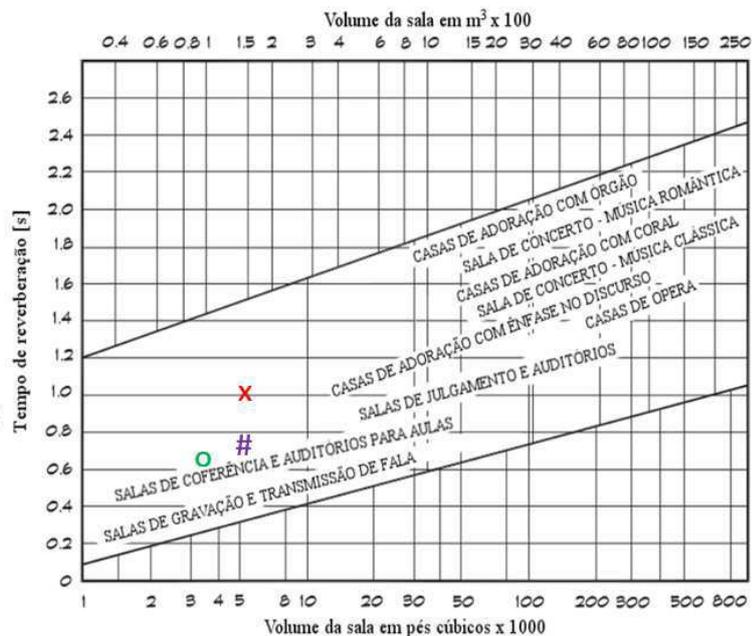
Pode-se observar que algumas células das tabelas anteriores estão em branco, isto se deve ao fato da relação sinal-ruído nestas frequências ter sido insuficiente para aferir com precisão os parâmetros, e por isso, esses valores já foram automaticamente descartados pelo software. Há duas formas de minimizar estas lacunas, sendo a primeira, aumentar a potência sonora do equipamento utilizado como falante, e a segunda reduzir os ruídos externos à sala, como conversa, equipamentos elétricos e ruídos de forma geral. Vale notar também que a incidência de lacunas é maior quando se trata do parâmetro T_{30} , isto se dá devido ao fato de que para este parâmetro é necessário esperar até o decaimento de 30 dB do sinal gerado, o que torna ainda mais significativo o ruído quando relacionado ao sinal.

Como pode ser visto nas tabelas dos resultados, Tabelas 1 a 9, foi medido diferentes tempos de reverberação para cada frequência, aqui vamos utilizar o tempo de

reverberação à 500Hz como padrão unitário para todas salas. Os resultados obtidos em comparação com o sugerido pela Figura 14 podem ser visualizados na Figura 35.

Figura 35 – Resultado obtido representado com base no sugerido pela Figura 14.

- Auditório Bloco-CJ (x)
 - T30 = -
 - T20 = 1,01seg
 - EDT = 0,94seg
- Auditório CEEI (o)
 - T30 = 0,65seg
 - T20 = 0,64seg
 - EDT = 0,65seg
- Auditório Bloco-CG (#)
 - T30 = 0,74seg
 - T20 = 0,74seg
 - EDT = 0,66seg

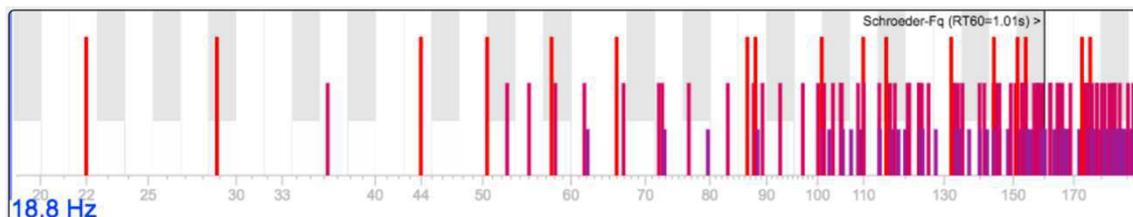


Fonte: Própria

7.5.1 AUDITÓRIO BLOCO-CJ

Como houve muitas lacunas na medição do T_{30} vamos adotar o valor medido na tabela 2 do T_{20} . Comparando os valores obtidos na tabela 2 de $T_{20} = 1,01s$ e na tabela 3 do EDT = 0,94 frente aos 0,8s, tempo de reverberação máximo recomendado de acordo com a Figura 14, pode-se verificar que o tempo de reverberação do auditório está acima do recomendando.

Por se tratar de uma sala retangular, os modos acústicos podem ser medidos segundo a Equação 4.3. O que nos dá os seguintes módulos abaixo da frequência de Schroeder de 160Hz, calculada segundo a Equação 4.1.



Como esta sala é destinada para o uso apenas de propagação da voz humana, que possui faixa de frequência variando de 50 Hz à 3400 Hz, não há preocupação enquanto aos modos abaixo desta frequência. Para controlar os modos, devemos usar algum absorvedor com coeficiente de absorção nas frequências entre 50Hz e 160Hz. Os materiais porosos, sensíveis a velocidade de partícula, não são adequados para a atenuação da energia de modos, já que a espessura de tais amostras teria que ser da ordem de $\lambda/4$ [m], o que para uma frequência de 100 Hz teria-se $\lambda/4 = 85$ [cm], o que se torna inviável devido ao espaço ocupado por tal absorvedor. Feito o cálculo para solucionar o problema utilizando difusores ficou evidente que seria também inviável, uma vez que os difusores ocupariam quase a totalidade da parede traseira do auditório, o que seria bastante custoso financeiramente e esteticamente desagradável.

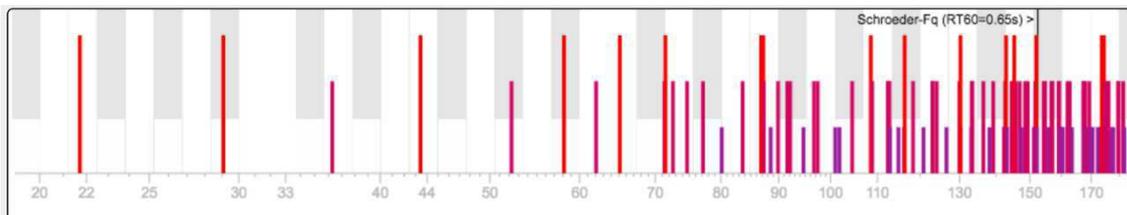
Para solucionar o presente problema então, seria mais aplicável o uso de absorvedores de membrana. Somente após a frequência de 80Hz que os modos desta sala passam a ter incidência de mais de 3 vezes, por isso focaremos o tratamento dos módulos na faixa de frequência entre 80Hz e 160Hz. Absorvedores de membrana têm sua eficiência numa curta faixa de frequência e por isso 2 dispositivos com pequena diferença no coeficiente do material serão usados aqui, um tipo 2 para frequências próximas à 100Hz e um tipo 3 para frequências próximas à 140Hz. Utilizando as Equações em (4.15) e (4.16) e em conjunto com a Equação de Sabine (4.7) calculou que um absorvedor de membrana tipo 2 ideal seria de material PVC com densidade média $\rho_m = 1300[kg/m^3]$ profundidade total da cavidade $D = 6.0cm$ espessura da membrana $t_m = 0.5[mm]$ e massa de 1.3kg. Já para o tipo 3 com o mesmo material PVC, uma profundidade total de cavidade $D = 3.0cm$ espessura de membrana $t_m = 0.3[mm]$, e massa de 1,5kg.

Os absorvedores ficariam localizados nos cantos da sala, onde além de ser os locais onde há maior concentração das ondas sonoras de baixa frequência também é um local de pouca utilização, o que não causaria muitas perdas de espaço para os usuários das salas.

7.5.2 AUDITÓRIO DO DEE

Vendo a tabela 4 podemos constatar que o tempo de reverberação para esta sala é de 0,65s o que está dentro da faixa de 0,6 e 0,8 recomendado para o propósito o qual foi destinada. Já era esperado o valor do tempo de reverberação para esta sala ser mais baixo, feito os devidos comentários qualitativos no item 6.2.

Em relação aos modos, foi obtido os seguintes modos abaixo da frequência da Schroeder de 152 *Hz*.

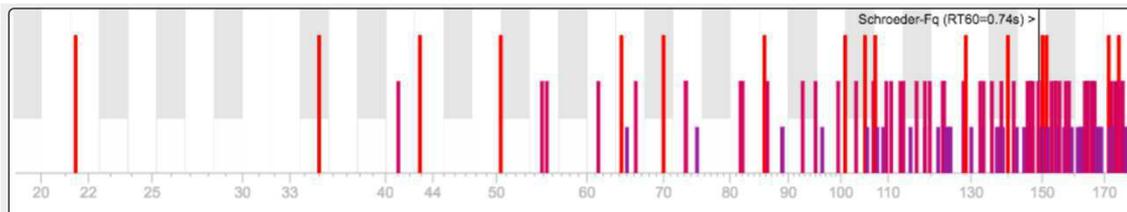


Devido à incidência de modos coincidentes ser maior apenas para faixa de frequência acima dos 110 Hz um tratamento dos modos seria apenas utilizando o absorvedor de membrana tipo 3 apresentado no item 7.5.1.

7.5.3 AUDITÓRIO DO BLOCO-CG

Vendo a tabela XX podemos constatar que o tempo de reverberação para esta sala é de 0,74s o que apesar de ser um pouco mais alto do que o da sala anterior ainda está dentro da faixa de 0,6 e 0,8 recomendado para este propósito de sala.

Em relação aos modos, foi obtido os seguintes modos abaixo da frequência da Schroeder de 149 *Hz*.



Um tratamento para os modos seria o mesmo apresentado no item 7.5.2.

8 CONCLUSÃO

Apesar das características acústicas da sala não ser exatamente um sistema linear e invariante no tempo, ter considerado isso verdadeiro foi realmente uma boa aproximação e que nos permitiu medir com precisão os tempos de reverberação (T_{30} e T_{20}) e o *Early Decay Time (EDT)* das salas aqui estudadas. A importância de manter uma relação sinal-ruído para que os parâmetros acústicos possam ser medidos e evitem lacunas nas tabelas como encontrado na tabela 1, é um fato a ser fortemente considerado quando se realiza medições desta natureza.

A importância de se estudar o comportamento das ondas sonoras juntamente com o funcionamento do SAH é de extrema importância uma vez que a psicoacústica é um critério bastante subjetivo, variando de pessoa para pessoa. E por isso foram criados parâmetros objetivos para descrever os ambientes acústicos não só qualitativamente, mas quantitativamente também.

Sobre os resultados das medições aqui obtidos ficou claro que o auditório do Bloco-CJ é dos três, o que mais precisa de atenção principalmente no tempo de reverberação, critério fortemente relacionado com a inteligibilidade da sala e que conseqüentemente pode levar aos alunos da sala a terem dificuldade no entendimento do que é falado pelo professor.

Já o Auditório do CEEI foi o que se saiu melhor nos parâmetros aqui medidos, porém ainda pode-se fazer um tratamento dos modos acústicos com a utilização de absorvedores de membrana.

REFERÊNCIAS

Sarris, J.C., Camburakis, G.E., “Time Frequency Analysis And Parametric Approximation Of Room Impulse Responses” Published in: Acoustic, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings – IEE International Conference on – Volume 6, 2003.

PEREIRA, F. et al. Comunicações Audiovisuais: Tecnologias, Normas e Aplicações. [S.I]: Lisboa, Portugal: IST Press, 2009.

BRANDÃO, E Acústica de Salas, projeto e modelagem, Blucher, 2016.

GUIDORZI, P. et al. *Impulse responses measured with mls or swept-sine signals applied to architectural acoustics*. Energy Procedia, Elsevier, v.78.

COX, T. J.; D'ANTONIO, P. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. [S.I]: Crc Press, 2009.

ISSO, B. 3382-1: 2009, “. *Acoustic-Measurement of room acoustic parameters, Performance spaces*, 2009.”

KINSLER, L. E. et al. *Fundamentals of acoustics*, 4th Edition, 1999.

JARUSZEWSKA, K. et al. *Arac-multibook of architectural acoustics*, Energy Procedia, Elsevier, v. 78.

LONG, M. *Architectural acoustics*. [S.I]: Elsevier, 2005.

Lucas da Silva, Limites Sensoriais Humanos e a Engenharia: Uma ferramenta de demonstração do Mascaramento Sonoro, COBENGE 2010.

FAHY, F. *Engineering Acoustics*, Elsevier, 2001.

DUNN, F. et al. *Springer handbook of acoustics*. [S.I]: Springer, 2015.

BOLT, R.; DOAK, P. *A tentative criterion for the short-term transient response of auditoriums*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 22(4): 507-509, 1950.

ROSSING, T. *Springer handbook of acoustics*. New York: Springer-Verlag, 2007.