

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Departamento de Engenharia Elétrica

Jonatan Dalmonte

**Caracterização Acústica De Salas Através Da
Medição Da Resposta Impulsiva**

Porto Alegre

2013

Jonatan Dalmonte

Caracterização Acústica De Salas Através Da Medição Da Resposta Impulsiva

Trabalho de Conclusão de Curso, realizado com o objetivo de obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Elétrica.

Professor Orientador: Adalberto Schuck Júnior

Porto Alegre

2013

Jonatan Dalmonte

Caracterização Acústica De Salas Através Da Medição Da Resposta Impulsiva

Este Projeto foi julgado adequado para a obtenção dos créditos da Disciplina Projeto de Diplomação do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Adalberto Schuck Júnior

Data da aprovação: ____/____/____

(Adalberto Schuck Júnior, Doutor em Engenharia pela UFRGS)

Data da aprovação: ____/____/____

(Tiarajú Vasconcellos Wagner, Mestre em Engenharia pela UFRGS)

Data da aprovação: ____/____/____

(Roberto Michio Marques Kagami, Engenheiro Eletricista pela UFRGS)

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais Celso e Nelsa e aos meus irmãos Jeferson e Rodrigo.

Agradecimentos

Aos meus pais Celso e Nelsa por serem exemplos de atitude, caráter e me mostrarem os reais valores da vida.

Ao meu irmão Jeferson pelos valerosos conselhos dados durante todo o curso.

Ao meu irmão Rodrigo pelo incondicional apoio durante toda a minha vida.

Ao professor Adalberto Schuck Júnior pela orientação e importante apoio dado durante este trabalho.

À minha namorada Rafaela pelo companheirismo em todas as horas.

Resumo

O crescente aprimoramento tecnológico ocorrido recentemente, principalmente na área de eletrônica analógica e digital, propiciou o desenvolvimento de dispositivos destinados à captação, armazenamento e reprodução de sinais de áudio. Desta forma, medidas que não podiam ser feitas anteriormente, em virtude da limitação dos equipamentos de medidas e de sistemas de processamento, hoje podem ser realizadas.

Métodos desenvolvidos atualmente permitem a avaliação da qualidade acústica de um determinado recinto baseando-se em técnicas de medição e modelagem. Esta avaliação é realizada mediante um conjunto de características acústicas representadas por parâmetros físicos mensuráveis que se relacionam fortemente com as características arquitetônicas do recinto. Estes métodos permitem calcular aproximadamente a resposta impulsiva de uma sala, sendo esta caracterizada por um sistema linear e invariante no tempo, da qual são calculados os parâmetros acústicos para caracterizar objetivamente a qualidade acústica da mesma.

O objetivo principal do trabalho é projetar e implementar um sistema para a medição da resposta impulsiva de uma sala através do método de varredura exponencial de senos e a partir desta calcular os parâmetros acústicos mais relevantes definidos na norma ISO3382.

Palavras chave: resposta impulsiva, varredura de senos, medição acústica.

Abstract

The growing technological improvement occurred recently, especially in the area of analog and digital electronics, has allowed the development of devices for capture, storage and playback of audio signals. Thus, measurements could not be made in the past, due to the limitation of equipment measures and processing systems, can now be realized.

Currently developed methods permit evaluation of the acoustic quality of a place based on measurement techniques and modeling. This evaluation is performed using a set of acoustic characteristics represented by measurable physical parameters that relate strongly to the architectural features of the place. These methods allow approximately calculate the impulse response of a room, which is characterized by a linear and time-invariant system, where from are calculated acoustic parameters to objectively characterize the acoustic quality of this place.

The main objective of this report is to design and implement a system for measuring the impulse response of a room using the exponential sine sweep method and from this calculate the most relevant acoustic parameters defined in the standard ISO3382.

Keywords: impulse response, sine sweep, acoustic measurement.

SUMÁRIO

1. Métodos de medição da resposta impulsiva.....	11
1.1. MÉTODO DIRETO	11
1.2. MÉTODO ESTÁTICO	12
1.3. <i>TIME DELAY SPECTROMETRY</i> (TDS).....	12
1.4. <i>MAXIMUM LENGTH SEQUENCE</i> (MLS)	13
1.5. VARREDURA DE SENOS	13
2. Fundamentos teóricos.....	14
2.1. RESPOSTA IMPULSIVA E RESPOSTA EM FREQUÊNCIA	14
2.2. SISTEMA ACÚSTICO DE UMA SALA	15
2.3. MÉTODO DE VARREDURA EXPONENCIAL DE SENOS.....	15
2.3.1. <i>Sinal de excitação</i>	16
2.3.2. <i>Filtro Inverso</i>	17
2.4. SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	19
2.4.1. <i>Alto-falante</i>	20
2.4.2. <i>Microfone</i>	20
2.4.3. <i>Sistema de reprodução e armazenamento do sinal</i>	21
2.5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	21
2.5.1. <i>Pontos de medição</i>	21
2.5.2. <i>Distância mínima entre fonte e receptor</i>	21
2.5.3. <i>Medição em campo livre</i>	22
2.6. PROCESSAMENTO DOS SINAIS	22
2.6.1. <i>Média Espacial</i>	23
2.6.2. <i>Correção espectral</i>	23
2.6.3. <i>Cálculo da resposta impulsiva</i>	24
2.6.4. <i>Separação da distorção harmônica</i>	24
2.6.5. <i>Filtragem da RI em bandas de frequência</i>	25
2.6.6. <i>cálculoCálculo dos parâmetros acústicos</i>	26
3. Parâmetros acústicos	27
3.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	27
3.2. TEMPO DE DECAIMENTO INICIAL (EDT).....	29
3.3. CLAREZA (CT)	29
3.4. DEFINIÇÃO (DT)	29
3.5. TEMPO CENTRAL (Ts)	30
4. Métodos e materiais.....	31
4.1. BREVE DESCRIÇÃO DO LOCAL DO EXPERIMENTO	31
4.2. GERAÇÃO DO SINAL DE VARREDURA	32
4.3. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	33
4.3.1. <i>Reprodução Sonora</i>	33
4.3.2. <i>Captação sonora</i>	35
4.3.3. <i>Interface de aquisição e geração de áudio</i>	37
4.3.4. <i>Software de aquisição de dados</i>	37
4.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	38
4.4.1. <i>Metodologia de medição</i>	38
4.4.2. <i>Distância mínima</i>	39
4.4.3. <i>Pontos de medição</i>	39
4.4.4. <i>Medição em campo livre</i>	40

4.5.	CÁLCULO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS	42
4.5.1.	<i>Banco de filtros</i>	42
4.5.2.	<i>Correção do atraso de grupo dos filtros</i>	43
4.5.3.	<i>Cálculo dos parâmetros acústicos</i>	44
4.6.	VALIDAÇÃO DO CÁLCULO DOS PARÂMETROS	45
5.	Resultados.....	46
5.1.	MÉDIA ESPACIAL DAS MEDIDAS	46
5.2.	CORREÇÃO ESPECTRAL DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	47
5.3.	RESPOSTA IMPULSIVA	47
5.3.1.	<i>Atraso da RI</i>	49
5.4.	PARÂMETROS ACÚSTICOS	50
5.4.1.	<i>Curvas de decaimento de Schroeder</i>	50
5.4.2.	<i>Parâmetros acústicos calculados</i>	53
5.5.	PARÂMETROS ACÚSTICOS - AURORA	53
6.	Discussão dos resultados	55
6.1.	RESPOSTA IMPULSIVA	55
6.2.	PARÂMETROS ACÚSTICOS	55
6.3.	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE ACÚSTICA DO GINÁSIO	57
	Conclusões	58
	Trabalhos futuros	59
	Referências	60
	Apêndice único.....	62

Introdução

O início do estudo da “acústica de salas” a partir de um ponto de vista formal foi iniciado há 100 anos por Wallace Clement Sabine, deixando para trás conceitos subjetivos tentando substituí-los por parâmetros físicos inerentes à própria sala.

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 [1]. O conceito de RI é hoje em dia largamente aceito como um modelo físico-matemático do comportamento de um sistema LIT [1], caracterizado por apenas uma entrada e uma saída. A RI está associada apenas com uma posição fixa entre fonte e receptor e, portanto, não pode usada para caracterizar a resposta de toda a sala [2].

Mesmo com o grande avanço no desenvolvimento de métodos numéricos que modelam o comportamento de ondas sonoras dentro de locais fechados, estes modelos possuem limitações e incertezas. Por outro lado, a evolução dos processadores e a diminuição do tamanho dos equipamentos permitiram que os métodos experimentais se tornassem relativamente rápidos e muitas vezes mais adequados para tais aplicações. Os métodos de medição mais populares são o Método Direto, Método Estático, *Time Delay Spectrometry* (TDS), *Maximum Length Sequence* (MLS) e a Varredura de Senos Linear ou Exponencial.

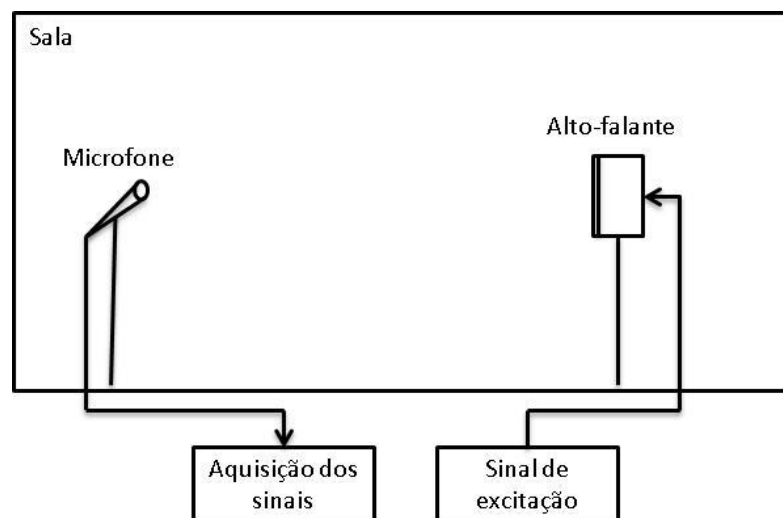
Obtendo a RI de uma sala, é possível calcular uma série de parâmetros que tem a função de quantificar a qualidade acústica deste ambiente. Tal caracterização é de extrema importância para locais onde a qualidade acústica é fundamental como teatros e auditórios. Hoje em dia, a medição da RI é também empregada largamente para gerar filtros de alta qualidade, conhecidos como reverberes de convolução, utilizados para aplicar uma reverberação realista na produção de trilhas sonoras.

O objetivo principal do trabalho é projetar e implementar um sistema para a medição da resposta impulsiva de uma sala através do método de varredura exponencial de senos e a partir desta calcular os parâmetros acústicos mais relevantes definidos na norma ISO3382 [8].

1. Métodos de medição da resposta impulsiva

Atualmente já se desenvolveram muitos métodos de obtenção de resposta impulsiva de salas. De uma maneira geral estes métodos se diferem, essencialmente, pelo tipo de sinais utilizados na excitação da sala e pela forma como é processado o sinal de resposta (tipos de transformada e técnicas de deconvolução) [3]. Com exceção do método direto, a excitação da sala geralmente é empregada através da reprodução de um sinal de banda larga em um alto-falante em vários pontos da sala, e a captura do sinal sonoro se dá através de um microfone, como mostra a figura 1. Neste capítulo, serão feitas descrições breves de alguns dos métodos de medição de RI mais comuns.

Figura 1 – Cadeia típica de medição de RI



1.1. Método Direto

O método direto consiste em gerar um sinal sonoro com característica impulsiva para excitar o ambiente, como disparos de pistolas ou estouro de balões. Ao utilizar este método obtém-se diretamente a RI da sala, porém, sabe-se que um impulso é um sinal teórico e, portanto, é impossível obtê-lo na prática. Ao utilizar tal sinal, devemos conhecer seu espectro para posteriormente corrigir o espectro da resposta obtida de forma a minimizar um possível erro sistemático. Outro aspecto desfavorável deste método é a baixa repetibilidade da fonte sonora, que pode ser

minimizada ao se gerar um impulso digitalmente e reproduzi-lo em um alto-falante por meio de um conversor digital-analógico, porém alto-falantes geralmente possuem respostas não lineares, que se tornam críticas acima de certa intensidade sonora [2].

1.2. **Método estático**

O método estático corresponde em excitar a sala com um sinal senoidal proveniente de um alto-falante e variar sua frequência passo-a-passo de forma a obter a resposta da sala para cada frequência de excitação. A função de transferência é obtida dividindo-se a amplitude da senóide recebida pela amplitude da senóide enviada nas diversas frequências. Para maximizar a relação sinal-ruído deste método é recomendando que se programem filtros digitais passa-faixa na frequência que se está medindo. Porém, esse procedimento torna o método trabalhoso e alguns erros podem ser acrescentados aos valores medidos devido a imprecisão do cálculo do ganho do filtro na faixa de passagem.

1.3. ***Time Delay Spectrometry (TDS)***

Neste método o sinal de excitação sonoro consiste em uma senóide que tem sua frequência variando linearmente com o tempo. O sinal de resposta é, então, multiplicado pelo sinal do gerador e por uma versão defasada em 90° , assim as partes real e imaginária da função de transferência complexa podem ser obtidas [4]. Neste método, deve-se compensar o atraso da propagação do som do auto falante até o microfone provocando um retardo ajustável no sinal do gerador antes de chegar ao multiplicador. Ao final das multiplicações o sinal deve passar por um filtro passa baixas de modo que o resultado das multiplicações resultantes entre dois sinais defasados no tempo seja atenuado. A varredura linear possui um espectro branco, o que implica na maioria dos casos numa baixa relação sinal-ruído na região dos graves, já que o sinal fica a maior parte do tempo na região dos agudos [2]. Este método apresenta algumas desvantagens como lentidão, baixa relação sinal ruído em baixas frequências, porém apresenta insensibilidade á distorções e à variância no tempo [4].

1.4. **Maximum Length Sequence (MLS)**

Este método consiste em excitar o ambiente com um sinal de banda larga que utiliza sinais pseudoaleatórios. Este sinal consiste em uma sequência binária onde o tempo em que os níveis lógicos ocorrem varia com o tempo. Estes sinais são usualmente gerados por um *software*, convertidos para a forma analógica e reproduzidos por um alto-falante. A resposta impulsiva da sala é calculada a través da transformada rápida de Hadamard. Dentre os métodos que utilizam ruídos como sinal de excitação sonora, este é o que fornece a melhor SNR [5]. Este método é bastante popular, sendo atualmente o mais utilizado em todo o mundo, porém é bastante vulnerável à não linearidade do meio, tornando seu uso desaconselhável para medição de grandes espaços abertos[2].

1.5. **Varredura de senos**

Este método consiste em utilizar varreduras senoidais como sinal de excitação sonora. A varredura senoidal consiste variar a frequência instantânea da senóide ao longo do tempo, partindo de uma frequência inicial, tipicamente 20Hz, até uma frequência final, geralmente 20kHz. As formas de varreduras mais utilizadas são a linear e a logarítmica ou exponencial, e se diferenciam pela taxa de variação com que a frequência é aumentada ao longo do tempo. Neste método a resposta impulsiva é obtida dividindo o espectro do sinal medido pelo espectro do sinal gerado. Este método é pouco susceptível a não linearidades e possui uma ótima relação sinal-ruído, principalmente nas baixas frequências [3], sendo, por estes motivos, o método escolhido para este trabalho.

2. Fundamentos teóricos

Neste capítulo falaremos sobre o conceito de resposta impulsiva e resposta em frequência. Em seguida será descrito o método de varredura exponencial de senos, o qual foi escolhido para ser aplicado ao experimento descrito no capítulo seguinte. Trataremos de questões referentes à cadeia de medição utilizada, à geração e aquisição do sinal e ao processamento dos dados.

2.1. Resposta impulsiva e resposta em frequência

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 2.



Matematicamente, a saída do sistema é dada pela seguinte expressão

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau = x(t) * h(t). \quad (1)$$

Sendo $x(t) = \delta(t)$, a saída resulta em

$$y(t) = \delta(t) * h(t) = h(t) \quad (2)$$

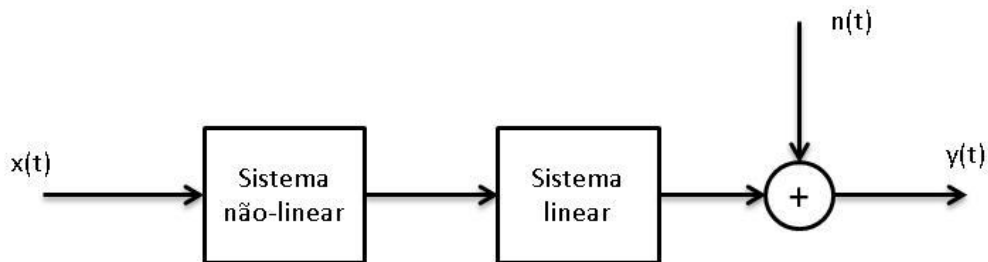
A resposta em frequência do sistema é a transformada do Fourier da função $h(t)$ dada por

$$H(j\omega) = \mathcal{F}\{h(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

2.2. Sistema acústico de uma sala

Apesar de na prática a sala ser tratada como sistemas LIT, um sistema acústico real é composto, além da parte linear, por uma parte não linear. Além disso, há ruídos atuando como entrada externa, representados pelo sinal $n(t)$, modificando o sinal de saída do sistema $y(t)$, como mostra a figura 3.

Figura 3 – Diagrama real do sistema acústico de uma sala



2.3. Método de varredura exponencial de senos

Este método se particulariza por utilizar uma varredura senoidal cuja frequência instantânea varia exponencialmente com o tempo para a excitação sonora da sala. Para sua aplicação é necessário utilizar um alto-falante para gerar o sinal dentro da sala e um microfone para captar o sinal modificado pela sala. Para obter a RI, o sinal medido deve ser convoluido com um filtro apropriado que será descrito em breve.

Como umas das principais vantagens, este método proporciona uma boa rejeição dos efeitos não lineares e apresenta uma melhor relação sinal ruído para baixas frequências frente ao método de varredura linear [6]. Esta melhora 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.

2.3.1. Sinal de excitação

O sinal de excitação do ambiente deve variar sua frequência exponencialmente ao longo do tempo. Sendo $x(t)$ a representação matemática do sinal de excitação no domínio tempo, para gerar tal varredura, a expressão genérica no domínio tempo deve ser [6]:

$$x(t) = \text{sen} [\theta(t)] = \text{sen} \left[K \cdot \left(e^{\frac{t}{L}} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

A frequência instantânea $\omega(t)$ é dada pela derivada do argumento $\theta(t)$ de $x(t)$. Sendo ω_1 a frequência no tempo zero e ω_2 a frequência no tempo T (duração do sinal), temos as seguintes expressões:

$$\omega_1 = \frac{d \left[K \cdot \left(e^{\frac{t}{L}} - 1 \right) \right]}{dt} \quad , \text{para } t = 0; \quad (5)$$

$$\omega_2 = \frac{d \left[K \cdot \left(e^{\frac{t}{L}} - 1 \right) \right]}{dt} \quad , \text{para } t = T; \quad (6)$$

As equações (5) e (6) nos remetem a um sistema, no qual os valores extraídos para K e L são

$$K = \frac{T \cdot \omega_1}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \quad (7)$$

$$L = \frac{T}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \quad (8)$$

Substituindo as expressões (7) e (8) em (4), obtemos

$$x(t) = \text{sen} \left[\frac{T \cdot \omega_1}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \cdot \left(e^{\frac{t}{T} \ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} - 1 \right) \right]. \quad (9)$$

A frequência instantânea $\omega(t)$ do sinal é dada por

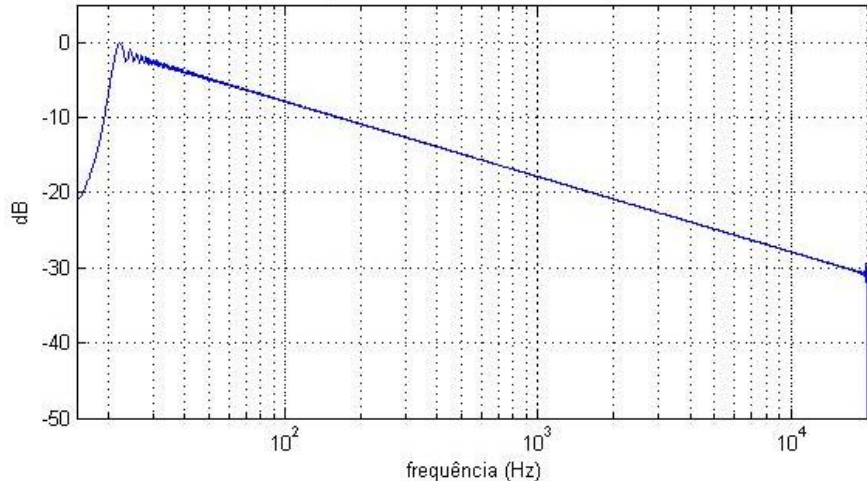
$$\omega(t) = \frac{d[\theta(t)]}{dt} = \frac{\frac{T \cdot \omega_1}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \cdot \frac{t}{T}}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \cdot e^{\frac{t}{T}} \cdot \ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \quad (10)$$

Sendo k , uma constante de proporcionalidade, a expressão da energia em função da frequência é dada por [7]

$$E(j\omega) = k \frac{L^2}{\frac{T \cdot \omega_1}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)}} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right) + j\omega} \quad (11)$$

Ao analisar a expressão (11) percebemos que a energia do sinal decai com um fator $\frac{1}{\omega}$, ou seja, a cada oitava há um decaimento de -3dB, como pode ser visto na figura 4, que mostra o espectro do sinal $x(t)$.

Figura 4– Espectro do sinal de excitação



2.3.2. Filtro Inverso

O filtro inverso é definido como um sinal que deve ser convoluido com o sinal medido de forma a compensar o decaimento -3 dB por oitava do sinal de excitação, como demonstrado na equação (11). Para projetar o filtro inverso $r(t)$,

primeiramente se deve inverter no tempo o sinal de excitação $x(t)$ de forma que a frequência instantânea no início e no final do sinal seja ω_2 e ω_1 , respectivamente. A seguir, para obter um espectro com a amplitude crescendo a uma taxa de +3 dB por oitava, como ilustra a figura 6, aplica-se um decaimento exponencial ao longo do tempo ao sinal invertido do tempo, resultando em

$$r(t) = \omega_1 \cdot \left(\frac{K}{L} \cdot e^{\frac{t}{L}}\right)^{-1} \quad (12)$$

onde as constantes K e L foram calculadas no item 2.3.1.

A resposta impulsiva, janelada entre 15 e 20 segundos, de um filtro inverso para um sinal de excitação com duração T de 20 segundos pode ser visto na figura 5. A resposta em frequência deste filtro pode ser vista na figura 6, onde se pode ver um crescimento de +3 dB por oitava na sua amplitude.

Figura 5 – Resposta impulsiva do filtro inverso janelada entre 15 e 20 segundos

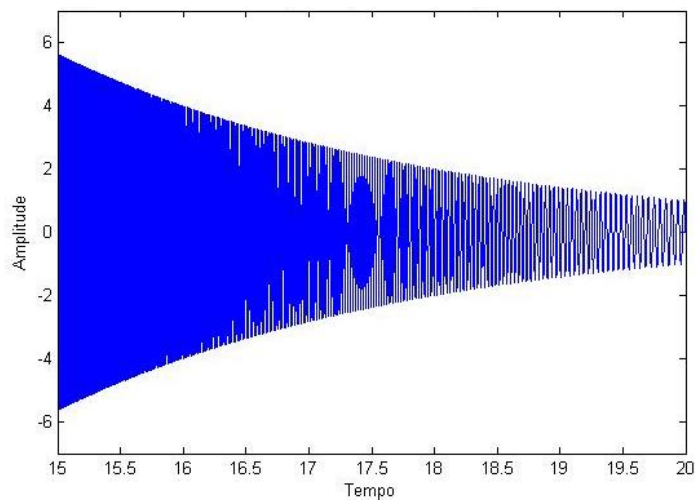
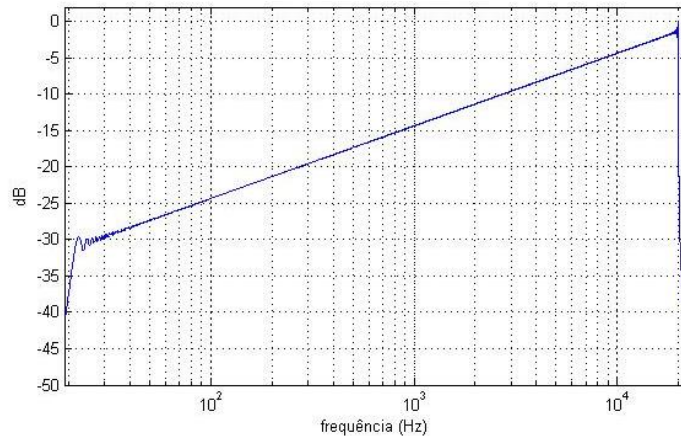


Figura 6 – Resposta em frequência do filtro inverso

2.4. Sistema de medição

A arquitetura do sistema de medição acústico pode ser descrita basicamente por três módulos principais, como ilustra a figura 7. O primeiro módulo é responsável pela geração, armazenamento e processamento dos sinais, que inclui o cálculo da RI e dos parâmetros acústicos, os quais são efetuados por um microcomputador. O segundo módulo, responsável pela reprodução e aquisição de sinais sonoros, é implementado por uma placa de áudio. O terceiro bloco é responsável pela conversão eletroacústica formada por transdutores de recepção (microfone) e transmissão (alto-falante) dos sinais sonoros. Se os sinais são gerados e armazenados em sistemas digitais, o segundo módulo deve possuir conversores digitais - analógico e analógicos-digital.

Figura 7 – Arquitetura do sistema de medição

2.4.1. Alto-falante

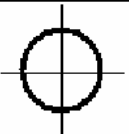
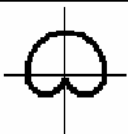
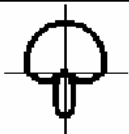

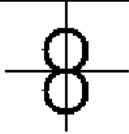
Para transformar sinal elétrico em um sinal sonoro, é necessário que se utilize um transdutor de transmissão, como por exemplo, um alto-falante. A medição da resposta impulsiva de uma sala deve ser realizada usando-se alto-falantes omnidirecionais [8]. Para que os dados experimentais colhidos nas medições sejam adequados para a obtenção da resposta impulsiva, as fontes de excitação devem produzir sinais com energia suficiente para que a razão sinal-ruído seja elevada em toda a gama de frequências de interesse [3].

Alto-falantes geralmente possuem respostas não lineares, que se tornam críticas acima de certa intensidade sonora, limitando a energia do sinal de excitação a ser usado. Logo, tem-se aqui uma relação de compromisso entre a linearidade do sistema e a relação sinal-ruído [2].

2.4.2. Microfone

A medição da resposta impulsiva de uma sala deve ser realizada com microfones omnidirecionais [8]. Estes transdutores captam com a mesma intensidade os sinais sonoros provenientes de todas as direções. Diferentemente deste, microfones que possuem padrão polar do tipo cardioide, super-cardioide, hyper-cardioide e bidirecionais privilegiam a captação sonora em certas direções, como pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1 – Padrões de resposta polar de microfones.

Característica	Omnidirecional	Cardióide	Super-cardióide	Hyper-cardióide	Bi-direcional
Padrão de resposta polar					

Fonte: Cysne, 2000 [9]

2.4.3. Sistema de reprodução e armazenamento do sinal

Para que o sinal sonoro seja reproduzido pelo alto-falante, é necessário que o mesmo encontre-se armazenado na memória de algum dispositivo de reprodução de áudio. Da mesma forma necessita-se também de um sistema de armazenamento de dados para guardar os sinais adquiridos pelo microfone.

Para este método, é muito importante que o sistema consiga gerar e adquirir os sinais ao mesmo tempo, pois, para o posterior processamento é necessário que se saiba exatamente o início da excitação sonora.

2.5. Procedimento experimental

2.5.1. Pontos de medição

Ao escolher um ponto da sala para emitir e adquirir o sinal de varredura sabe-se que este ponto não representa a resposta completa de toda a sala. A medição da RI de uma sala deve ser realizada em um mínimo de dezoito posições distintas [8], sendo estas escolhidas de forma a obter a maior cobertura possível.

Ao realizar varias medidas sequencialmente, deve-se tomar cuidado para que o tempo de reverberação da sala não seja maior que o intervalo de tempo entre as medições, pois esse fato acarreta *aliasing* temporal e altera significativamente a resposta obtida.

2.5.2. Distância mínima entre fonte e receptor

A posição do microfone não deve ficar muito próxima á fonte de som de forma a não permitir uma grande influência do som direto [8]. A distância mínima d_{min} entre fonte e receptor é dada pela seguinte equação [8]:

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{cT_{60}}} \quad (13)$$

onde V é o volume da sala em m^3 , c é a velocidade do som em m/s e T_{60} é o tempo de reverberação estimado da sala. Esta distância não pode ser um valor inferior a 1,5 m [8].

Em salas pequenas com tempos de reverberações pequenos, é recomendado que se coloque uma barreira, com absorção sonora desprezível, entre a fonte e o receptor.

2.5.3. Medição em campo livre

De forma a obter a função de transferência do sistema de medição, é recomendado que faça uma medida em campo livre, ou seja, sem a influência da resposta da sala. Tal medida geralmente é obtida gerando e captando o sinal de excitação em salas anecóica (sem reverberação) e é utilizada posteriormente para gerar um filtro que compensa a resposta em frequência dos equipamentos envolvidos. Sendo $x'(t)$ o sinal a ser reproduzido pelo alto-falante e $y'(t)$ o sinal medido pelo microfone em um campo livre (ambiente sem barreiras sonoras), a resposta em frequência $H_S(f)$ da cadeia de equipamentos (conversor D/A, alto-falante, microfone e conversor A/D) é dada pela equação

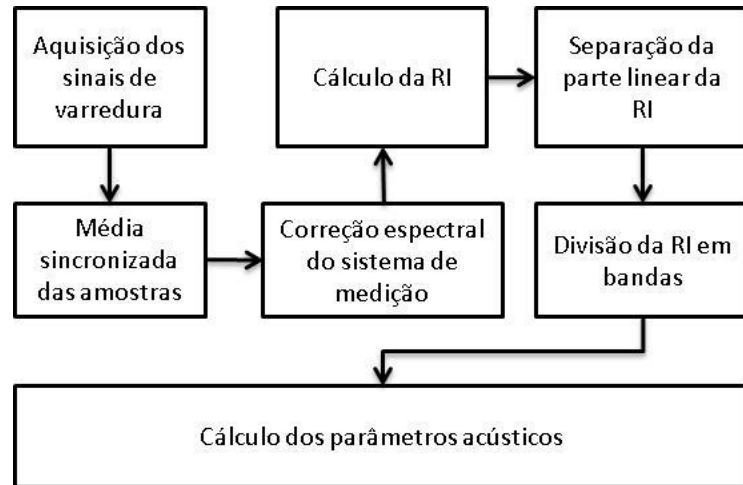
$$H_S(f) = \frac{Y'(f)}{X'(f)} \quad (14)$$

onde $Y'(f)$ e $X'(f)$ são o módulo da transformada de Fourier dos sinais $x'(t)$ e $y'(t)$, respectivamente.

2.6. Processamento dos sinais

Como pode ser visto na figura 8, para obtenção da RI e dos parâmetros acústicos, os sinais devem ser processados na seguinte ordem: média temporal sincronizada das amostras em obtidas nos pontos distintos da sala, correção espectral do sistema de medição, obtenção da RI utilizando o filtro inverso, separação da resposta linear e divisão da RI em bandas de frequência. Após estes procedimentos os parâmetros acústicos podem ser calculados.

Figura 8 – Processamento dos sinais



2.6.1. Média Espacial

Uma vez que os vários pontos medidos dentro da sala serão considerados entre si como tendo características de reverberação semelhantes, e o sinal obtido está sincronizado com o sinal emitido (latência desprezível), ao se fazer a média sincronizada das respostas obtidas se está somando as características de reverberação de todos os pontos de modo a representar a espacialidade da sala apenas por uma resposta impulsiva. Assumindo que $y_k(t)$ é a resposta obtida na k -ésima medição, a média das amostras é dada por

$$\bar{y}(t) = \sum_{n=1}^k \frac{y_k(t)}{k}. \quad (15)$$

2.6.2. Correção espectral

Para efetuar a correção deve-se multiplicar o espectro do sinal obtido a partir da média dos sinais por um filtro de correção $H_C(f)$, cuja resposta em frequência é dada por

$$H_C(f) = \frac{1}{H_S(f)} \quad (16)$$

onde $H_s(f)$ é o espectro do sistema de medição, obtido através da medida realizada em campo livre, como explicado no item 2.5.3.

Sendo $\bar{Y}(f)$ a transformada de Fourier da média dos sinais medidos dentro da sala, o espectro da resposta corrigida $Y_c(f)$ é dado por

$$Y_c(f) = \bar{Y}(f) \cdot H_s(f). \quad (17)$$

2.6.3. Cálculo da resposta impulsiva

De forma a obter a RI, devemos convoluir o sinal medido com filtro inverso $r(t)$, descrito matematicamente no item 2.3.2.

Sendo $\bar{Y}_c(f)$ o espectro médio corrigido das respostas obtidas dentro da sala e $R(f)$ o espectro do filtro inverso, a função de transferência da sala $H(f)$ é obtida por

$$H(f) = \bar{Y}_c(f) \cdot R(f). \quad (18)$$

Então, a resposta impulsiva $h(t)$ pode ser obtida a partir da transformada inversa de Fourier de $H(f)$.

Como demonstrado no item 2.3.1, o espectro de $x(t)$ não é constante e a medida obtida no interior da sala deve ser corrigida. O filtro $R(f)$ deve realizar tal compensação.

2.6.4. Separação da distorção harmônica

O método de varredura exponencial de senos permite que no processo de deconvolução da RI da sala seja possível separar temporalmente as componentes de distorção harmônica geradas durante o processo de medida. Tais distorções geralmente são geradas pela resposta não linear da sala, dos amplificadores e dos transdutores.

A equação (10) mostra que a frequência instantânea do sinal $x(t)$ é dada pela derivada do seu argumento $\theta(t)$. Se uma componente harmônica de ordem N está

deslocada temporalmente por um intervalo Δt da sua componente fundamental, podemos obter que

$$N \cdot \frac{d}{dt} [\theta(t)] = \frac{d}{dt} [\theta(t + \Delta t)]. \quad (19)$$

Substituindo o valor de $\theta(t)$ pelo argumento equivalente da equação (9), obtemos

$$N \cdot \frac{d}{dt} \left[\frac{T \cdot \omega_1}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \cdot \left(e^{\frac{t}{T} \ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} - 1 \right) \right] = \frac{d}{dt} \left[\frac{T \cdot \omega_1}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \cdot \left(e^{\frac{t+\Delta t}{T} \ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} - 1 \right) \right]. \quad (20)$$

Isolando Δt , encontramos

$$\Delta t = T \cdot \frac{\ln(N)}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)}. \quad (21)$$

Como pode ser visto o valor de Δt é constante para uma determinada componente harmônica e cada ordem de harmônico será separada temporalmente da sua componente fundamental [6].

As componentes harmônicas aparecem no fim da resposta impulsiva se ela for calculada utilizando convolução periódica, ou seja, multiplicando o espectro dos sinais e posteriormente calculando a transformada inversa de Fourier do resultado [10]. Se for empregada uma convolução linear, estas componentes aparecem em tempos anteriores à RI [10], porém, este cálculo exige um numero elevado de operações matemáticas o que torna o processo demorado para um vetor com um numero grande pontos.

2.6.5. Filtragem da RI em bandas de frequência

Para que se efetue o cálculo por faixa de frequência dos parâmetros acústicos, tratados no capítulo 3, é necessário que se filtre o espectro da RI em bandas de frequência. Geralmente, para aplicações em áudio, esta divisão é feita

em oitavas nas frequências de 31Hz, 62,5Hz, 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz, 8kHz e 16kHz.

2.6.6. cálculoCálculo dos parâmetros acústicos

Após os processos demonstrados nos itens anteriores, os parâmetros acústicos podem ser calculados. O cálculo dos parâmetros é efetuado para cada banda de frequência. O capítulo 3 trata em detalhes o equacionamento e o significado de cada parâmetro.

3. Parâmetros acústicos

Os parâmetros acústicos são calculados a partir da resposta impulsiva $h(t)$ obtida experimentalmente. Para obter os parâmetros relacionados à uma faixa de frequência, deve-se efetuar o cálculo utilizando a RI filtrada na banda de interesse. Tal banda será definida no projeto do banco de filtros em oitavas, descrito anteriormente no item 2.6.5. De forma geral, os parâmetros podem ser divididos em critérios de tempo e de energia, e estão associados à forma como a energia sonora evolui ao longo tempo dentro da sala [3].

A norma ISO3382 [8] recomenda que a determinação do ponto inicial da RI seja no ponto de 20 dB abaixo do valor máximo da RI de banda larga, portanto este procedimento deve ser feito antes da filtragem da RI em bandas de oitava.

O processamento envolvido no cálculo dos parâmetros acústicos é efetuado após os processos de correção espectral do sistema de medição, remoção da parte não linear e divisão da RI em bandas de oitava.

Neste capítulo será descrito o significado acústico e a formulação matemática dos parâmetros que são considerados, atualmente, os mais relevantes para a caracterização acústica de salas [3].

3.1. Tempo de Reverberação

É o tempo, expresso em segundos, que seria necessário para que o nível de pressão sonora diminua 60 dB, a uma velocidade de decaimento dada pela regressão linear dos mínimos quadrados da curva medida a partir do nível de 5 dB abaixo do nível inicial até 35 dB abaixo do nível inicial [8].

Uma vez que o cálculo do T60 é baseado num decaimento exponencial, não é necessário que o sinal medido tenha uma faixa dinâmica de 60 dB. Utilizando uma escala de decibéis normalizada, basta obter a inclinação do decaimento e extrapolá-la até -60 dB [8]. Entre os métodos existentes para a obtenção da curva de decaimento, o mais utilizado é o método de integração de Schroeder.

3.1.1. Curva de decaimento de Schroeder

A partir do método de integração de Schroeder, podemos obter a curva de decaimento da resposta impulsiva medida. A curva de decaimento $E(t)$ é obtida pelo processo de integração inverso do quadrado da resposta impulsiva $h(t)$, como pode ser verificado na expressão

$$E(t) = \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau = \int_{\infty}^t h^2(-\tau) d(-\tau) \quad (22)$$

onde o limite t da integral corresponde ao início da resposta. O limite ∞ equivale ao caso ideal em que não existe ruído de fundo e a resposta impulsiva terminaria no infinito. Numa situação real este limite existe e é definido como o ponto 10 dB acima do ponto de cruzamento entre a RI e o ruído [8], pois dessa forma, se obtém um decaimento mais uniforme e monotonamente decrescente ao longo do tempo.

3.1.2. T20 e T30

Define-se T30 como a extrapolação para 60dB da taxa de decaimento obtida por meio de regressão linear da curva de decaimento no intervalo de -5dB a -35dB, assim como pode-se calcular o T20 da mesma maneira utilizando o intervalo de -5dB a -25dB.

Para evitar influência excessiva da energia do ruído, deve-se garantir que o nível de energia do mesmo está no mínimo 5dB abaixo do limite do intervalo considerado, ou seja, é necessário que o sinal apresente uma faixa mínima dinâmica de 40dB.

Devido a atrasos de propagação do sistema, principalmente por causa do tempo que o som leva para ir do alto-falante ao microfone, o som direto não chega exatamente no início da medição da RI [2]. A norma ISO 3382 [8] recomenda que o início do som direto deva ser determinado a partir da resposta impulsiva de banda larga, como o ponto onde o sinal é significativamente maior que o ruído de fundo, e é 20dB menor que valor máximo da RI.

3.2. Tempo de Decaimento Inicial (EDT)

Assim como o tempo de reverberação, este parâmetro se relaciona diretamente com a curva de decaimento. Sua diferença para o tempo de reverberação é que o EDT considera os primeiros 10dB de decaimento da curva (de 0dB a -10dB).

Apesar de muito similares, o EDT está mais ligado à reverberação percebida pelo ouvinte, enquanto que o tempo de reverberação está mais ligado às propriedades físicas da sala [2]. O EDT, por ser medido logo nos primeiros instantes do decaimento da pressão sonora, torna-se um parâmetro bastante robusto às variações do campo difuso e a situações de grande ruído de fundo sendo, portanto, preferido na determinação da reverberação de recinto com público presente [11].

3.3. Clareza (Ct)

Este parâmetro é uma razão logarítmica entre o nível de energia recebida no princípio e no término do som. Ele deve ser calculado com limite de 50 ms quando se trata de salas para palavra ou 80ms quando se trata de salas para música [2]. A clareza pode ser obtida por

$$C_t = 10 \cdot \log \frac{\int_0^t h^2(\tau) d\tau}{\int_t^\infty h^2(\tau) d\tau} [dB] \quad (23)$$

Este parâmetro está relacionado com a clareza e definição do som recebido pelo ouvinte, ou o balanço entre clareza e reverberação. Um valor elevado de Ct corresponde à sensação de clareza do som.

3.4. Definição (Dt)

Este parâmetro é uma razão logarítmica entre o nível de energia recebida no princípio do som e a energia total do som. Dependendo da finalidade da sala, ele pode ser medido com $t=50ms$ ou $80ms$, chamados de D50 ou D80, respectivamente. A definição pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$D_t = 10 \cdot \log \frac{\int_0^t h^2(\tau) d\tau}{\int_0^\infty h^2(\tau) d\tau} [dB] \quad (24)$$

Este parâmetro é diretamente relacionado com a clareza por

$$C_t = 10 \cdot \log \left(\frac{D_t}{1-D_t} \right) [dB] \quad (25)$$

3.5. Tempo Central (Ts)

Este parâmetro corresponde ao centro de gravidade da RI. Seu valor é dado em milissegundos. Um valor pequeno equivale a dizer que a energia do sinal está concentrada em seu início, o que fornece uma sensação de clareza, enquanto um valor elevado indica que a energia do sinal está mais espalhada, fornecendo a sensação de um som mais reverberante. O tempo central é calculado por

$$T = \frac{\int_0^\infty t \cdot h^2(t) dt}{\int_0^\infty h^2(t) dt} [ms]. \quad (26)$$

4. Métodos e materiais

Neste capítulo será detalhada a aplicação do método de varredura exponencial de senos em uma sala escolhida, mencionando as características do ambiente mensurado, os equipamentos utilizados na medição e o procedimento experimental aplicado.

4.1. Breve descrição do local do experimento

A sala escolhida para medição foi o Ginásio de esportes do Colégio Vicente de Carvalho, da cidade de Dois Lajeados, pois, além da prática de esportes, é utilizado em atividades variadas como palestras e apresentações musicais. Este local apresenta uma área total de aproximadamente 720 m² e um volume aproximado de 5700 m³. Tendo em vista que não há revestimento acústico interno, a reverberação do local, avaliada subjetivamente, é dada com sendo alta, sendo muitas vezes problemática para certos tipos de atividades como palestras e apresentações musicais. A figura 9 mostra uma imagem interna do local.

Figura 9 - Imagem interna do local utilizado para caracterização acústica



4.2. Geração do sinal de varredura

O sinal de varredura, demonstrado matematicamente no item 2.3.1, foi gerado em forma de vetor através do *software* Matlab 6.0 e exportado do mesmo, utilizando a função “*wavwrite*”, como um arquivo de formato “.wav” com resolução de 24 bits e taxa de amostragem de 44100 Hz. O tempo de duração (T) escolhido para varredura foi de 20 segundos. As frequências inicial f_1 e final f_2 escolhidas foram 20 Hz e 20kHz, respectivamente, pois dentro desta faixa de frequência encontra-se a capacidade humana de percepção sonora. Dessa forma, a expressão final para o sinal $x(t)$ é dada por

$$x(t) = \text{sen} \left[\frac{20 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1}{\ln\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_2}{2 \cdot \pi \cdot f_1}\right)} \cdot \left(e^{\frac{t}{20} \ln\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_2}{2 \cdot \pi \cdot f_1}\right)} - 1 \right) \right]. \quad (27)$$

A forma de onda do sinal $x(t)$, janelada nos primeiros 5 segundos, pode ser vista na figura 10. O espectro do sinal de varredura $x(t)$ pode ser visto na figura 11.

Figura 10 – Janela dos primeiros 5 segundos do sinal de varredura utilizado na medição

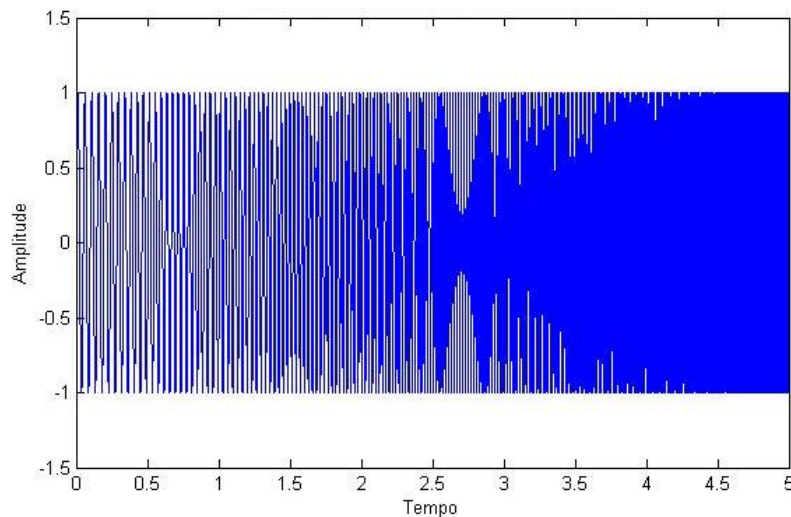
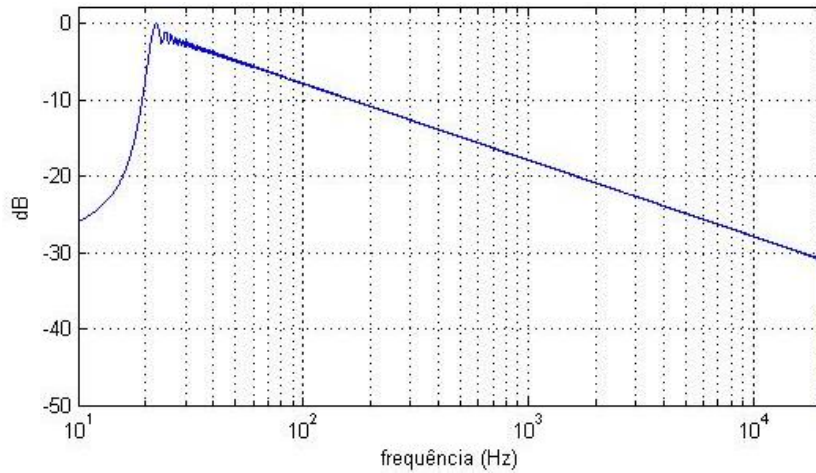


Figura 11 – Espectro do sinal de varredura utilizado na medição

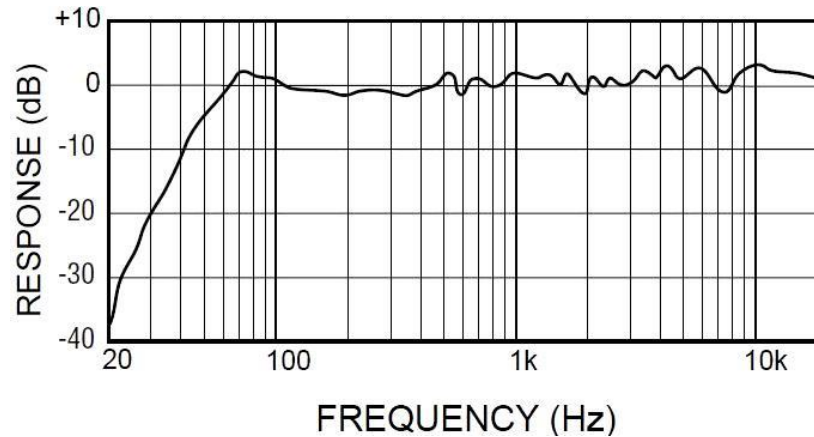
4.3. Equipamentos utilizados

Neste item serão listados os equipamentos utilizados para realizar a medição como também serão descritas as suas características mais relevantes para esta aplicação.

4.3.1. Reprodução Sonora

Para reprodução de sinais sonoros, utilizou-se um monitor de áudio Yamaha HS80. Este equipamento possui potência uma total de 120 Watts. Além de ser um equipamento de propriedade do autor deste trabalho, este equipamento foi escolhido, pois possui amplificadores próprios internos, e apresenta uma resposta em frequência de característica aproximadamente constante, como pode ser visto na figura 12.

Figura 12 – Resposta em frequência do monitor de áudio Yamaha HS80.



Fonte: Manual de instruções Yamaha HS80 [12].

Para aumentar a potência sonora gerada dentro da sala e aumentar o espalhamento do som no espaço, utilizou-se outra caixa igual posicionada na mesma altura da primeira, porém na direção oposta, como ilustrado na figura 13. Como suporte às caixas utilizou-se um tripé com altura de 1,75 cm, como mostrado na figura 14.

Figura 13 - Ilustração da posição dos monitores em vista superior

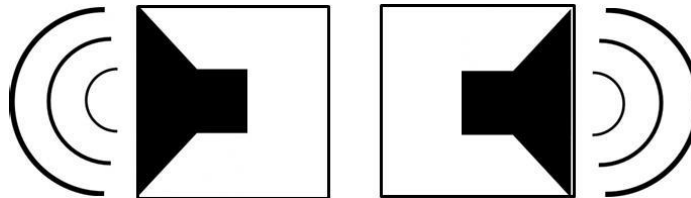


Figura 14 – Dispositivo de geração dos sinais



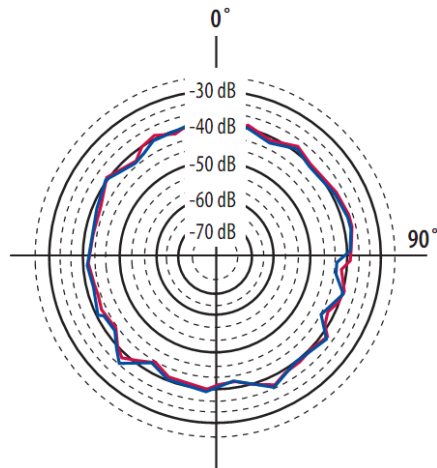
4.3.2. Captação sonora

Como transdutor de pressão sonora utilizou-se um microfone da marca Behringer, modelo ECM8000, ilustrado na figura 15. Este microfone foi escolhido para a medição, pois é do tipo capacitivo, possui alta sensibilidade e apresenta característica omnidirecional, a qual pode ser visto na figura 16. Esta característica é de fundamental importância para a aplicação. Este transdutor possui uma resposta em frequência aproximadamente constante na faixa de 15 Hz a 20kHz, como mostra a figura 17.

Figura 15 – Microfone Behringer ECM8000

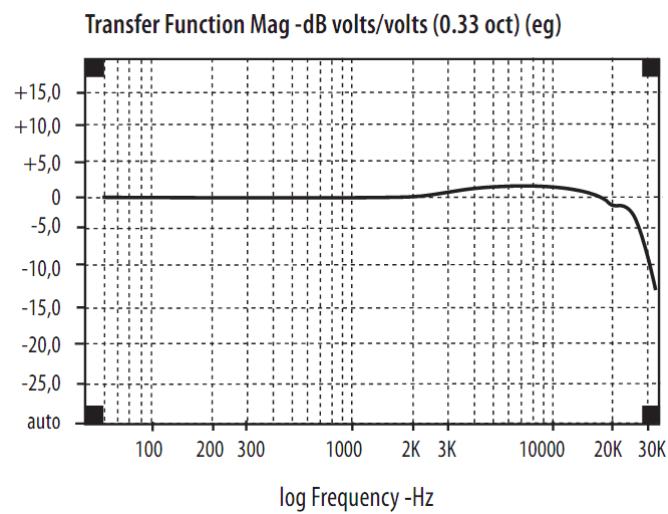


Figura 16 – Padrão polar do microfone Behringer ECM8000



Fonte: Measurement Condenser Microphone Ecm8000 Technical Specifications [13].

Figura 17 – Resposta em frequência do microfone Behringer ECM8000



Fonte: Measurement Condenser Microphone Ecm8000 Technical Specifications [13].

4.3.3. Interface de aquisição e geração de áudio.

Para gerar os sinais de excitação e adquirir os sinais da resposta da sala utilizou-se uma placa de áudio M-Audio modelo Fast Track-Pro, ilustrada na figura 18. Esta placa possui interface USB para comunicação com um computador, duas entradas analógicas, balanceadas ou não, e quatro saídas analógicas não balanceadas.

Os conversores digital-analógicos e analógico-digitais presentes nesta placa possuem resolução de até 24 bits e podem operar com taxas de até 48k amostras por segundo. Para esta aplicação os dados foram amostrados com resolução de 24 bits e com uma taxa de 44100 amostras por segundo.

Esta placa apresenta pré-amplificadores internos, sendo esta característica muito útil quando se deseja ajustar o ganho do sinal que irá ser amostrado.

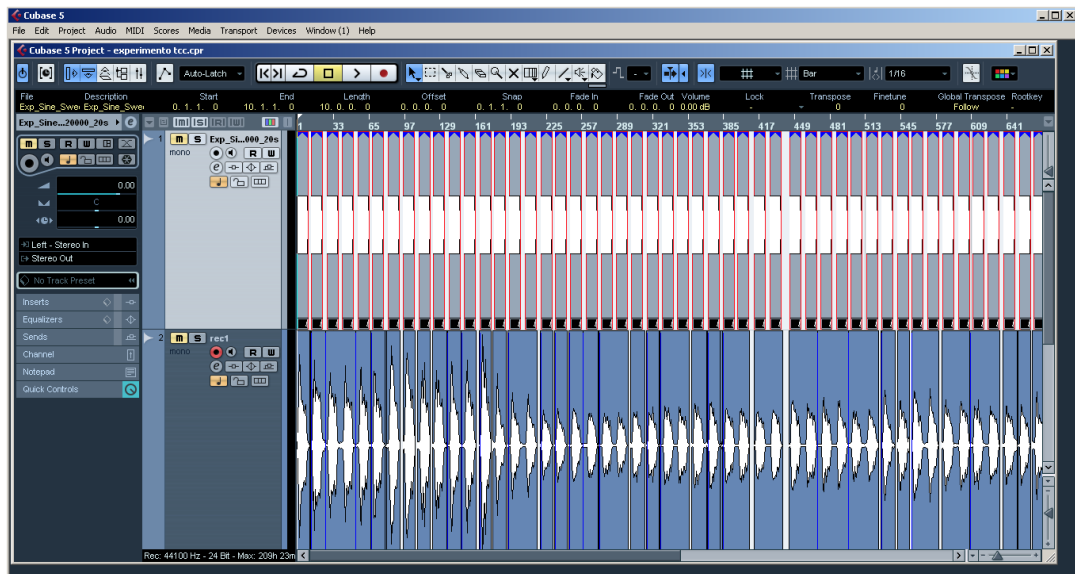
Figura 18 – Interface de áudio M-Audio Fast Track-Pro



4.3.4. Software de aquisição de dados

Para aquisição dos dados utilizou-se o *software* Cubase 5, por ter uma ótima interface para visualização e edição dos sinais adquiridos, como pode ser visto na figura 19, além de possuir ferramentas que permitem a sincronização temporal de dados, importante no processo de geração consecutiva dos sinais.

Figura 19 – Tela de Interface do *software* Cubase



4.4. Procedimento experimental

Neste subcapítulo serão descritas as atividades realizadas no procedimento experimental. Dentre elas citaremos as informações referentes à localização das medidas dentro da sala, ao cálculo da distância mínima entre o par fonte-receptor e à medição em campo livre.

4.4.1. Metodologia de medição

O procedimento empregado nesta medição baseia-se no fato de que um sistema qualquer responde a um determinado sinal de entrada de acordo com suas propriedades intrínsecas, alterando a resposta do sinal ao qual foi submetido. Desta forma, ao se gerar um sinal sonoro conhecido dentro de uma sala, o sinal mensurado deve conter as características do sinal gerado mais as características do sistema.

Se existir diferentes dispositivos no percurso deste sinal, cada dispositivo pode ser considerado um sistema em separado que, quando encadeados, formam um sistema como um todo. A resposta deste último pode então ser medida em um campo livre, com a finalidade de posteriormente ser criado um processo de filtragem

de forma a compensar a resposta dos diversos sistemas existentes na cadeia de medição.

Assim, conhecendo o sinal de entrada do sistema, e sendo ele de característica impulsiva, é possível calcular a RI do sistema a partir da medição da resposta do sistema a este sinal.

4.4.2. Distância mínima

Como mostrado no item 2.5.2, a distância mínima entre a fonte e o receptor é dada pela equação (13). Admitindo-se que a velocidade do som é 344 m/s e o tempo de reverberação estimado para o local é de 1s, a equação somente depende do volume da sala. As dimensões aproximadas da sala são de 34, 21 e 7,5 metros de comprimento, largura e altura, respectivamente. Então, a distância mínima é dada por

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{cT_{60}}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{34 \cdot 21 \cdot 7,5}{344 \cdot 1,5}} \quad (28)$$

resultando em

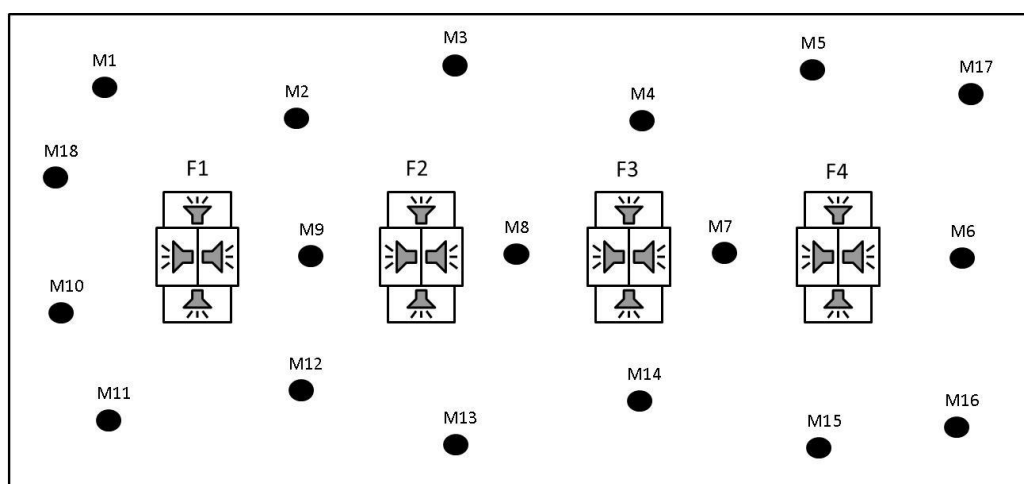
$$d_{min} \cong 6,5 \text{ m} .$$

4.4.3. Pontos de medição

Foram escolhidas quatro posições, representadas por F1, F2, F3 e F4 para a fonte sonora dentro da sala e 18 pontos distribuídos pelo espaço restante da sala para o posicionamento do microfone, representado pela letra M seguido do número da sua posição, como ilustra a figura 20. Portanto, serão realizadas ao todo 72 medidas em situações diferentes entre fonte-receptor dentro do ambiente.

De forma a tornar direcionalidade da fonte sonora mais próxima de uma fonte omnidirecional, foram realizadas duas medições para cada par emissor-receptor, ou seja, rotação de 0° ou 180° do sistema mostrado anteriormente na figura 13. O resultado corresponde a quatro orientações diferentes do alto-falante.

Figura 20 – Pontos de medida dos microfones (M) e posições da fonte sonora (F) escolhidas na sala



4.4.4. Medição em campo livre

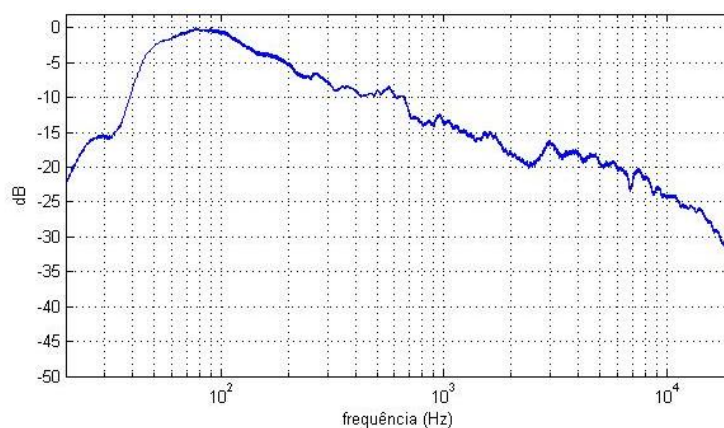
As respostas em frequência dos equipamentos utilizados não são exatamente constantes, portanto, o espectro do sinal da varredura gerado é alterado pelas respostas em frequência do conversor D/A da placa de áudio e do monitor de áudio. Da mesma forma o espectro do sinal adquirido dentro da sala é alterado pelas funções de transferência do microfone e posteriormente do conversor A/D. Neste tipo de medição, deseja-se obter a função de transferência dos equipamentos do sistema de medição. Para tal, recomenda-se que a medida seja realizada em uma câmara anecóica (ambiente sem reflexões), porém, como este ambiente estava indisponível, foi escolhido um local livre de obstáculos sonoros, como mostra a figura 21.

Figura 21 – Ambiente utilizado para medição em campo livre



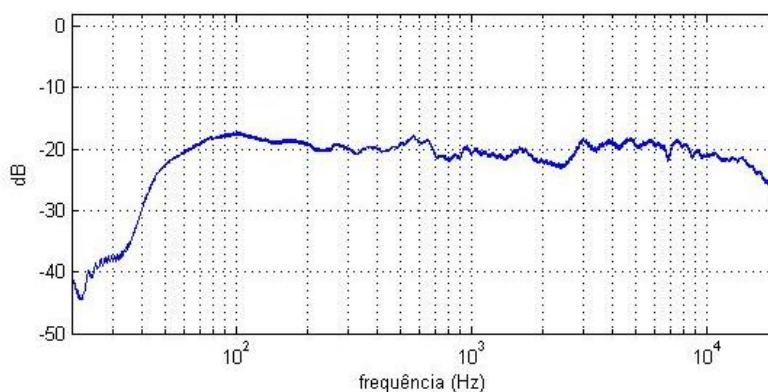
Nesta medição, o ambiente do experimento deve ser o menos ruidoso possível, portanto locais próximos a fluxo de carros e incidência de vento devem ser evitados. Como o local estava susceptível a ruídos ambientes, foram obtidas 17 amostras, e posteriormente calculada a médias destes de forma a eliminar componentes de caráter aleatório aumentando a relação sinal/ruído da medida. O espectro do sinal mensurado pode ser visto na figura 22.

Figura 22 – Espectro da medida em campo livre

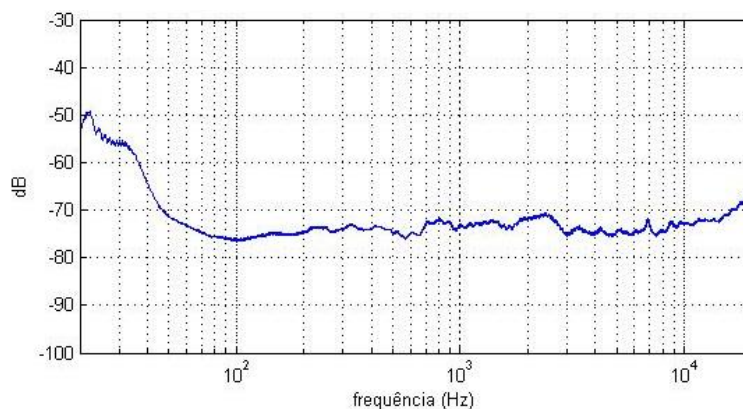


A resposta em frequência do sistema de medição, ilustrada na figura 23, é obtida pela divisão do espectro do sinal medido pelo espectro do sinal gerado.

Figura 23 – Espectro do sistema de medição



O espectro inverso, mostrado na figura 24, é utilizado como filtro para a RI.

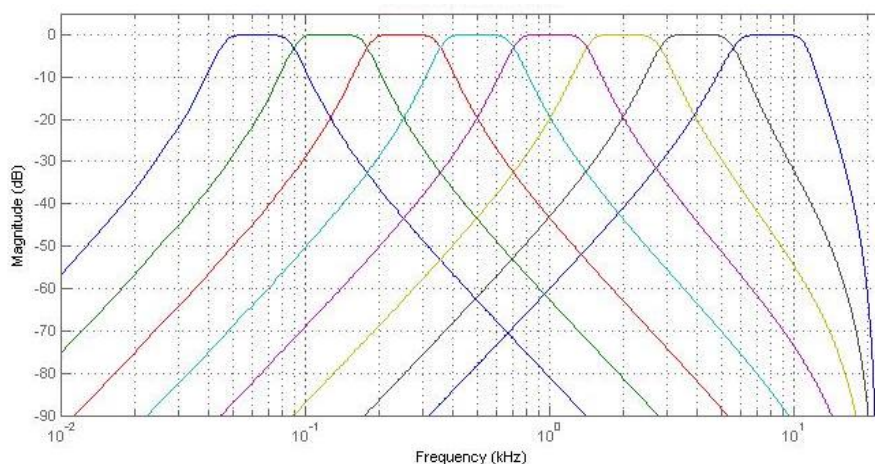
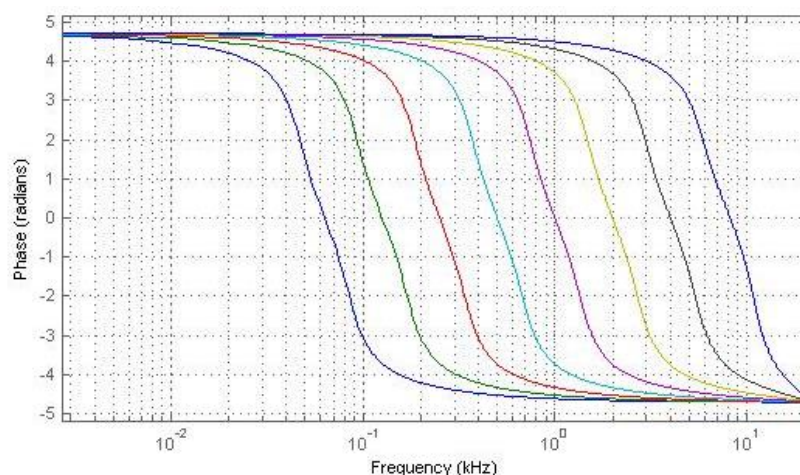
Figura 24 – Espectro do filtro de compensação do sistema de medida

4.5. Cálculo dos parâmetros acústicos

O processamento necessário para se obter os parâmetros acústicos foi realizado utilizando o *software* Matlab. O código implementado se encontra no apêndice deste trabalho.

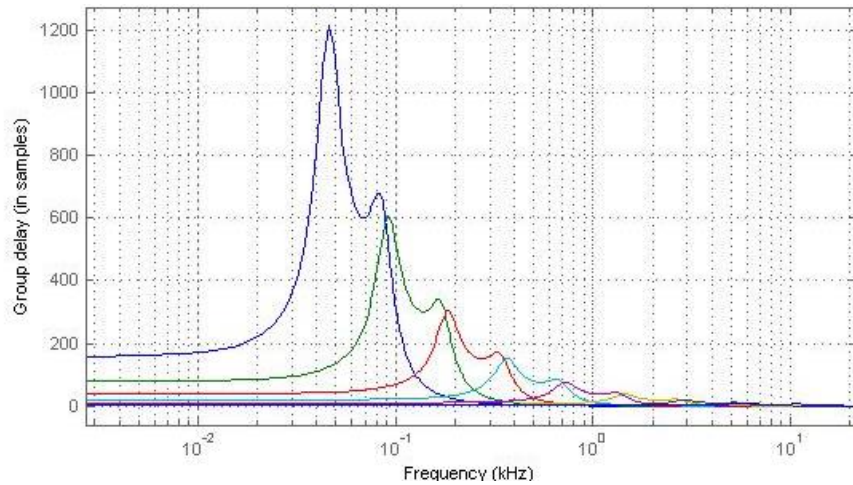
4.5.1. Banco de filtros

O banco de filtros utilizado para dividir a RI em bandas de oitava também foi implementado no Matlab utilizando a função “*fdesign.octave*”. As frequências centrais escolhidas foram: 62,5 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz e 8kHz. Os filtros projetados são do tipo IIR (*Infinite Impulse Response*), utilizando o algoritmo de *butterwort* de 6^a ordem. Estes filtros apresentam uma resposta de fase não linear, como mostra a figura 26, sendo uma característica não desejada, pois a mudança de fase pode alterar as curvas de decaimento da RI. Contudo tal filtro foi escolhido pela praticidade de ser implementado e utilizado. A figura 25 mostra a resposta em frequência do banco de filtros.

Figura 25 – Resposta em frequências dos filtros em oitavas**Figura 26** - Resposta de fase dos filtros em oitavas

4.5.2. Correção do atraso de grupo dos filtros

Os filtros obtidos no item anterior possuem atraso de grupo, como ilustra a figura 27. Este atraso deve ser considerado para o cálculo dos parâmetros acústicos, pois qualquer deslocamento temporal inserido na resposta impulsiva gera sérios erros principalmente para os cálculos do tempo de reverberação e *EDT*. Para corrigir tal atraso, programou-se um algoritmo que detecta o ponto máximo da RI e a desloca temporalmente de forma que o ponto encontrado apareça novamente no tempo inicial.

Figura 27 – Atrasa de grupo por banda dos filtros implementados

4.5.3. Cálculo dos parâmetros acústicos

Como descrito no capítulo 3, o cálculo de cada parâmetro envolve o uso de integrais. Para sinais discretos, devemos utilizar expressões discretas que realizem tal operação. Neste trabalho utilizou-se a função *trapz* do Matlab, a qual realiza uma aproximação do cálculo da integral através do método dos trapézios. Utilizando este método obtemos uma aproximação numérica da integral I de um sinal contínuo $h(t)$ e podemos fazer a seguinte equivalência entre a integral, a sua aproximação e o código implementado:

$$\int_a^b h(t)dt \sim \frac{t_s}{2 \cdot (h(1+a) + h(b))} \sum_{2+a}^{b-1} t_s \cdot h(n) = \text{trapz}(t(1+a/t_s:b/t_s), h(1+a/t_s:b/t_s))$$

onde t_s é o período de amostragem, n é o índice da amostra e t é o vetor tempo.

O índice da amostra é relacionado com t da seguinte forma:

$$t = n \cdot t_s$$

onde n é um número inteiro.

4.6. Validação do cálculo dos parâmetros

Para a validação dos valores dos parâmetros calculados utilizou-se o *software* comercial AURORA como referência. Tal *software* calcula, a partir da RI de banda larga, os parâmetros C50, C80, D50, Ts, T20, T30 e EDT.

5. Resultados

Os resultados obtidos neste trabalho são os parâmetros acústicos calculados a partir da RI medida pelo método de varredura exponencial de senos, porém também serão mostrados resultados parciais de itens importantes para a obtenção dos resultados finais.

5.1. Média espacial das medidas

A média espacial consistiu em somar 72 medidas correspondentes à medição descrita no item 2.6.1. As figuras 28 e 29 mostram a média dos sinais no domínio tempo e frequência, respectivamente.

Figura 28 – Sinal no domínio tempo da média das medições

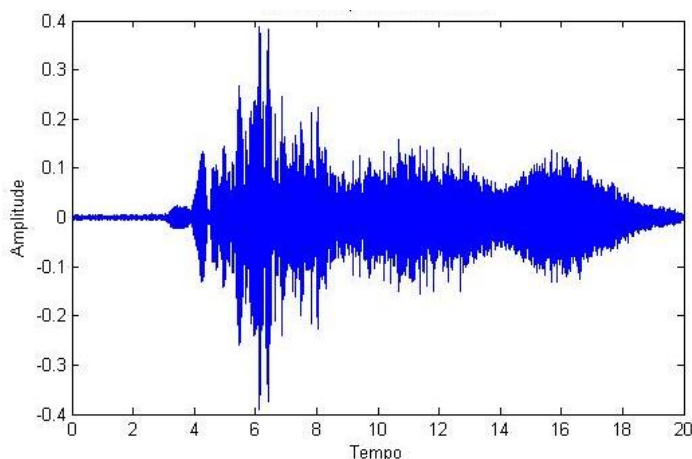
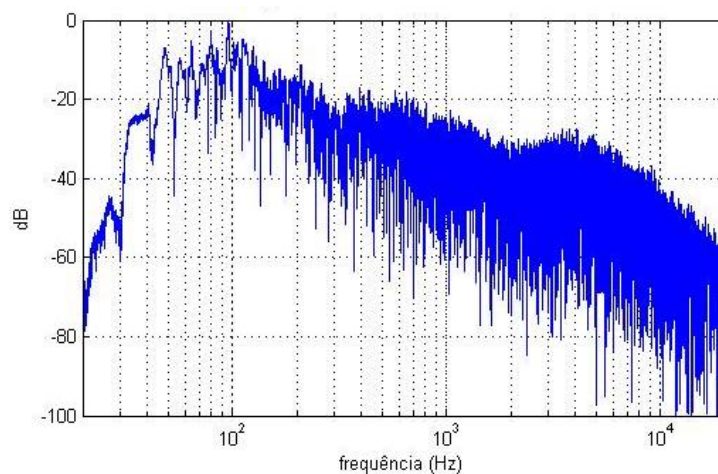


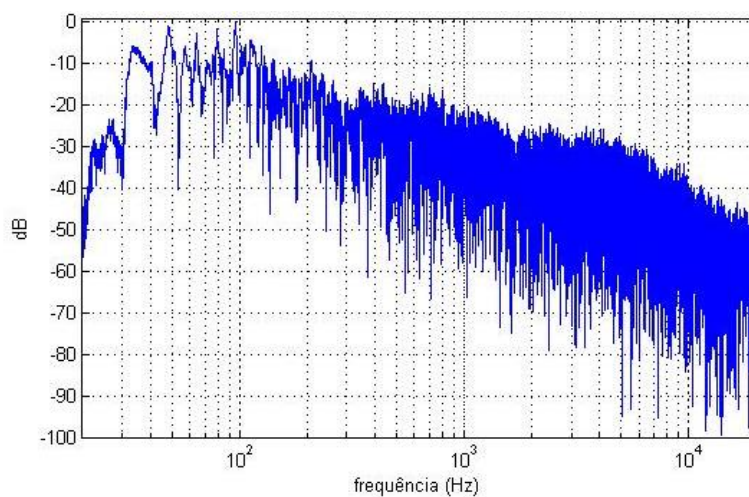
Figura 29 – Espectro da média das medições



5.2. Correção espectral do sistema de medição

O espectro da média das medidas corrigido pelo filtro $H_c(f)$ está ilustrado na figura 28.

Figura 28 - Espectro da média das medidas corrigido



5.3. Resposta impulsiva

A resposta em frequência e a RI da sala estão ilustradas nas figuras 29 e 30, respectivamente.

Figura 29 – Resposta em frequência da sala

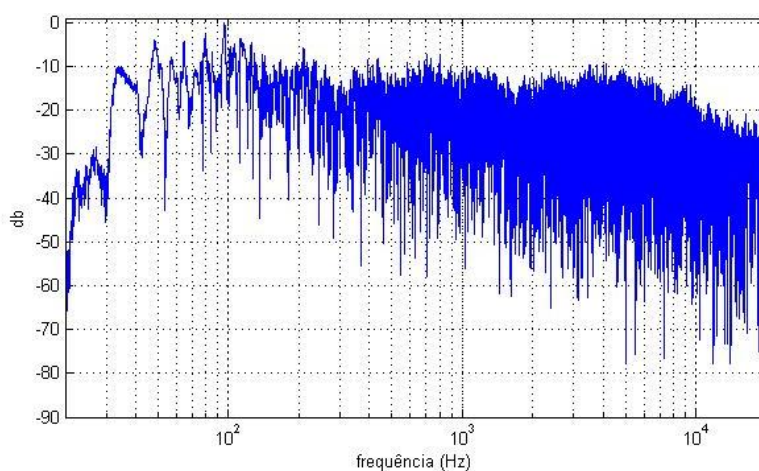
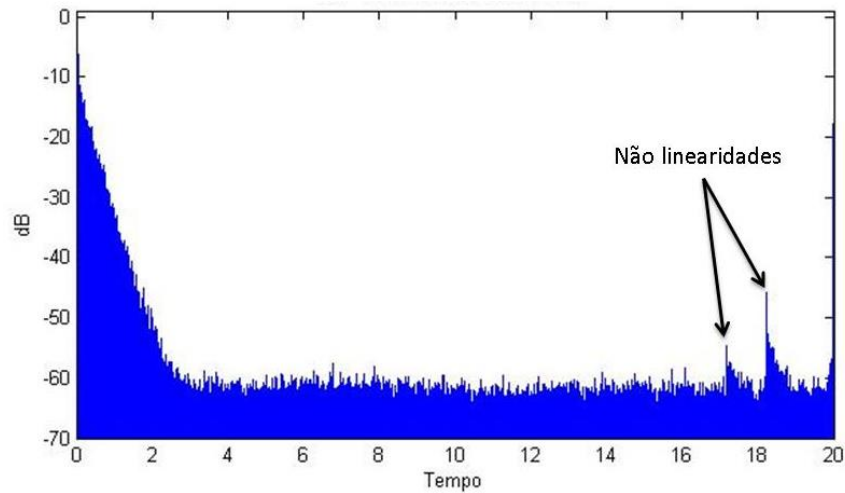
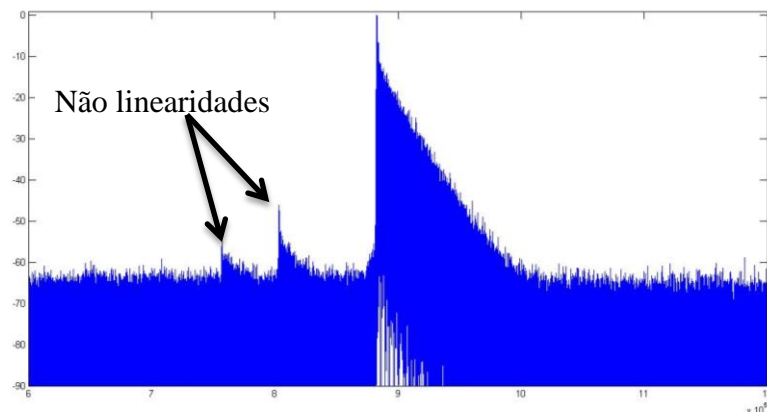
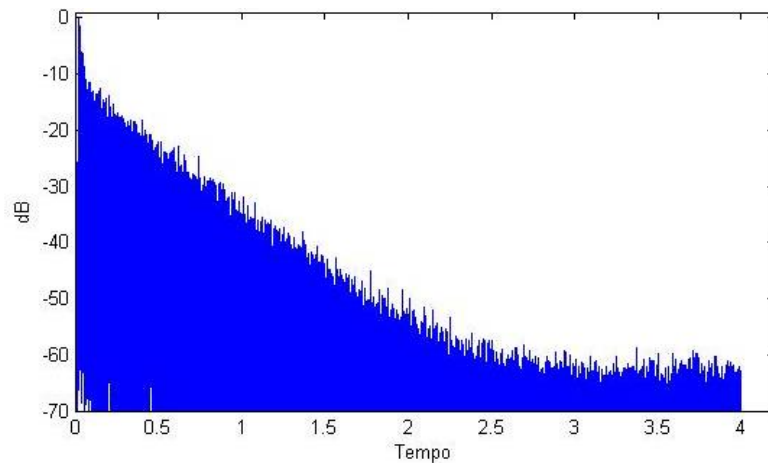


Figura 30 – Resposta impulsiva da sala

Ao visualizar a figura 30, nota-se que a partir de 4 segundos a amplitude da RI não é significativa, pois seu sinal está misturado ao sinal do ruído. Também se pode ver que as não linearidades aparecem nos tempos finais da RI. Portanto, a parte linear, que interessa neste caso, pode ser obtida a partir do janelamento temporal da RI nos seus primeiros 4 segundos. Se empregada uma convolução aperiódica, a parte não linear da RI aparece em tempos negativos [4], como mostra a figura 31.

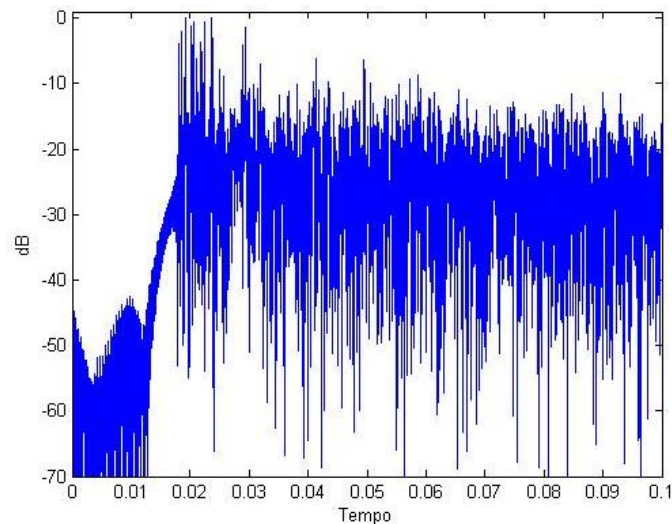
Figura 31 – Resposta impulsiva da sala obtida com convolução aperiódica

A figura 32 ilustra a RI da sala após a remoção da parte não linear.

Figura 32 – Parte linear da resposta impulsiva da sala

5.3.1. Atraso da RI

A figura 33 mostra o início do sinal da RI, onde se pode ver claramente um atraso menor que 0,02 segundos. Este atraso não é significativo e, portanto pode ser desconsiderado para fins práticos.

Figura 33 – Atraso da resposta impulsiva

O pequeno tempo de atraso provavelmente se deve às imperfeições na sincronização das medidas, pois as mesmas foram feitas com um método de baixa precisão.

5.4. Parâmetros acústicos

5.4.1. Curvas de decaimento de Schroeder

Através da resposta impulsiva filtrada, se pode calcular a curva de decaimento de Schroeder para cada banda. Tais curvas são mostradas nas figuras 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40 e 41 e representam o decaimento da amplitude da RI nas frequências de 62,5 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz e 8kHz, respectivamente.

Figura 34 – Curva de decaimento de Schroeder em 62,5 Hz

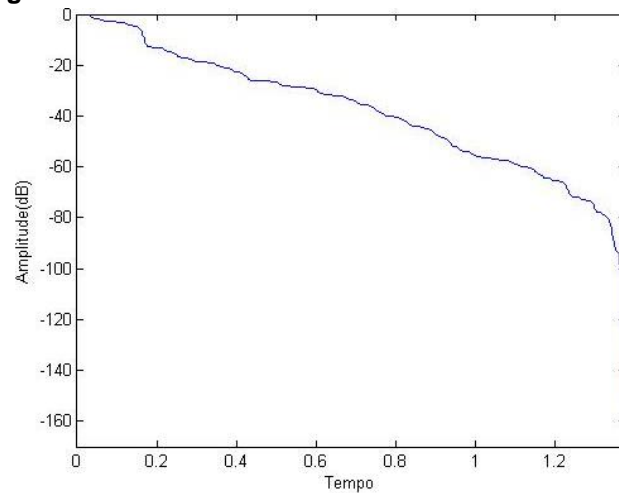


Figura 35 – Curva de decaimento de Schroeder em 125 Hz

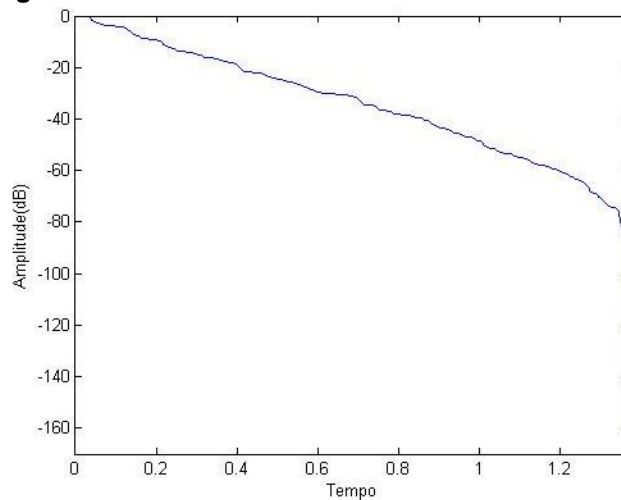


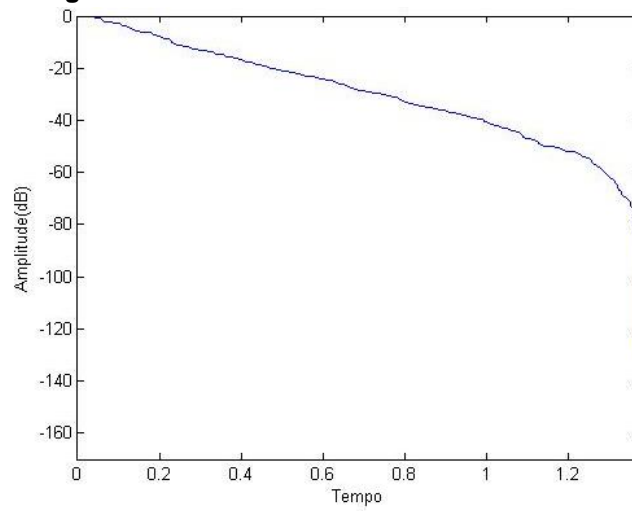
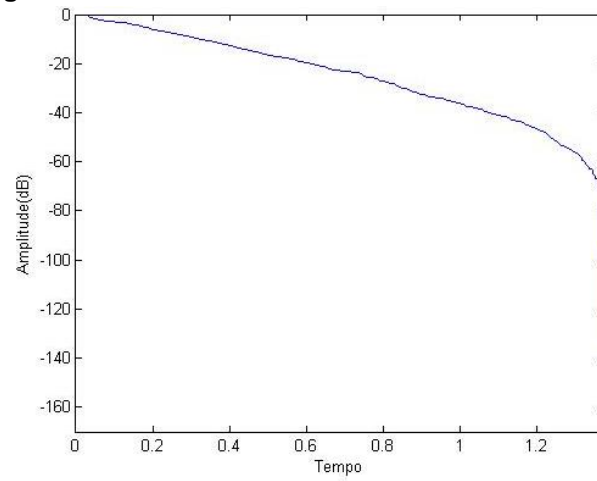
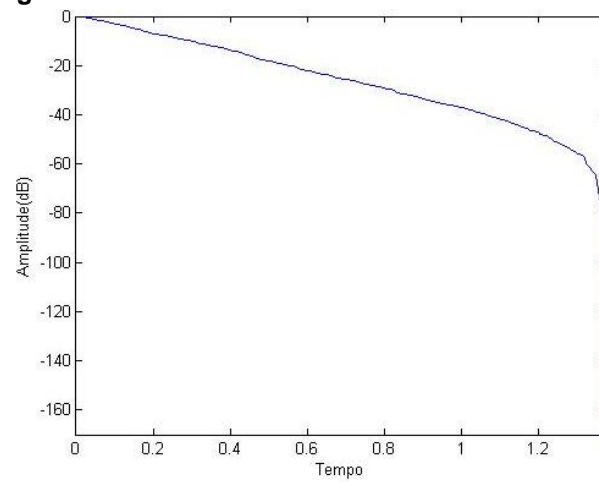
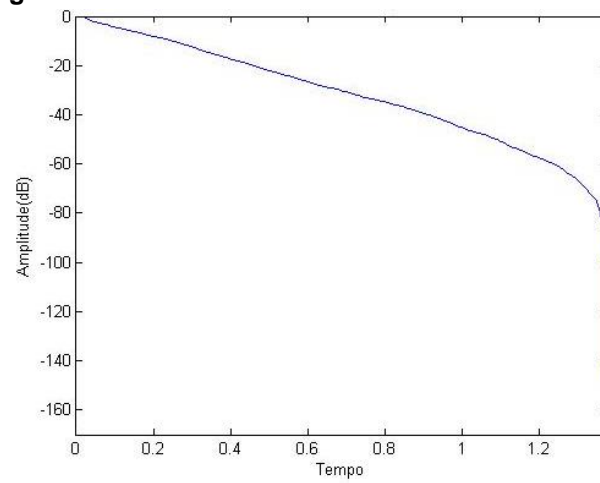
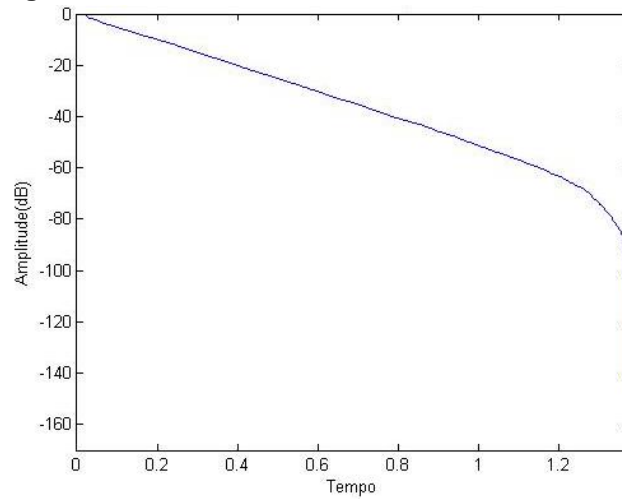
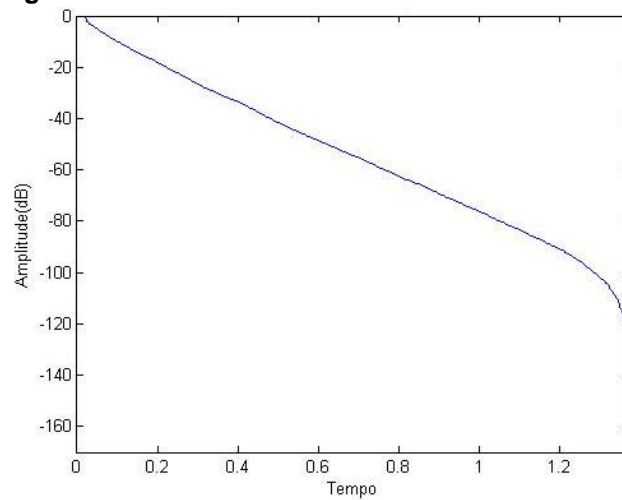
Figura 36 – Curva de decaimento de Schroeder em 250 Hz**Figura 37** – Curva de decaimento de Schroeder em 500Hz**Figura 38** – Curva de decaimento de Schroeder em 1kHz

Figura 39 – Curva de decaimento de Schroeder em 2k Hz**Figura 40** – Curva de decaimento de Schroeder em 4kHz**Figura 41** – Curva de decaimento de Schroeder em 8kHz

5.4.2. Parâmetros acústicos calculados

Os parâmetros acústicos da sala obtidos no Matlab são mostrados na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros Acústicos calculados

	62,5Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
C50[dB]	-10,4364	-9,2456	-6,7588	-8,5257	-7,0113	-5,9445	-4,6129	-1,5784
C80[dB]	-6,1906	-3,9758	-2,7352	-7,0669	-4,202	-3,7015	-2,2061	1,1208
D50[%]	8,2938	10,6322	17,4183	12,3131	16,5977	20,2819	25,6896	41,0129
Ts[ms]	162,417	192,229	203,257	280,330	241,975	209,492	173,935	101,618
EDT[s]	1,7471	2,3051	3,1091	3,5608	3,4129	2,9875	2,5164	1,3646
T20[s]	2,6183	2,6021	3,1437	3,4696	3,1992	2,6283	2,3858	1,4581
T30[s]	2,5883	2,6203	3,1671	3,43	3,2852	2,7528	2,3885	1,5107

5.5. Parâmetros acústicos - Aurora

Os parâmetros acústicos da sala gerados pelo *software* AURORA (figura 33), são mostrados na tabela 3.

Figura 33 – Interface *software* AURORA

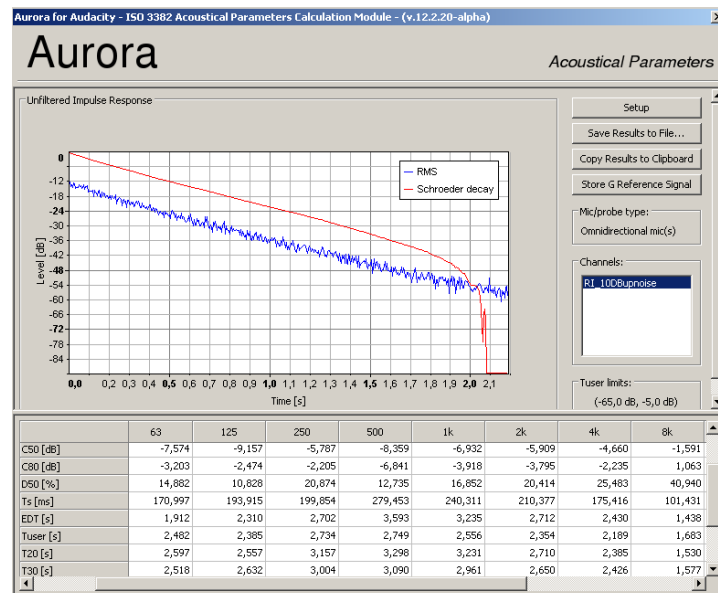


Tabela 3 – Parâmetros Acústicos calculados pelo *software* AURORA

	62.5Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
C50 [dB]	-7,574	-9,157	-5,787	-8,359	-6,932	-5,909	-4,66	-1,591
C80 [dB]	-3,203	-2,474	-2,205	-6,841	-3,918	-3,795	-2,235	1,063
D50 [%]	14,882	10,828	20,874	12,735	16,852	20,414	25,483	40,94
Ts [ms]	170,997	193,915	199,854	279,453	240,311	210,377	175,416	101,431
EDT [s]	1,912	2,31	2,702	3,593	3,235	2,712	2,43	1,438
T20 [s]	2,597	2,557	3,157	3,298	3,231	2,71	2,385	1,53
T30 [s]	2,518	2,632	3,004	3,09	2,961	2,65	2,426	1,577

6. Discussão dos resultados

6.1. Resposta impulsiva

A resposta impulsiva obtida representa a resposta média da sala medida. A figura 30 mostra que a amplitude do ruído é aproximadamente 60dB menor que a máxima amplitude do sinal, o que confirma a ótima relação sinal/ruído do método escolhido.

Também é possível observar na figura 30 os espúrios nos segundos finais da resposta, os quais representam os harmônicos gerados pelas não linearidades medidas durante a medição, provavelmente proveniente da resposta do alto-falante.

Observando que a amplitude das componentes de distorção harmônica se apresentou bem menor que a amplitude do sinal de interesse, pode-se concluir que os equipamentos utilizados são de boa qualidade pois inserem poucas distorções nas medidas.

6.2. Parâmetros acústicos

De modo a validar os cálculos realizados para obter os parâmetros acústicos devemos comparar numericamente os resultados obtidos com os parâmetros calculados pelo *software* de referência AURORA. O erro em cada parâmetro é dado por

$$Erro = \frac{P_{calc} - P_{aurora}}{P_{aurora}} \cdot 100 [\%] \quad (32)$$

onde P_{calc} é o valor do parâmetro calculado no Matlab e P_{aurora} é o valor do parâmetro calculado pelo *software* aurora. A tabela 4 mostra o valor do erro para cada parâmetro.

Tabela 4 – Valores de erro por parâmetro acústico em cada banda, erro médio por parâmetro e erro médio total.

	62.5Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	Erro médio por parâmetro
C50[dB]	37,79%	0,97%	16,79%	1,99%	1,14%	0,60%	1,01%	0,79%	7,64%
C80[dB]	93,28%	60,70%	24,05%	3,30%	7,25%	2,46%	1,29%	5,44%	24,72%
D50[%]	44,27%	1,81%	16,56%	3,31%	1,51%	0,65%	0,81%	0,18%	8,64%
Ts[ms]	5,02%	0,87%	1,70%	0,31%	0,69%	0,42%	0,84%	0,18%	1,26%
EDT[s]	8,62%	0,21%	15,07%	0,90%	5,50%	10,16%	3,56%	5,10%	6,14%
T20[s]	0,82%	1,76%	0,42%	5,20%	0,98%	3,01%	0,03%	4,70%	2,12%
T30[s]	2,79%	0,44%	5,43%	11,00%	10,95%	3,88%	1,55%	4,20%	5,03%
									Erro médio total
									6,94%

Analisando a tabela 4 nota-se claramente que a maior diferença ocorre para os parâmetros calculados nas baixas frequências, principalmente nos parâmetros C50, C80 e D50.

Como este erro é acentuado em apenas bandas específicas, surge a hipótese de que esta diferença é decorrente da utilização de filtros com respostas diferentes entre o software de referência e o cálculo implementado. Outra hipótese é a de que os filtros digitais deixam de apresentar a resposta esperada, principalmente devido a erros de precisão numérica no cálculo de seus coeficientes [2]. Estas hipóteses devem ser testadas e podem ser temas de estudo para trabalhos futuros.

Outra análise a ser feita é de que os valores mais discrepantes, obtidos no parâmetro C80, representam diferenças pequenas em decibéis, pois os valores obtidos do parâmetro são numericamente pequenos, gerando valores de erros muito grandes, da forma como o mesmo foi calculado.

Analisando a tabela 4, concluímos que o cálculo dos parâmetros acústicos gera resultados satisfatórios uma vez que o erro médio total para todos os parâmetros é de 6,94%.

6.3. Avaliação da qualidade acústica do ginásio

Os valores obtidos em cada parâmetro nos permitem fazer uma avaliação da qualidade acústica da sala medida. Os valores sugeridos de clareza para uma sala sujeita ao som de uma música de câmara é de 3dB e para sinfonia é de -1dB [14]. Os valores obtidos para a sala medida, em todas as bandas, estão muito abaixo dos valores recomendados, portanto a sala possui pouca clareza.

Quanto ao tempo de reverberação, os valores recomendados para música de câmara são de 1,5 segundos, enquanto que para música sinfônica é de 2 a 2,4 segundos [14]. Os valores medidos, para a maioria das bandas, são maiores que 2,4 segundos, chegando a 3.47 segundos para a banda de 500 Hz, ou seja, a sala possui um tempo de reverberação muito alto em todas as bandas.

Conclusões

Este trabalho descreveu a forma como é modelado o sistema acústico de uma sala. Tal sistema, apesar de ser tratado na prática como um sistema linear e invariante no tempo, apresenta respostas não lineares bem como ruídos atuando sobre a saída deste. Na prática este sistema pode ser considerado como um sistema LIT, sendo possível, então, caracteriza-lo a partir da sua resposta impulsiva.

Diversas técnicas de medição de resposta impulsiva foram descritas, ressaltando suas vantagens e desvantagens. Ao analisar cada um dos métodos de medição escolheu-se o método de varredura exponencial senoidal para ser aplicado á uma sala, pois é um método de rápida implementação, apresenta uma boa relação/ruído e é imune á distorções harmônicas.

Ao aplicar o método, levou-se em conta que o sistema de medição utilizado possui funções de transferência que modificam tanto o sinal medido, quanto o sinal gerado, podendo esta ser obtida empregando uma medição em um campo livre. O resultado obtido nesta medição nos possibilita gerar um filtro que remove a influência do sistema de medição nos dados adquiridos.

Mostrou-se que a qualidade acústica da sala pode ser medida através de parâmetros quantitativos, calculados a partir da RI obtida. Os parâmetros calculados foram a Clareza, para os tempos de 50 e 80 ms, Definição, Tempo Central, Tempo de decaimento inicial e os tempos de reverberação.

Citou-se que antecipadamente aos cálculos dos parâmetros, a norma ISO3382 sugere que a RI deva ser tratada, removendo os primeiros 20dB de decaimento da energia da RI e janelar a mesma 10dB acima do ponto de cruzamento com o ruído de fundo.

Percebemos que a RI medida apresentou uma relação sinal/ruído de aproximadamente 60dB, o que é considerado satisfatória para esta aplicação.

Avaliou-se o local do experimento a partir dos valores dos parâmetros acústicos obtidos e conclui-se que este local não apresenta boas condições acústicas para aplicações musicais.

Os parâmetros acústicos calculados apresentaram valores compatíveis aos gerados pelo *software* AURORA, o que valida o processamento realizado no *software* Matlab.

Trabalhos futuros

- Implementar uma análise acústica de uma sala específica para teatros ou espetáculos musicais de modo a calcular os parâmetros acústicos nos pontos onde se localizam os ouvintes avaliando assim os pontos ótimos e pontos críticos da acústica deste local.
- Medir a RI posicionando a fonte sonora de acordo com uma distribuição *Surround* com a finalidade de utilizar a medida como filtros para emulação do espaço físico da sala medida em sistema de reprodução *Surround*.
- Desenvolver um sistema de reprodução sonora Omnidirecional utilizando múltiplos alto-falantes de forma a adequar as medidas à norma ISO3382.
- Utilizar a técnica de varredura exponencial de senos para analisar a parte não-linear de um sistema qualquer.

Referências

- [1] Sarris, J.C., Cambourakis, G.E., "Time Frequency Analysis And Parametric Approximation Of Room Impulse Responses" Published in: Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings - IEEE International Conference on - Volume 6, 2003.
- [2] Bruno S. Masiero, Iazzetta F.; "Estudo e Implementação de Métodos de Medição de Resposta Impulsiva em Salas de Pequeno Porte"- Relatório Final de Iniciação Científica – FAPESP, 2005.
- [3] Pereira, R. N. Caracterização Acústica de Salas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física e Tecnológica) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2010.
- [4] Müller, S. e Massarani, P. " Medições da Resposta em Frequência de Sistemas de Sonorização", UFMG, 1º SEMEA, Sessão técnica 2: Acústica. ,2002.
- [5] Burt, Phillip M. S. "Measuring Acoustic Responses with Maximum- Length Sequences". In ITS Proceedings, pp 284-289. Agosto 1998.
- [6] Farina, A., 2000. " Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion With a Swept -Sine Technique", Apresentado na 108ª convenção da AES, Journal of the Audio Engineering Society (abstracts), vol. 48, pp. 350.
- [7] Meng, Q.; Sen, D.; Wang, S.; Hayes, L., "Impulse response measurement with sine sweeps and amplitude modulation schemes", *Signal Processing and Communication Systems, ICSPCS - 2nd International Conference*, 2008.
- [8] ISO 3382;. "Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters" - Second edition 1997-06-15.

- [9] Cysne, L.F.O., 2000. “Áudio, Engenharia e Sistemas”, Digital Tecnologia de Áudio e Vídeo, São Paulo.
- [10] Müller, S., Massarani P., “Transfer Function Measurements with Sweeps”. J. AES, Vol. 49, number 6, pp.443. 2001.
- [11] Rocha, L. Z. Estudo e análise da acústica de ambientes submetidos a sistemas de áudio. Porto Alegre, 2004.
- [12] Manual de Instruções Monitor HS 80. Disponível em: http://download.yamaha.com/api/asset/file/?language=en&site=usa.yamaha.com&asset_id=7262. Acesso em: 18/06/2013.
- [13] Measurement Condenser Microphone Ecm8000 Technical Specifications. Disponível em: http://www.behringer.com/assets/ECM8000_P0118_S_EN.pdf. Acesso em: 21/05/2013.
- [14] Rossing T. D. (Editor), “Springer Handbook of Acoustics” , 2007.

Apêndice único

Neste apêndice encontra-se o software implementado no Matlab contendo todos os processamentos descritos durante o trabalho.

```

%% Caracterização Acústica de Salas - Jonatan Dalmonte - Junho 2013
%% Declaração de variáveis
fs=44100;
ts=1/fs;
T=20;
t=[0:ts:T];
t_rev=[-T:ts:T];
f_vector=[0:1/T:fs]; %vetor frequência
%% Faixa de varredura
f1=20;
f2=20000;
w1=2*pi*f1;
w2=2*pi*f2;
f_vector=[0:1/T:fs];
%% Criando uma varredura exponencial de seno
K=T*w1/(log(w2/w1));
L=T/log(w2/w1);
s= sin(K*(exp(t./L)-1));
plot(t,s);
title('x(t) - Sinal de varredura senoidal exponencial');xlabel ('Tempo');
ylabel ('Amplitude'); axis([0 5 -1.5 1.5]); hold on;
S=fft(s); %fft
%% Plot varredura
figure(2)
semilogx(f_vector,20.*log10(abs(S./max(S))));
title('X(f) - Espectro da varredura senoidal exponencial'); xlabel
('frequência (Hz)'); ylabel ('dB'); axis([10 21000 -50 2]); grid on; hold
on;
%% Invertendo a varredura no tempo: x(-t+T)
s_rev=sin(K*(exp((-t+T)./L)-1));
%% plota sinal invertido
figure(2)
plot(t,s_rev);
title('varredura invertida no tempo'); xlabel ('Tempo'); ylabel
('Amplitude'); axis([0 21 -1.5 1.5]); hold on;
%% criando o filtro inverso
w=(K/L).*exp(t./L);
m= w1./w;
inv_filt=s_rev.*m;
INV_FILT=fft(inv_filt);
%% plotafiltro inverso
figure(3)
plot(t,inv_filt/max(abs(inv_filt)));
title('Resposta impulsiva do filtro r(t)'); xlabel ('Tempo'); ylabel
('Amplitude'); axis([15 20 -0.007 0.007]); hold on;
figure(4)
semilogx(f_vector,20.*log10(abs(INV_FILT./max(abs(INV_FILT)))));
title('R(f) - Espectro do filtro inverso'); xlabel ('frequência (Hz)');
ylabel ('dB'); axis([19 22500 -50 2]); grid on; hold on;
%% criando um espectro plano de referência
FLAT=ones(size(S));
%% carrega média das medições em campo livre
y_free_field=wavread('y_free_field.wav');

```

```

y_free_field(size(t,2),1)=0; %corrige o tamanho da amostra.
Y_FREE_FIELD=fft(y_free_field);
figure(6)
%plot(t,y_free_field);
%title('média das medições em campo livre'); xlabel ('Tempo'); ylabel
('Amplitude'); axis([0 21 -1.5 1.5]); hold on;
semilogx(f_vector,20.*log10(abs(Y_FREE_FIELD./max(abs(Y_FREE_FIELD)))));
title('Espectro da medida em campo livre'); xlabel ('frequência (Hz)');
ylabel ('dB'); axis([20 20000 -50 2]); grid on; hold on;
Y_FREE_FIELD= Y_FREE_FIELD.'; %transforma Y_FREE_FIELD em vetor coluna para
operar com FLAT no comando seguinte
H_SIST= Y_FREE_FIELD./S; %correção para espectro não plano do sinal de
excitação
figure(7)
%plot(t,y_free_field);
%title('média das medições em campo livre'); xlabel ('Tempo'); ylabel
('Amplitude'); axis([0 21 -1.5 1.5]); hold on;
semilogx(f_vector,20.*log10(abs(H_SIST./max(abs(H_SIST)))));
title('Espectro do sistema de medição'); xlabel ('frequência (Hz)'); ylabel
('dB'); axis([20 20000 -50 2]); grid on; hold on;
%% carrega media temporal das amostras
s_media=wavread('s_media.wav');
s_media(size(t,2),1)=0; %corrige o tamanho da amostra.
S_MEDIA=fft(s_media);
S_MEDIA= S_MEDIA.'; %transforma S_MEDIA em vetor coluna para operar com
Y_FREE_FIELD_INV
figure(8)
plot(t,s_media);
title('Média Temporal das medidas'); xlabel ('Tempo'); ylabel
('Amplitude'); hold on;
%% Plota sinal da média das amostras
figure(9)
semilogx(f_vector,20.*log10(abs(S_MEDIA./max(abs(S_MEDIA)))));
title('H_m(f) - Espectro da média dos sinais'); xlabel ('frequência (Hz)');
ylabel ('dB'); axis([20 20000 -100 -0]); grid on; hold on;
%% Gerando filtro corretivo do sistema de medição (alto falante + mic +
placa): inverso da resposta em campo livre
H_SIST_INV = FLAT./H_SIST;
figure(9)
semilogx(f_vector,20.*log10(abs(H_SIST_INV./max(H_SIST_INV)))));
title('H_s(f) - Espectro do filtro corretivo do sistema de medição');
xlabel ('frequência (Hz)'); ylabel ('dB'); axis([20 20000 -100 -30]); grid
on; hold on;
%% Corrigindo o espectro das medidas aplicando o filtro inverso Hs
S_MEDIA_CORR= S_MEDIA.*H_SIST_INV;
figure(10)
semilogx(f_vector,20.*log10(abs(S_MEDIA_CORR./max(abs(S_MEDIA_CORR)))));
title('Y(f)-ESPECTRO DA MEDIÇÃO CORRIGIDA'); xlabel ('frequência (Hz)');
ylabel ('dB'); axis([20 20000 -100 1]); grid on; hold on;
%% aplicação do filtro inverso
H= S_MEDIA_CORR.*INV_FILT;
%% Plota resposta em frequência da sala
figure(11)
semilogx(f_vector,20.*log10(abs(H./max(abs(H)))));
title('H(f) resposta em frequência da sala'); xlabel ('frequência (Hz)');
ylabel ('db'); axis([20 20000 -90 1]); grid on; hold on;
%% Cálculo da resposta impulsiva através da ifft(H)
h=ifft(H);
h=h./max(abs(h)); %normalizado
h_db=20.*log10(abs(h/max(h)));
figure(12)

```

```

plot(t,h_db);
title('h(t) - resposta impulsiva da sala'); xlabel ('Tempo'); ylabel
('dB');axis([0 20 -70 1]); hold on;
wavwrite(h/max(abs(h)),fs,24,'RI_20_seg');
%% remoção da parte não linear(zera-se os termos apartir de 4 segundos)
t_fim=4;
indice_t_fim=t_fim/ts;
h_lin=h(1:indice_t_fim); %limita o vetor até os termos antes de 4 segundos
h_lin_db=20.*log10(abs(h_lin/max(abs(h_lin))));
figure(13)
plot(t(1:indice_t_fim),h_lin_db);
title('h(t) - Parte linear da resposta impulsiva da sala'); xlabel
('Tempo'); ylabel ('dB');axis([0 4 -70 1]); hold on;
wavwrite(h_lin/max(abs(h_lin)),fs,24,'RI_4_seg');
%% Determinação do ponto máximo para retirar o delay da RI
h_clean=h_lin;
p_max = find(abs(h_clean) == max(abs(h_clean)));
h_clean = h_lin(p_max:end-1);
h_lin2= h_lin(p_max:end-1);
%% Determinação do ponto inicial segundo ISO 3382: -20 db abaixo do valor
%% máximo da energia
h_energ = (h_clean).^2;
h_energ_db=20.*log10(abs(h_energ/max(abs(h_energ))));
p_20db = max(find(h_energ_db >=(-20)));
h_clean=h_clean(p_20db:end);
h_clean_db=20.*log10(abs(h_clean/max(abs(h_clean))));
%% plota a RI apartir do ponto inicial
h_clean_db=20.*log10(abs(h_clean/max(abs(h_clean))));
plot(t(1:t_fim),h_clean_db(1:t_fim));
axis([0 t_fim*ts -70 0.4]);
%% exporta resposta impulsiva para cálculo dos parâmetros no software
%% aurora
wavwrite(h_clean/max(abs(h_clean)),fs,24,'RI_Clean');
%% Criação de um banco de filtros em bandas de oitava
d_62_5 = fdesign.octave(1,'Class 0','N,F0',6,63,44100);
Hd_62_5 = design(d_62_5);
Hf(1) = Hd_62_5;
d_125 = fdesign.octave(1,'Class 0','N,F0',6,125,44100);
Hd_125 = design(d_125);
Hf(2)=Hd_125;
d_250 = fdesign.octave(1,'Class 0','N,F0',6,250,44100);
Hd_250 = design(d_250);
Hf(3)=Hd_250;
d_500 = fdesign.octave(1,'Class 0','N,F0',6,500,44100);
Hd_500 = design(d_500);
Hf(4)=Hd_500;
d_1k = fdesign.octave(1,'Class 0','N,F0',6,1000,44100);
Hd_1k = design(d_1k);
Hf(5) = Hd_1k;
d_2k = fdesign.octave(1,'Class 0','N,F0',6,2000,44100);
Hd_2k = design(d_2k);
Hf(6) = Hd_2k;
d_4k = fdesign.octave(1,'Class 0','N,F0',6,4000,44100);
Hd_4k = design(d_4k);
Hf(7) = Hd_4k;
d_8k = fdesign.octave(1,'Class 0','N,F0',6,8000,44100);
Hd_8k = design(d_8k);
Hf(8)=Hd_8k;
%% plot do banco de filtros
hfvt = fvtool(Hf,'FrequencyScale','log','color','white');
axis([0.01 24 -90 5])

```



```

title('Banco de filtros em oitavas')
%% Divisão da resposta impulsiva em bandas de frequência
h_62_5=filter(Hd_62_5,h_clean);
h_125=filter(Hd_125,h_clean);
h_125=filter(Hd_125,h_clean);
h_250=filter(Hd_250,h_clean);
h_500=filter(Hd_500,h_clean);
h_1k=filter(Hd_1k,h_clean);
h_2k=filter(Hd_2k,h_clean);
h_4k=filter(Hd_4k,h_clean);
h_8k=filter(Hd_8k,h_clean);
%h_16k=filter(Hd_16k,h_clean);
%% (Limita a RI 10dB acima do ruído de fundo (ISO3382))
% ruído possui amplitude de aproximadamente -55dB
%acha ponto de -45 dB
t_end=max(find(h_clean_db >=(-45)));
%aplica janelamento temporal
h_62_5=h_62_5(1:t_end);
h_62_5_db=h_62_5_db(1:t_end);
h_125=h_125(1:t_end);
h_125_db=h_125_db(1:t_end);
h_250=h_250(1:t_end);
h_250_db=h_250_db(1:t_end);
h_500=h_500(1:t_end);
h_500_db=h_500_db(1:t_end);
h_1k=h_1k(1:t_end);
h_1k_db=h_1k_db(1:t_end);
h_2k=h_2k(1:t_end);
h_2k_db=h_2k_db(1:t_end);
h_4k=h_4k(1:t_end);
h_4k_db=h_4k_db(1:t_end);
h_8k=h_8k(1:t_end);
h_8k_db=h_8k_db(1:t_end);
%% Converte para dB a RI de cada banda
h_62_5_db=20.*log10(abs(h_62_5/max(abs(h_62_5))));
h_125_db=20.*log10(abs(h_125/max(abs(h_125))));
h_250_db=20.*log10(abs(h_250/max(abs(h_250))));
h_500_db=20.*log10(abs(h_500/max(abs(h_500))));
h_1k_db=20.*log10(abs(h_1k/max(abs(h_1k))));
h_2k_db=20.*log10(abs(h_2k/max(abs(h_2k))));
h_4k_db=20.*log10(abs(h_4k/max(abs(h_4k))));
h_8k_db=20.*log10(abs(h_8k/max(abs(h_8k))));
%% Plota RI filtradas
figure(15)
plot(t(1:length(h_62_5_db)),h_62_5_db);
title('h_62_5(t) - Resposta impulsiva da sala para 62.5Hz'); xlabel
('Tempo'); ylabel ('Amplitude');axis([0 t_end*ts -70 0]); hold on;
figure(16)
plot(t(1:length(h_125_db)),h_125_db);
title('h_125(t) - Resposta impulsiva da sala para 125Hz'); xlabel
('Tempo'); ylabel ('Amplitude');axis([0 t_end*ts -70 0]); hold on;
figure(17)
plot(t(1:length(h_250_db)),h_250_db);
title('h_250(t) - Resposta impulsiva da sala para 250Hz'); xlabel
('Tempo'); ylabel ('Amplitude');axis([0 t_end*ts -70 0]); hold on;
figure(18)
plot(t(1:length(h_500_db)),h_500_db);
title('h_500(t) - Resposta impulsiva da sala para 500Hz'); xlabel
('Tempo'); ylabel ('Amplitude');axis([0 t_end*ts -70 0]); hold on;
figure(19)
plot(t(1:length(h_1k_db)),h_1k_db);

```

```

title('h_1k(t) - Resposta impulsiva da sala para 1kHz'); xlabel ('Tempo');
ylabel ('Amplitude');axis([0 t_end*ts -70 0]); hold on;
figure(20)
plot(t(1:length(h_2k_db)),h_2k_db);
title('h_2k(t) - Resposta impulsiva da sala para 2kHz'); xlabel ('Tempo');
ylabel ('Amplitude');axis([0 t_end*ts -70 0]); hold on;
figure(21)
plot(t(1:length(h_4k_db)),h_4k_db);
title('h_4k(t) - Resposta impulsiva da sala para 4kHz'); xlabel ('Tempo');
ylabel ('Amplitude');axis([0 t_end*ts -70 0]); hold on;
figure(22)
plot(t(1:length(h_8k_db)),h_8k_db);
title('h_8k(t) - Resposta impulsiva da sala para 8kHz'); xlabel ('Tempo');
ylabel ('Amplitude');axis([0 t_end*ts -70 0]); hold on;

% Acha os índices correspondentes aos tempos de 50 e 80 milisegundos
t50 = round(0.05/ts);
t80 = 0.08/ts;
h_energ_62_5 = (h_62_5).^2;
h_energ_125 = (h_125).^2;
h_energ_250 = (h_250).^2;
h_energ_500 = (h_500).^2;
h_energ_1k = (h_1k).^2;
h_energ_2k = (h_2k).^2;
h_energ_4k = (h_4k).^2;
h_energ_8k = (h_8k).^2;
%somatório da energia por banda
En_62_5=trapz(t(1:length(h_energ_62_5)),h_energ_62_5);
En_125=trapz(t(1:length(h_energ_125)),h_energ_125);
En_250=trapz(t(1:length(h_energ_250)),h_energ_250);
En_500=trapz(t(1:length(h_energ_500)),h_energ_500);
En_1k=trapz(t(1:length(h_energ_1k)),h_energ_1k);
En_2k=trapz(t(1:length(h_energ_2k)),h_energ_2k);
En_4k=trapz(t(1:length(h_energ_4k)),h_energ_4k);
En_8k=trapz(t(1:length(h_energ_8k)),h_energ_8k);
%C50
C50_62_5=
10.*log10(trapz(t(1:t50),h_energ_62_5(1:t50))/trapz(t(t50:length(h_energ_62_5)),h_energ_62_5(t50:end))));
C50_125=
10.*log10(trapz(t(1:t50),h_energ_125(1:t50))/trapz(t(t50:length(h_energ_125)),h_energ_125(t50:end))));
C50_250=
10.*log10(trapz(t(1:t50),h_energ_250(1:t50))/trapz(t(t50:length(h_energ_250)),h_energ_250(t50:end))));
C50_500=
10.*log10(trapz(t(1:t50),h_energ_500(1:t50))/trapz(t(t50:length(h_energ_500)),h_energ_500(t50:end))));
C50_1k=
10.*log10(trapz(t(1:t50),h_energ_1k(1:t50))/trapz(t(t50:length(h_energ_1k)),h_energ_1k(t50:end))));
C50_2k=
10.*log10(trapz(t(1:t50),h_energ_2k(1:t50))/trapz(t(t50:length(h_energ_2k)),h_energ_2k(t50:end))));
C50_4k=
10.*log10(trapz(t(1:t50),h_energ_4k(1:t50))/trapz(t(t50:length(h_energ_4k)),h_energ_4k(t50:end))));
C50_8k=
10.*log10(trapz(t(1:t50),h_energ_8k(1:t50))/trapz(t(t50:length(h_energ_8k)),h_energ_8k(t50:end))));
%C80

```

```

C80_62_5=
10.*log10(trapz(t(1:t80),h_energ_62_5(1:t80))/trapz(t(t80:length(h_energ_62_5)),h_energ_62_5(t80:end))));
C80_125=
10.*log10(trapz(t(1:t80),h_energ_125(1:t80))/trapz(t(t80:length(h_energ_125)),h_energ_125(t80:end))));
C80_250=
10.*log10(trapz(t(1:t80),h_energ_250(1:t80))/trapz(t(t80:length(h_energ_250)),h_energ_250(t80:end))));
C80_500=
10.*log10(trapz(t(1:t80),h_energ_500(1:t80))/trapz(t(t80:length(h_energ_500)),h_energ_500(t80:end))));
C80_1k=
10.*log10(trapz(t(1:t80),h_energ_1k(1:t80))/trapz(t(t80:length(h_energ_1k)),h_energ_1k(t80:end))));
C80_2k=
10.*log10(trapz(t(1:t80),h_energ_2k(1:t80))/trapz(t(t80:length(h_energ_2k)),h_energ_2k(t80:end))));
C80_4k=
10.*log10(trapz(t(1:t80),h_energ_4k(1:t80))/trapz(t(t80:length(h_energ_4k)),h_energ_4k(t80:end))));
C80_8k=
10.*log10(trapz(t(1:t80),h_energ_8k(1:t80))/trapz(t(t80:length(h_energ_8k)),h_energ_8k(t80:end))));
%calculo D50[%]
D50_62_5 = trapz(t(1:t50),h_energ_62_5(1:t50))/En_62_5*100;
D50_125 = trapz(t(1:t50),h_energ_125(1:t50))/En_125*100;
D50_250 = trapz(t(1:t50),h_energ_250(1:t50))/En_250*100;
D50_500 = trapz(t(1:t50),h_energ_500(1:t50))/En_500*100;
D50_1k = trapz(t(1:t50),h_energ_1k(1:t50))/En_1k*100;
D50_2k = trapz(t(1:t50),h_energ_2k(1:t50))/En_2k*100;
D50_4k = trapz(t(1:t50),h_energ_4k(1:t50))/En_4k*100;
D50_8k = trapz(t(1:t50),h_energ_8k(1:t50))/En_8k*100;
%T[ms]
Ts_62_5=1000*trapz(t(1:length(h_energ_62_5)),h_energ_62_5.*t(1:length(h_energ_62_5)))/En_62_5;
Ts_125=1000*trapz(t(1:length(h_energ_125)),h_energ_125.*t(1:length(h_energ_125)))/En_125;
Ts_250=1000*trapz(t(1:length(h_energ_250)),h_energ_250.*t(1:length(h_energ_250)))/En_250;
Ts_500=1000*trapz(t(1:length(h_energ_500)),h_energ_500.*t(1:length(h_energ_500)))/En_500;
Ts_1k=1000*trapz(t(1:length(h_energ_1k)),h_energ_1k.*t(1:length(h_energ_1k)))/En_1k;
Ts_2k=1000*trapz(t(1:length(h_energ_2k)),h_energ_2k.*t(1:length(h_energ_2k)))/En_2k;
Ts_4k=1000*trapz(t(1:length(h_energ_4k)),h_energ_4k.*t(1:length(h_energ_4k)))/En_4k;
Ts_8k=1000*trapz(t(1:length(h_energ_8k)),h_energ_8k.*t(1:length(h_energ_8k)))/En_8k;
%% Cria vetores dos resultados
C50_vector=[C50_62_5 C50_125 C50_250 C50_500 C50_1k C50_2k C50_4k C50_8k];
C80_vector=[C80_62_5 C80_125 C80_250 C80_500 C80_1k C80_2k C80_4k C80_8k];
D50_vector=[D50_62_5 D50_125 D50_250 D50_500 D50_1k D50_2k D50_4k D50_8k];
Ts_vector= [Ts_62_5 Ts_125 Ts_250 Ts_500 Ts_1k Ts_2k Ts_4k Ts_8k];
%% procura o ponto máximo da RI de cada banda para retirar os delays gerado pelos filtros
p_max_62_5 = min(find(abs(h_62_5) == max(abs(h_62_5))));
h_62_5=h_62_5(p_max_62_5:end);
p_max_125 = min(find(abs(h_125) == max(abs(h_125))));
h_125=h_125(p_max_125:end);

```

```

p_max_250 = min(find(abs(h_250) == max(abs(h_250))));
h_250=h_250(p_max_250:end);
p_max_500 = min(find(abs(h_500) == max(abs(h_500))));
h_500=h_500(p_max_500:end);
p_max_1k = find(abs(h_1k) == max(abs(h_1k))));
h_1k=h_1k(p_max_1k:end);
p_max_2k = find(abs(h_2k) == max(abs(h_2k))));
h_2k=h_2k(p_max_2k:end);
p_max_4k = find(abs(h_4k) == max(abs(h_4k))));
h_4k=h_4k(p_max_4k:end);
p_max_8k = find(abs(h_8k) == max(abs(h_8k))));
h_8k=h_8k(p_max_8k:end);
%% Implementando a integração de Schroeder para cada banda
h_62_5_sch(length(h_62_5):-1:1) = cumsum(h_62_5(length(h_62_5):-1:1).^2);
h_62_5_sch_db=20.*log10(abs(h_62_5_sch/max(abs(h_62_5_sch))));

h_125_sch(length(h_125):-1:1) = cumsum(h_125(length(h_125):-1:1).^2);
h_125_sch_db=20.*log10(abs(h_125_sch/max(abs(h_125_sch))));

h_250_sch(length(h_250):-1:1) = cumsum(h_250(length(h_250):-1:1).^2);
h_250_sch_db=20.*log10(abs(h_250_sch/max(abs(h_250_sch))));

h_500_sch(length(h_500):-1:1) = cumsum(h_500(length(h_500):-1:1).^2);
h_500_sch_db=20.*log10(abs(h_500_sch/max(abs(h_500_sch))));

h_1k_sch(length(h_1k):-1:1) = cumsum(h_1k(length(h_1k):-1:1).^2);
h_1k_sch_db=20.*log10(abs(h_1k_sch/max(abs(h_1k_sch))));

h_2k_sch(length(h_2k):-1:1) = cumsum(h_2k(length(h_2k):-1:1).^2);
h_2k_sch_db=20.*log10(abs(h_2k_sch/max(abs(h_2k_sch))));

h_4k_sch(length(h_4k):-1:1) = cumsum(h_4k(length(h_4k):-1:1).^2);
h_4k_sch_db=20.*log10(abs(h_4k_sch/max(abs(h_4k_sch))));

h_8k_sch(length(h_8k):-1:1) = cumsum(h_8k(length(h_8k):-1:1).^2);
h_8k_sch_db=20.*log10(abs(h_8k_sch/max(abs(h_8k_sch))));
%% Plota as curvas de schroeder para cada banda
figure(23)
plot(t(1:length(h_62_5_sch)),h_62_5_sch_db);
title('Decaimento da curva para 62.5'); xlabel ('Tempo'); ylabel
('Amplitude');axis([0 t_end*ts -170 0]);
figure(24)
plot(t(1:length(h_125_sch_db)),h_125_sch_db);
title('Decaimento da curva para 125'); xlabel ('Tempo'); ylabel
('Amplitude');axis([0 t_end*ts -170 0]);
figure(25)
plot(t(1:length(h_250_sch_db)),h_250_sch_db);
title('Decaimento da curva para 250'); xlabel ('Tempo'); ylabel
('Amplitude');axis([0 t_end*ts -170 0]);
figure(26)
plot(t(1:length(h_500_sch_db)),h_500_sch_db);
title('Decaimento da curva para 500'); xlabel ('Tempo'); ylabel
('Amplitude');axis([0 t_end*ts -170 0]);
figure(27)
plot(t(1:length(h_1k_sch_db)),h_1k_sch_db);
title('Decaimento da curva para 1k'); xlabel ('Tempo'); ylabel
('Amplitude');axis([0 t_end*ts -170 0]);
figure(28)
plot(t(1:length(h_2k_sch_db)),h_2k_sch_db);

```

```

title('Decaimento da curva para 2k'); xlabel ('Tempo'); ylabel
('Amplitude');axis([0 t_end*ts -170 0]);
figure(29)
plot(t(1:length(h_4k_sch_db)),h_4k_sch_db);
title('Decaimento da curva para 4k'); xlabel ('Tempo'); ylabel
('Amplitude');axis([0 t_end*ts -170 0]);
figure(30)
plot(t(1:length(h_8k_sch_db)),h_8k_sch_db);
title('Decaimento da curva para 8k'); xlabel ('Tempo'); ylabel
('Amplitude');axis([0 t_end*ts -170 0]);
%% cálculo dos parâmetros T20 e T30
%%banda de 62.5Hz
t5_62_5 = min(find(h_62_5_sch_db < -5));
t25_62_5 = min(find(h_62_5_sch_db < -25));
t35_62_5 = min(find(h_62_5_sch_db < -35));

p20_62_5 = polyfit(t(t5_62_5:t25_62_5),h_62_5_sch_db(t5_62_5:t25_62_5),1);
T20_62_5 = (-60-p20_62_5(2))/(p20_62_5(1));

p30_62_5 = polyfit(t(t5_62_5:t35_62_5),h_62_5_sch_db(t5_62_5:t35_62_5),1);
T30_62_5 = (-60-p30_62_5(2))/(p30_62_5(1));

%% banda de 125Hz
t5_125 = min(find(h_125_sch_db < -5));
t25_125 = min(find(h_125_sch_db < -25));
t35_125 = min(find(h_125_sch_db < -35));

p20_125 = polyfit(t(t5_125:t25_125),h_125_sch_db(t5_125:t25_125),1);
T20_125 = (-60-p20_125(2))/(p20_125(1));

p30_125 = polyfit(t(t5_125:t35_125),h_125_sch_db(t5_125:t35_125),1);
T30_125 = (-60-p30_125(2))/(p30_125(1));

%% banda de 250Hz
t5_250 = min(find(h_250_sch_db < -5));
t25_250 = min(find(h_250_sch_db < -25));
t35_250 = min(find(h_250_sch_db < -35));

p20_250 = polyfit(t(t5_250:t25_250),h_250_sch_db(t5_250:t25_250),1);
T20_250 = (-60-p20_250(2))/(p20_250(1));

p30_250 = polyfit(t(t5_250:t35_250),h_250_sch_db(t5_250:t35_250),1);
T30_250 = (-60-p30_250(2))/(p30_250(1));

%%banda de 500Hz
t5_500 = min(find(h_500_sch_db < -5));
t25_500 = min(find(h_500_sch_db < -25));
t35_500 = min(find(h_500_sch_db < -35));

p20_500 = polyfit(t(t5_500:t25_500),h_500_sch_db(t5_500:t25_500),1);
T20_500 = (-60-p20_500(2))/(p20_500(1));

p30_500 = polyfit(t(t5_500:t35_500),h_500_sch_db(t5_500:t35_500),1);
T30_500 = (-60-p30_500(2))/(p30_500(1));

%% banda de 1kHz
t5_1k = min(find(h_1k_sch_db < -5));
t25_1k = min(find(h_1k_sch_db < -25));
t35_1k = min(find(h_1k_sch_db < -35));

```

```

p20_1k = polyfit(t(t5_1k:t25_1k),h_1k_sch_db(t5_1k:t25_1k),1);
T20_1k = (-60-p20_1k(2))/(p20_1k(1));

p30_1k = polyfit(t(t5_1k:t35_1k),h_1k_sch_db(t5_1k:t35_1k),1);
T30_1k = (-60-p30_1k(2))/(p30_1k(1));

%% banda de 2kHz
t5_2k = min(find(h_2k_sch_db < -5));
t25_2k = min(find(h_2k_sch_db < -25));
t35_2k = min(find(h_2k_sch_db < -35));

p20_2k = polyfit(t(t5_2k:t25_2k),h_2k_sch_db(t5_2k:t25_2k),1);
T20_2k = (-60-p20_2k(2))/(p20_2k(1));

p30_2k = polyfit(t(t5_2k:t35_2k),h_2k_sch_db(t5_2k:t35_2k),1);
T30_2k = (-60-p30_2k(2))/(p30_2k(1));

%% banda de 4kHz
t5_4k = min(find(h_4k_sch_db < -5));
t25_4k = min(find(h_4k_sch_db < -25));
t35_4k = min(find(h_4k_sch_db < -35));

p20_4k = polyfit(t(t5_4k:t25_4k),h_4k_sch_db(t5_4k:t25_4k),1);
T20_4k = (-60-p20_4k(2))/(p20_4k(1));

p30_4k = polyfit(t(t5_4k:t35_4k),h_4k_sch_db(t5_4k:t35_4k),1);
T30_4k = (-60-p30_4k(2))/(p30_4k(1));

%% banda de 8kHz
t5_8k = min(find(h_8k_sch_db < -5));
t25_8k = min(find(h_8k_sch_db < -25));
t35_8k = min(find(h_8k_sch_db < -35));

p20_8k = polyfit(t(t5_8k:t25_8k),h_8k_sch_db(t5_8k:t25_8k),1);
T20_8k = (-60-p20_8k(2))/(p20_8k(1));

p30_8k = polyfit(t(t5_8k:t35_8k),h_8k_sch_db(t5_8k:t35_8k),1);
T30_8k = (-60-p30_8k(2))/(p30_8k(1));

%% cálculo do EDT
t10_62_5 = min(find(h_62_5_sch_db < -10));
p_EDT_62_5 = polyfit(t(1:t10_62_5),h_62_5_sch_db(1:t10_62_5),1);
EDT_62_5 = (-60-p_EDT_62_5(2))/(p_EDT_62_5(1));

t10_125 = min(find(h_125_sch_db < -10));
p_EDT_125 = polyfit(t(1:t10_125),h_125_sch_db(1:t10_125),1);
EDT_125 = (-60-p_EDT_125(2))/(p_EDT_125(1));

t10_250 = min(find(h_250_sch_db < -10));
p_EDT_250 = polyfit(t(1:t10_250),h_250_sch_db(1:t10_250),1);
EDT_250 = (-60-p_EDT_250(2))/(p_EDT_250(1));

t10_500 = min(find(h_500_sch_db < -10));
p_EDT_500 = polyfit(t(1:t10_500),h_500_sch_db(1:t10_500),1);
EDT_500 = (-60-p_EDT_500(2))/(p_EDT_500(1));

t10_1k = min(find(h_1k_sch_db < -10));

```

```

p_EDT_1k = polyfit(t(1:t10_1k),h_1k_sch_db(1:t10_1k),1);
EDT_1k = (-60-p_EDT_1k(2))/(p_EDT_1k(1));

t10_2k = min(find(h_2k_sch_db < -10));
p_EDT_2k = polyfit(t(1:t10_2k),h_2k_sch_db(1:t10_2k),1);
EDT_2k = (-60-p_EDT_2k(2))/(p_EDT_2k(1));

t10_4k = min(find(h_4k_sch_db < -10));
p_EDT_4k = polyfit(t(1:t10_4k),h_4k_sch_db(1:t10_4k),1);
EDT_4k = (-60-p_EDT_4k(2))/(p_EDT_4k(1));

t10_8k = min(find(h_8k_sch_db < -10));
p_EDT_8k = polyfit(t(1:t10_8k),h_8k_sch_db(1:t10_8k),1);
EDT_8k = (-60-p_EDT_8k(2))/(p_EDT_8k(1));
%% cria os vetores de EDT, T20 e T30 para cada banda
EDT_vector=[EDT_62_5 EDT_125 EDT_250 EDT_500 EDT_1k EDT_2k EDT_4k EDT_8k ];
T20_vector=[T20_62_5 T20_125 T20_250 T20_500 T20_1k T20_2k T20_4k T20_8k ];
T30_vector=[T30_62_5 T30_125 T30_250 T30_500 T30_1k T30_2k T30_4k T30_8k ];
band_vector=[ 62.5 125 250 500 1000 2000 4000 8000];
%% plota os valores de T30 e T20 encontrados
figure(31)
semilogx(band_vector,EDT_vector);
title('EDT'); xlabel ('Frequência'); ylabel ('Tempo(2)');axis([60 8100 0
4]);grid on; hold on;
figure(32)
semilogx(band_vector,T20_vector);
title('T20'); xlabel ('Frequência'); ylabel ('Tempo(2)');axis([60 8100 0
4]);grid on; hold on;
figure(33)
semilogx(band_vector,T30_vector);
title('T30'); xlabel ('Frequência'); ylabel ('Tempo(2)');axis([60 8100 0
4]);grid on; hold on;
%% plota os resultados de todos os paramentros em uma tabela.
f = figure(34);
data=rand(7,8);%cria uma tabela de 7x8
data(1,:)=C50_vector;
data(2,:)=C80_vector;
data(3,:)=D50_vector;
data(4,:)=Ts_vector;
data(5,:)=2.*EDT_vector;
data(6,:)=2.*T20_vector;
data(7,:)=2.*T30_vector;
colnames = {'63Hz', '125Hz', '250Hz', '500Hz', '1kHz', '2kHz', '4kHz', '8kHz'};
table = uitable(f, 'Data', data, 'ColumnName', colnames, ...
'Position', [1 1 4600 200]);

```