

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS DE SOUZA PEREIRA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MÉTODO DO TRAÇADO DE  
RAIOS PARA SIMULAÇÃO DA ACÚSTICA DE UMA SALA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
(Tcc2 - Nº de Inscrição - 39)

CURITIBA

2015

LUCAS DE SOUZA PEREIRA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MÉTODO DO TRAÇADO DE  
RAIOS PARA SIMULAÇÃO DA ACÚSTICA DE UMA SALA**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Márcio H.A Gomes, Dr. Eng.

CURITIBA

2015

## **TERMO DE ENCAMINHAMENTO**

Venho, por meio deste termo, encaminhar para apresentação a Proposta do Projeto de Pesquisa AVALIAÇÃO DO MÉTODO DO TRAÇADO DE RAIOS PARA SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE UMA SALA, realizada pelo aluno LUCAS DE SOUZA PEREIRA, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Márcio H.A Gomes, Dr. Eng.  
UTFPR - Damec

Curitiba, 13 de fevereiro de 2015.

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Por meio deste termo, aprovamos a Proposta de Projeto de Pesquisa AVALIAÇÃO DO MÉTODO DO TRAÇADO DE RAIOS PARA SIMULAÇÃO ACÚSTICA DE UMA SALA, realizada pelo aluno LUCAS DE SOUZA PEREIRA, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Márcio H.A Gomes, Dr.Eng.  
Damec, UTFPR  
Orientador

Prof. Alexandre A. Pescador Sardá, Dr.Eng.  
Damec, UTFPR  
Avaliador

Prof. Samuel Ansay, MsC.  
Damec, UTFPR  
Avaliador

Curitiba, 13 de fevereiro de 2015.

## RESUMO

PEREIRA, Lucas (aluno). Avaliação do método do traçado de raios para simulação acústica de uma sala. 2015. 32 f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Este projeto se propõe a trabalhar na área da acústica, mais precisamente no campo da simulação. Serão abordados métodos de análise acústica, programas de simulação e técnicas de medições de ondas sonoras. Um programa feito por alunos e pesquisadores da UnB será utilizado para simulação acústica de uma sala.

**Palavras-chave:** acústica, simulação, ondas sonoras.

## **ABSTRACT**

PEREIRA, Lucas (aluno). Avaliação do método do traçado de raios para simulação acústica de uma sala. 2015. 32 f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Este projeto se propõe a trabalhar na área da acústica, mais precisamente no campo da simulação. Serão abordados métodos de análise acústica, programas de simulação e técnicas de medições de ondas sonoras. Um programa feito por alunos e pesquisadores da UnB será utilizado para simulação acústica de uma sala.

This project proposes to work in the acoustic area, more precisely in the simulation field. Acoustic analysis methods will be addressed, simulation programs and techniques of sound wave measurements. A program made by UNB students and researchers will be used for acoustic simulation of a room.

**Palavras-chave:** acoustic, simulation, sound wave.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Diagrama de Lindsay .....	9
Figura 2: Funcionamento básico do Método do Traçado de Raios. Os índices 1 e 2 se referem ao primeiro e segundo encontro da partícula com o receptor. ....	12
Figura 3: Método das Fontes Virtuais.....	13
Figura 4: Medição generica de uma resposta impulsiva de sala com sweep e deconvolução .....	15
Figura 5: Sala E-305 .....	18
Figura 6: Formato da sala e nomenclatura dos receptores .....	19
Figura 7: Sala E-305 com cortina aberta (ca) e com cortina fechada (cf) .....	20
Figura 8: Gráfico T20 para a frequência de 1000 Hz obtidos da medição .....	25
Figura 9: Gráfico T30 para a frequência de 1000 Hz obtidos da medição .....	26
Figura 10: Gráfico EDT para a frequência de 1000 Hz obtidos da medição .....	26
Figura 11: Gráfico T20 para a frequência de 1000 Hz obtidos da simulação .....	27
Figura 12: Gráfico T30 para a frequência de 1000 Hz obtidos da simulação .....	27
Figura 13: Gráfico EDT para a frequência de 1000 Hz obtidos da simulação .....	28
Figura 14: Comparação entre T20 a 1000 Hz da medição e da simulação.....	28
Figura 15: Comparação entre T30 a 1000 Hz da medição e da simulação.....	29
Figura 16: Comparação entre EDT a 1000 Hz da medição e da simulação.....	29
Figura 17: Tempos de reverberação recomendados em 500 Hz .....	30

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Posição do emissor e dos receptores.....	1
Quadro 2: Coeficientes de absorção acústica.....	21
Quadro 3: Coeficientes de espalhamento acústico .....	22
Quadro 4: Resultados obtidos da medição acústica .....	24
Quadro 5: Resultados obtidos da simulação acústica .....	24

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
1.1	Contexto do Tema	9
1.2	Caracterização do Problema	10
1.3	Objetivos	10
1.4	Justificativa	10
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>11</b>
2.1	Método do Traçado de Raios	11
2.2	Método das Fontes Virtuais	13
2.3	Método Híbrido	14
2.4	Técnica de medição	14
2.5	Parâmetros Acústicos	15
2.6	Coeficientes Acústicos	16
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>17</b>
3.1	Programação	17
3.2	Medição e Comparação com resultados simulados	17
3.3	Objeto de estudo	17
<b>4</b>	<b>DeseNVOLVIMENTO DO PROJETO</b>	<b>23</b>
4.1	Medição	23
4.2	Simulação	23
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>30</b>

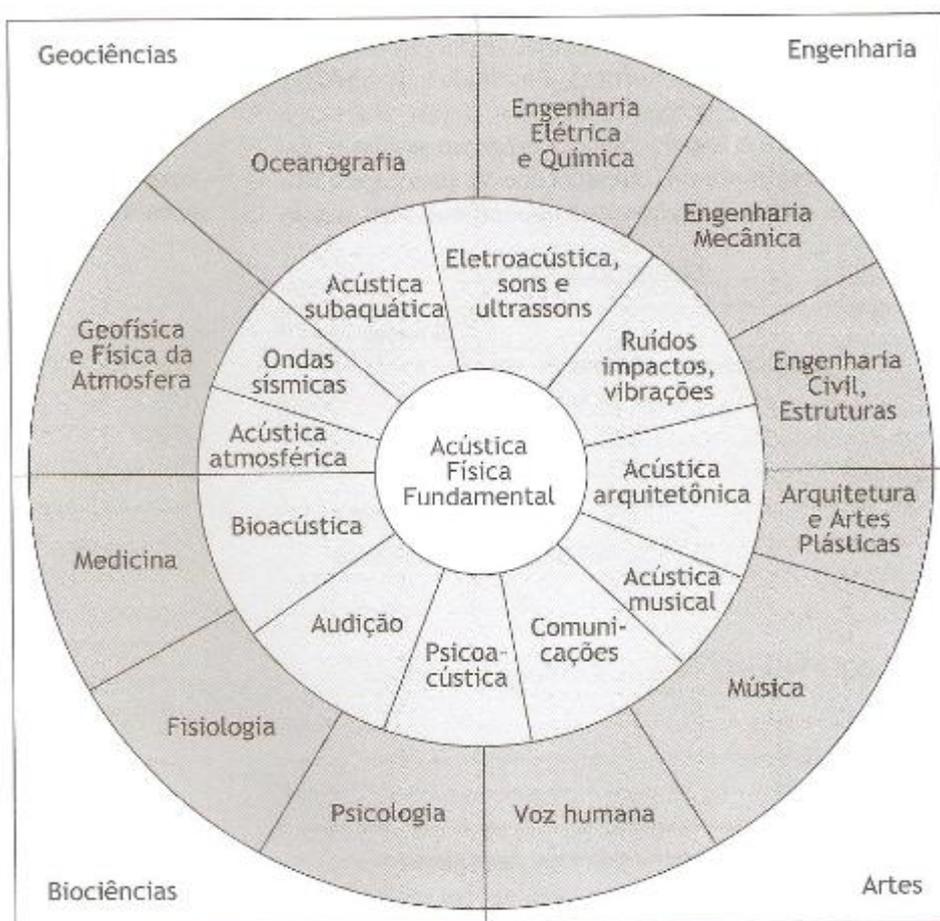
# 1 INTRODUÇÃO

A acústica para Bistafa (2011, p. 6) “é a ciência do som, incluindo sua geração, transmissão e efeitos. O som é basicamente uma radiação mecânica e pode ser gerada por causas naturais ou ação humana”. O controle do ruído é uma importante área da Acústica, pois atualmente o nível de ruído pode ser o diferencial na venda de muitos produtos, e também melhora a qualidade de vida dos trabalhadores que estão expostos a equipamentos barulhentos.

O ruído incomoda as pessoas desde tempos muito antigos. Em seu livro o professor Bistafa (2011, p. 7) conta a seguinte história “o poeta romano Juvenal (d.p. 60-131), já reclamava do ruído: Quanto sono, lhe pergunto, posso ter eu nesta estalagem. As carroças passando fazendo estrondos, os gritos dos carroceiros presos no tráfego (...)”. A tolerância do ruído não aumentou, porém hoje temos mais recurso para minimizar este inconveniente.

O estudo da acústica ganhou novo impulso durante as décadas de 80 e 90, com a crescente capacidade computacional, durante este período começou-se o desenvolvimento de técnicas de auralização, a partir daí, além de desenvolver tecnologias capazes de medir ou prever parâmetros acústicos foi possível proporcionar uma amostra audível de um determinado ambiente. “Com o desenvolvimento de áreas ligadas a realidade virtual o tema auralização ganhou novas dimensões. No início ela era usada apenas na acústica de salas, mas atualmente vem sendo utilizada em sistemas mais complexo, tais como edifícios e veículos.” (GOMES, TOURINHO, OLIVEIRA, 2011, p.1).

Este estudo abrange várias áreas, pois a acústica é um assunto multidisciplinar. Como vemos na Figura 1, o diagrama proposto por R.B. Lindsay e adaptado por Sylvio Bistafa mostra como a acústica se distribui entre vários campos do conhecimento.



**Figura 1: Diagrama de Lindsay**

Fonte: Bistafa, Sylvio R. *Acústica aplicada ao controle do ruído*/Sylvio R. Bistafa – 2.<sup>a</sup> edição – São Paulo: Bluncher, 2011

### 1.1 Contexto do Tema

O estudo do comportamento acústico de um ambiente fechado é muito importante para várias áreas da engenharia, pois desse modo os engenheiros poderão construir casas, igrejas, auditórios, automóveis e outros equipamentos com menor nível de ruído e com os efeitos sonoros desejáveis.

Particularmente na Engenharia Mecânica a acústica se insere no controle de ruídos de equipamentos mecânicos e elaboração de mecanismos que promovam sons desejados pelos clientes em determinados produtos.

Com o avanço da tecnologia, da capacidade computacional e da possibilidade de escutar o som de um modelo (Auralização) o uso de simulações para desenvolver

projetos acústicos passou a ser utilizado com mais intensidade e vem ganhando cada vez mais importância.

## **1.2 Caracterização do Problema**

Dois algoritmos usados para a simulação da acústica de ambientes são baseados nos métodos do Traçado de Raios e das Fontes Virtuais. Ambos possuem vantagens e desvantagens específicas. O método das Fontes Virtuais, por exemplo, é preciso na distribuição temporal de reflexões nas Respostas Impulsivas e é capaz de gerar um sinal com maior resolução e mais adequado para o processo de Auralização (método que transforma o sinal digital em onda sonora). Por outro lado, é mais fácil computar os efeitos de reflexões difusas através do Traçado de Raios.

O problema a ser abordado aqui é a limitação imposta pelo custo computacional do método das Fontes Virtuais em certos tipos de ambientes. Esse problema pode ser resolvido conforme (VORLAENDER, 1989), através de uma lista gerada durante a aplicação do Traçado de Raios.

## **1.3 Objetivos**

O objetivo deste estudo é testar o algoritmo Traçado de Raios através de uma comparação com os dados obtidos de uma medição de uma sala da Universidade. Além de verificar se a sala possui um tempo de reverberação adequado para uma sala de aula.

## **1.4 Justificativa**

O método das Fontes Virtuais cria Respostas Impulsivas mais precisas para o processo de Auralização (que, tecnicamente, é uma operação de convolução entre essa e uma gravação anecóica – de fala, música, ruído de motor ou ruído de um cômodo vizinho). No entanto, por conta do teste de visibilidade que o programa precisa executar a simulação de ambientes com muitas superfícies internas ou com o Tempo de Reverberação elevado torna-se computacionalmente inviável. Por outro lado, esse teste pode ser substituído por uma tabela gerada a partir de uma simulação feita com o método do Traçado de Raios.

Além disso, como eventualmente as reflexões sonoras são difusas, aproveita-se o método do Traçado de Raios também para incluir este tipo de efeito. (VORLAENDER, 2008). Devido ao maior uso e maior simplicidade do método do Traçado de Raios iremos testá-lo para verificar a sua utilidade e capacidade de atuação.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A previsão acústica de um ambiente é algo relativamente complexo, pois a propagação sonora envolve vários fenômenos como absorção, reflexão, difusão, difração, transmissão e interferência. “Existem vários métodos de análise de propagação de ondas sonoras, os mais utilizados são o de traçado de raios, o das fontes virtuais, o de traçado de cones e o de transição de energia.” (TENENBAUM, SCHAAF, 2003, p. 1). Atualmente vem sendo estudado modelos que combinem dois ou mais desses métodos e melhores resultados vem sendo obtidos. Para uma boa modelagem é necessário que o modelo de propagação sonora e que outros elementos tais como fontes, receptores e superfícies de contorno do ambiente sejam adequadamente formulados.

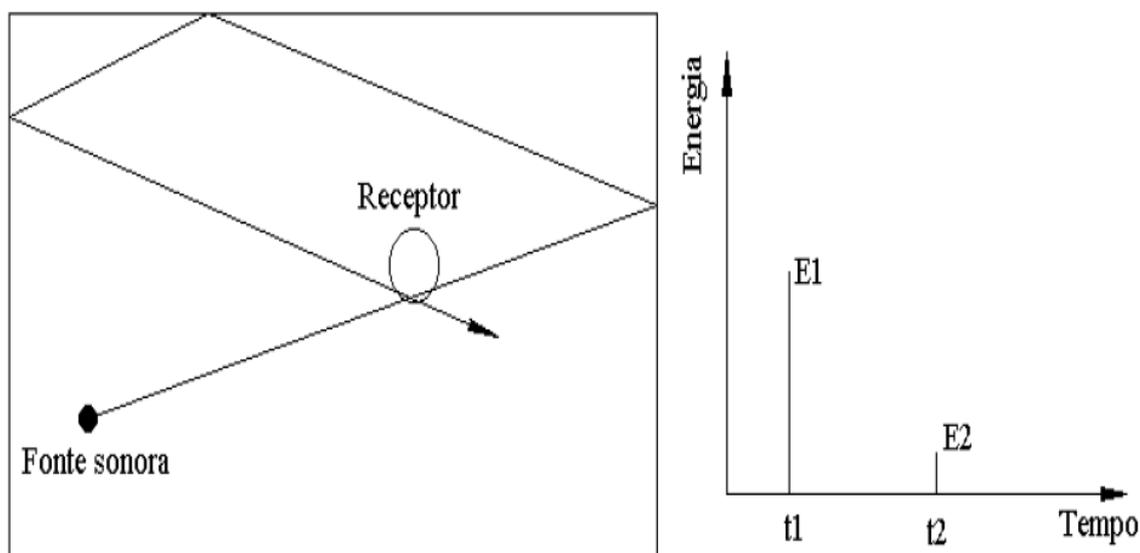
Neste trabalho iremos estudar dois métodos de análise acústica, Método de Traçado de Raios e o Método das Fontes Virtuais e um Método híbrido entre os dois.

### **2.1 Método do Traçado de Raios**

No Método do Traçado de Raios parte-se da hipótese de que uma frente de onda pode ser simplificada por um feixe de partículas ou raios, que podem ser rastreadas e seguem leis geométricas fundamentais. Cada um desses raios possui as informações do espectro de potência e da distância percorrida pela onda. O raio propaga-se em linha reta e está sujeito aos efeitos dissipativos causados pela viscosidade do meio e pelas superfícies de contorno da sala, que incluem os fenômenos de absorção, reflexão especular e reflexão difusa.

Quando uma partícula encontra o receptor, definido por uma área ou volume, a quantidade de energia contida por ela e o tempo de chegada são marcados. A Figura 2 mostra basicamente como funciona o processo.

Para a formulação correta do modelo de Traçado de Raios é necessário conhecer também a geometria do ambiente, a posição da fonte sonora, a posição do receptor e a direção inicial de propagação do raio.



**Figura 2: Funcionamento básico do Método do Traçado de Raios. Os índices 1 e 2 se referem ao primeiro e segundo encontro da partícula com o receptor.**

Fonte: Gomes, M.H.A.; Bertoli, S.R.; Dedecca, J.G. Implementação de Métodos para a Simulação Acústica e Auralização de Salas. *Acústica e Vibrações*, revista da Sociedade Brasileira de Acústica, Campinas, S.P., março de 2007.

De acordo com (FARINA; TENENBAUM, 2002), a contribuição energética por banda de oitava para cada vez que uma partícula encontra um receptor é dado por:

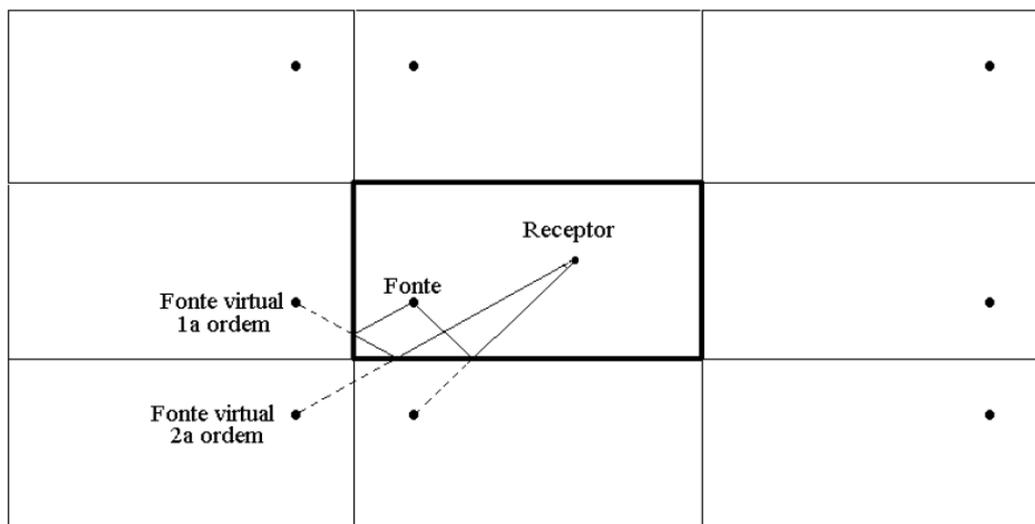
$$E = \frac{WD_{\theta\phi}}{NcV_r} L \left( \prod_i (1 - \alpha_i) \right) e^{-\gamma x} \quad (1)$$

Onde  $W$  é a potência da fonte sonora na banda de frequência em questão,  $D$  é seu coeficiente de direcionalidade,  $c$  é velocidade do som,  $V_r$  é o volume do receptor,  $L$  é a distância percorrida pelo raio dentro do receptor,  $\alpha$  são os coeficientes de absorção das superfícies da sala já interceptadas pela partícula,  $\gamma$  é o coeficiente de atenuação do ar,  $N$  é o número total de raios emitidos pela fonte e  $x$  é a distância percorrida por um raio de som.

## 2.2 Método das Fontes Virtuais

Este Método admite que as paredes do ambiente se comportam como espelhos e o receptor pode receber um raio sonoro da fonte real, das suas imagens projetadas na parede e das imagens das imagens. As primeiras imagens são denominadas de primeira ordem e as outras são imagens de ordens superiores.

A Figura 3 ilustra os princípios básicos do Método das Fontes Virtuais.



**Figura 3: Método das Fontes Virtuais**

**Fonte:** Gomes, M.H.A.; Bertoli, S.R.; Dedecca, J.G. Implementação de Métodos para a Simulação Acústica e Auralização de Salas. *Acústica e Vibrações*, revista da Sociedade Brasileira de Acústica, Campinas, S.P., março de 2007.

O primeiro passo para iniciar o estudo por este método consiste em identificar as fontes virtuais. O número de ordens de geração de fontes virtuais continua até que seja atingido um valor pré-estabelecido. Quanto maior a ordem de uma fonte virtual maior foi o número de reflexões que ele sofreu. A energia de cada fonte virtual, ponderada pelo coeficiente de absorção da parede envolvida na sua geração e pela distância percorrida até o receptor, é registrada para a construção da resposta impulsiva.

Quando o ambiente não é retangular, certas fontes virtuais correspondem a reflexões que não ocorrem na realidade, essas fontes são chamadas de invisíveis. Então um teste de visibilidade deve ser feito para cada fonte virtual. A determinação

das fontes virtuais e os testes de visibilidade devem ser feitos para um número de fontes dado por (RINDEL, 2000)

$$N_f = (n - 1)^i \quad (2)$$

onde  $n$  é número de superfícies e  $i$  é a ordem de reflexão.

O Método das Fontes Virtuais apresenta alta resolução temporal da Resposta Impulsiva (VORLANDER, 1989), desse modo à exigência computacional é grande, tornado a modelagem inviável em algumas situações.

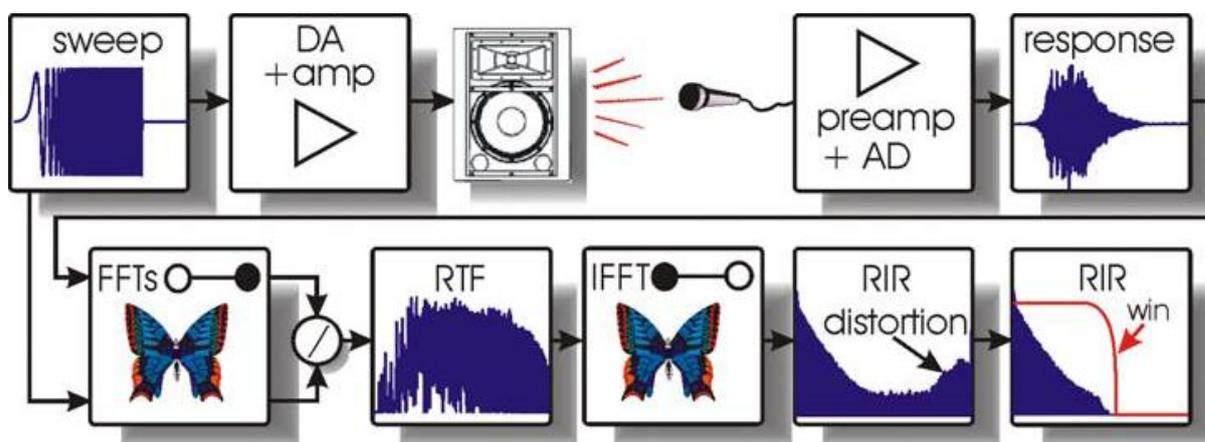
### **2.3 Método Híbrido**

O Método Híbrido consiste na combinação dos métodos descritos anteriormente obtendo o que cada método tem de melhor para determinada geometria e tamanho do ambiente estudado.

### **2.4 Técnica de medição**

Utilizaremos o método da Deconvolução aliada à varredura de senos para fazer as medições. O método é ilustrado na Figura 4 e mostra que a Resposta Impulsiva é obtida a partir de uma Transformada Inversa de Fourier (IFFT – “Inverse Fast Fourier Transform”) do resultado da divisão do sinal capturado no microfone e do sinal utilizado como excitação, após serem transformados para o domínio da frequência.

Podem-se utilizar vários tipos de sinais de excitação, mas, de acordo com Muller e Massarani, 2001, há vantagens em se utilizar uma varredura de senos. Como o sinal de excitação é sempre o mesmo, variações nas respostas podem ser atribuídas a componentes alheios ao sistema medido e podem ser minimizados a partir da realização de médias dos resultados. Além disso, efeitos de distorção na cadeia de medição podem ser separados da resposta linear do sistema, segundo os mesmos autores.



**Figura 4: Medição generica de uma resposta impulsiva de sala com sweep e deconvolução**

Fonte: S. Muller, P. Massarani; Transfer function measurement with sweeps. *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol 49, n. 6, june, 2011.

## 2.5 Parâmetros Acústicos

Tempo de Reverberação: É o tempo necessário para que o nível de pressão sonora, em um ambiente, diminua 60 dB. No caso deste trabalho, o tempo de reverberação é baseado no termo T20 e T30, utilizado por questões normativas haja vista que em alguns ambientes, a diferença entre o nível gerado pela fonte e o nível de ruído de fundo, não chegam a apresentar uma diferença de 60 dB. No Brasil não existe norma que estabeleça valores ideais para o tempo de reverberação em salas de aula. Porém, segundo a norma ANSI S 12.60 / 2002, o tempo de reverberação ótimo para uma sala de aula varia entre 0,4 e 0,6 segundos.

Tempo de Decaimento Inicial (EDT – Early Decay Time): É o tempo necessário para que a curva de decaimento energético caia os primeiros 10 dB. A taxa de decaimento inicial de sons é tão importante quanto o tempo de reverberação (TR). Pois, um decaimento inicial rápido, é interpretado pelo ouvido humano como se o tempo de reverberação de um ambiente fosse curto. Para ambientes em que a fala deve ser privilegiada, deseja-se que esta tenha Intimidade – parâmetro subjetivo relacionado ao EDT que promove a sensação de que a sala possui um volume menor do que seu volume real. Recomenda-se que os valores obtidos para este

parâmetro, para a finalidade do ambiente estudado, sejam menores do que 1 segundo.

Nível de Pressão Sonora (NPS): É definido como o valor quadrático médio da pressão exercida em um determinado ponto por intervalo de tempo, causada por uma onda sonora. A fórmula para calcular o NPS é dada por  $20 \cdot \log(P/P_0^2)$ .

## **2.6 Coeficientes Acústicos**

Coeficiente de absorção acústica: É a capacidade do material em absorver a energia de uma onda sonora. Esse valor varia entre 0 e 1, sendo 1 a absorção total da energia.

Coeficiente de espalhamento acústico: Esse coeficiente atribui um valor ao tipo de reflexão sofrida pela onda. Esse valor varia entre 0 e 1, sendo 0 uma reflexão totalmente especular.

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

#### **3.1 Programação**

O programa de acústica desenvolvido pelos alunos e pesquisadores da UnB foi escrito na linguagem C e utilizado para fazer a simulação.

#### **3.2 Medição e Comparação com resultados simulados**

A medição de Respostas ao Impulso será feita com equipamentos da UTFPR (Amplificador de potência, Alto-falante dodecaédrico, microfone de medição de ½ polegada, pré-amplificador, fonte de alimentação para microfone, conversor AD/DA – placa de som RME Fireface II) e um programa implementado como “Toolbox” para medições acústicas do Matlab (ITA-Toolbox).

As Respostas ao Impulso e as curvas de decaimento medidas serão diretamente comparadas com as simuladas. Além disso, os parâmetros Early Decay Time (EDT), Tempo de Reverberação e “Definição” serão obtidos por uma rotina comum implementada no programa Matlab.

#### **3.3 Objeto de estudo**

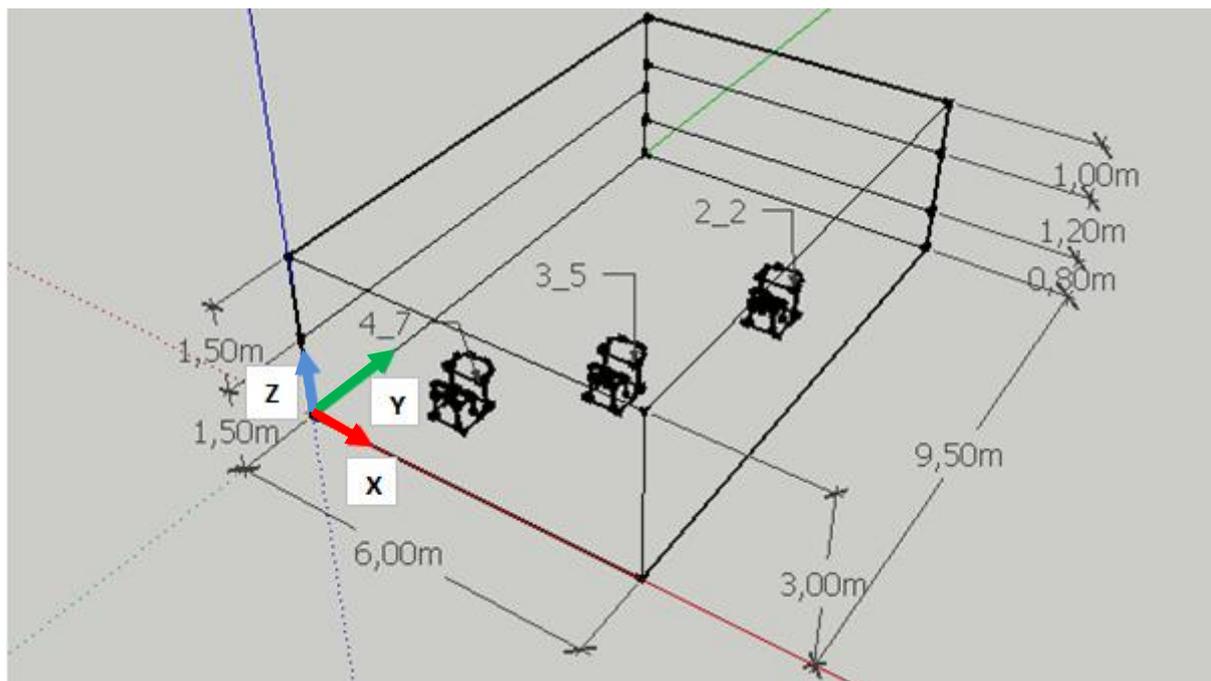
A sala utilizada para realizar o experimento foi a sala E-305.

Como podemos ver na Figura 5 as carteiras na sala E-305 estão divididas em 5 colunas e 8 fileiras. O Emissor dodecaédrico foi posicionado na frente da sala, simulando um professor. Os 3 receptores testados estão em vermelho.



**Figura 5: Sala E-305**

Na Figura 6 mostramos o formato da sala e a origem do sistema de coordenadas proposto para efetuarmos as medições. O nome de cada receptor foi estabelecido devido à posição na coluna e na fila de carteiras.

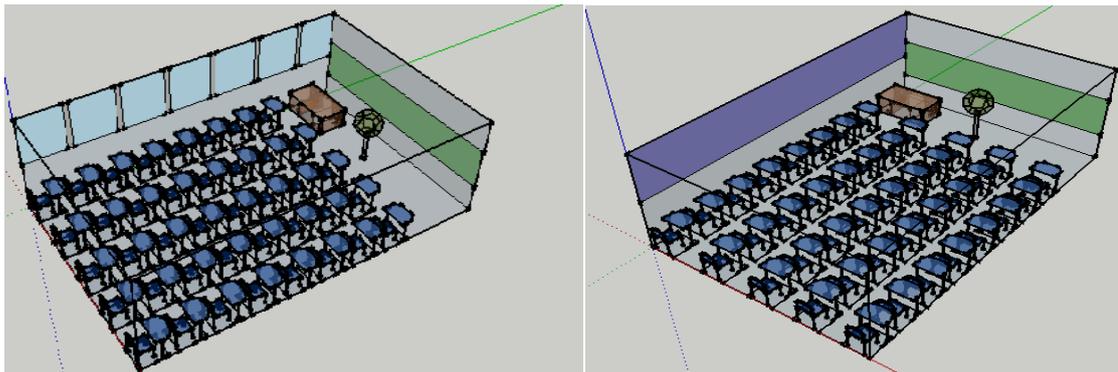


**Figura 6: Formato da sala e nomenclatura dos receptores**

De acordo com o sistema de coordenada adotado a posição do emissor e dos receptores está descrito no Quadro 1:

	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
Emissor	3	8.5	1.7
Receptor 2_2	4.5	6.5	1
Receptor 3_5	3	3	1
Receptor 4_7	1.5	1.5	1

**Quadro 1: Posição do emissor e dos receptores**



**Figura 7: Sala E-305 com cortina aberta (ca) e com cortina fechada (cf)**

Para fazer a simulação a sala ficou dividida em 8 partes e cada parte da sala teve um coeficiente de absorção e espalhamento para cada frequência testada. Os valores desses coeficientes foram retirados do livro *Acústica aplicada ao controle do ruído*/Sylvio R. Bistafa, como apresentado no Quadro 2 e no Quadro 3.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Fundo da sala (DIVISÓRIA)	0.58	0.22	0.08	0.06	0.06
Em baixo do quadro (DIVISÓRIA)	0.58	0.22	0.08	0.06	0.06
Quadro	0.30	0.12	0.08	0.06	0.06
Em cima do quadro (DIVISÓRIA)	0.58	0.22	0.08	0.06	0.06
Parede porta (DIVISÓRIA)	0.58	0.22	0.08	0.06	0.06
Parede janela (concreto)	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09
Janela	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07
Cortina	0.14	0.35	0.55	0.72	0.70
Piso (carteiras)	0.08	0.16	0.22	0.23	0.24
Teto (concreto)	0.10	0.05	0.06	0.07	0.09

**Quadro 2: Coeficientes de absorção acústica**

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Fundo da sala (DIVISÓRIA)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Em baixo do quadro (DIVISÓRIA)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Quadro	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Em cima do quadro (DIVISÓRIA)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Parede porta (DIVISÓRIA)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Parede janela (concreto)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Janela	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Cortina	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Piso (carteiras)	0.05	0.1	0.3	0.6	0.5
Teto (concreto)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

**Quadro 3: Coeficientes de espalhamento acústico**

## **4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO**

### **4.1 Medição**

As medições foram realizadas sem alunos dentro, apenas com duas pessoas para realizar as medições. Foram feitas as medições nas posições citadas e as Respostas ao Impulso (RIs) foram tratadas no MatLab para se obter os tempos de reverberação T20, T30 e o EDT.

### **4.2 Simulação**

A simulação foi feita utilizando o programa feito pelos alunos da UnB orientados pelo professor Márcio Avelar. O programa utiliza a método acústico Traçado de Raios para tratar os dados e fazer a simulação. No final o programa gera os Tempos de Reverberação T20, T30 e EDT para posteriormente serem comparados e discutidos com os dados medidos.

O tamanho do receptor utilizado era de 0,1 m. A velocidade do som no ar de 343 m/s. O número de raios utilizado para simular o sweep foi de 20000.

O volume da sala é de 171 m<sup>3</sup>.

## 5 RESULTADOS

Os resultados obtidos foram os tempos de reverberação T20 e T30, além do EDT. Os dados obtidos da medição estão informados no Quadro 4.

	T20					T30					EDT				
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	<b>1000 Hz</b>	2000 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	<b>1000 Hz</b>	2000 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	<b>1000 Hz</b>	2000 Hz
2_2_ca // medição	2,198	1,542	0,973	<b>0,756</b>	0,762	2,198	1,376	0,993	<b>0,740</b>	0,751	2,195	1,367	1,157	<b>0,77</b>	0,601
2_2_cf // medição	2,055	1,262	0,826	<b>0,695</b>	0,633	2,065	1,223	0,846	<b>0,690</b>	0,658	1,466	1,247	0,854	<b>0,649</b>	0,588
3_5_ca // medição	2,428	1,511	1,04	<b>0,784</b>	0,746	2,759	1,596	1,08	<b>0,797</b>	0,744	1,959	1,62	0,982	<b>0,754</b>	0,749
3_5_cf // medição	2,177	1,272	0,780	<b>0,699</b>	0,619	2,452	1,454	0,855	<b>0,707</b>	0,647	1,841	1,343	0,783	<b>0,713</b>	0,589
4_7_ca // medição	2,077	1,604	0,976	<b>0,815</b>	0,753	2,101	1,512	1,005	<b>0,808</b>	0,760	1,351	1,395	1,015	<b>0,822</b>	0,693
4_7_cf // medição	2,061	1,413	0,775	<b>0,699</b>	0,635	2,19	1,495	0,828	<b>0,702</b>	0,667	1,428	1,152	0,825	<b>0,661</b>	0,633

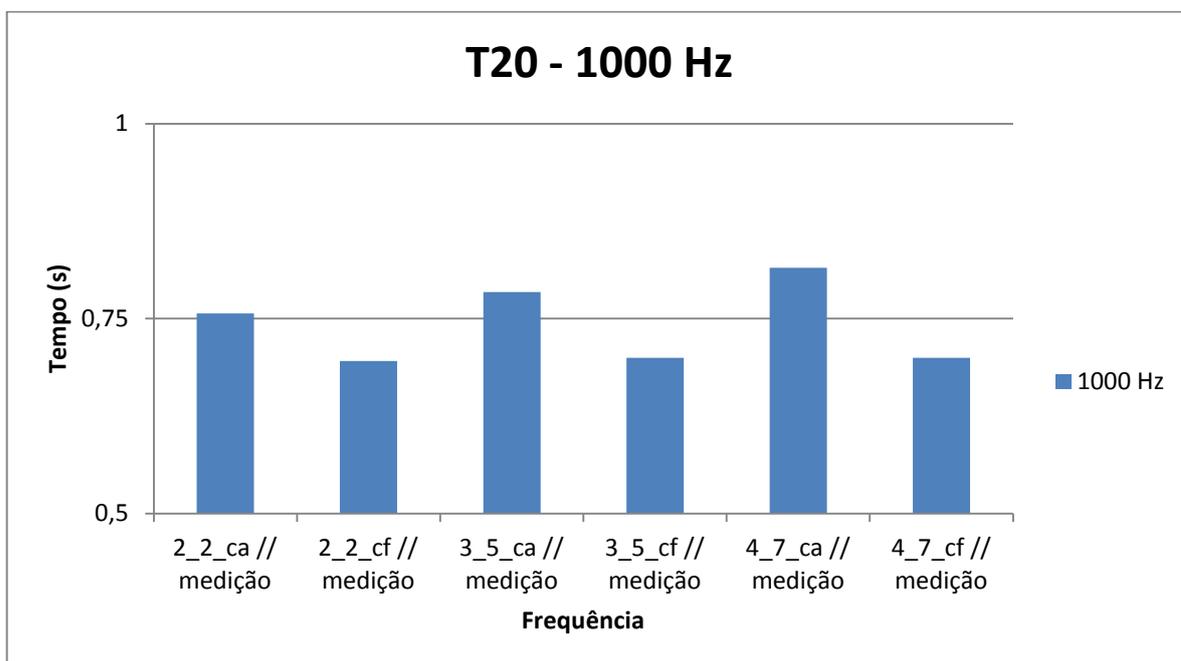
**Quadro 4: Resultados obtidos da medição acústica**

Os dados obtidos da simulação estão informados no Quadro 5.

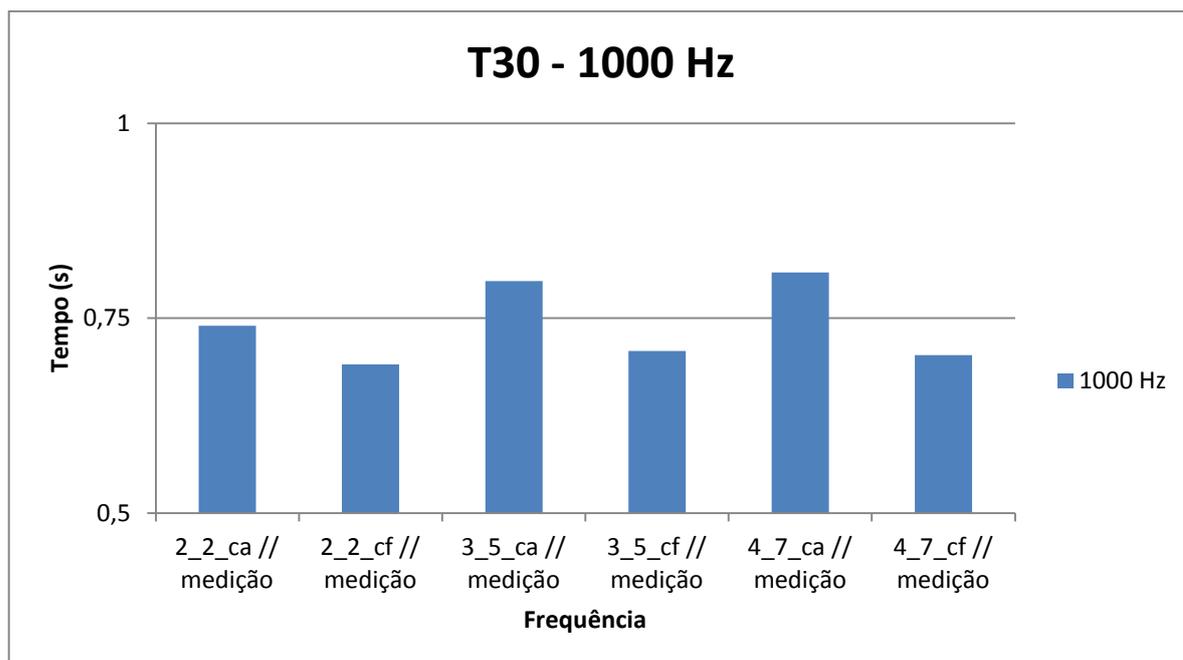
	T20					T30					EDT				
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	<b>1000 Hz</b>	2000 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	<b>1000 Hz</b>	2000 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	<b>1000 Hz</b>	2000 Hz
2_2_ca // simulação	1,976	1,653	1,443	<b>1,373</b>	1,233	2,029	1,702	1,481	<b>1,3</b>	1,16	1,92	1,451	1,206	<b>1,137</b>	0,997
2_2_cf // simulação	2,597	1,635	0,839	<b>1,084</b>	1,023	2,653	1,481	1,096	<b>1,026</b>	1,166	2,518	1,539	1,031	<b>,874</b>	0,804
3_5_ca // simulação	2,79	1,705	1,303	<b>1,285</b>	1,102	1,86	1,679	1,387	<b>1,247</b>	1,3	2,09	1,55	1,486	<b>1,189</b>	1,084
3_5_cf // simulação	2,632	2,204	1,005	<b>0,97</b>	0,927	2,723	1,62	0,921	<b>1,02</b>	0,722	2,571	1,819	1,364	<b>0,962</b>	0,857
4_7_ca // simulação	0,585	1,644	1,583	<b>1,311</b>	1,049	1,9	1,475	1,335	<b>1,311</b>	1,16	1,819	1,749	1,399	<b>1,346</b>	1,311
4_7_cf // simulação	2,763	1,425	1,005	<b>0,839</b>	0,804	2,717	1,527	1,107	<b>0,897</b>	1,049	2,676	1,626	1,031	<b>0,979</b>	1,049

**Quadro 5: Resultados obtidos da simulação acústica**

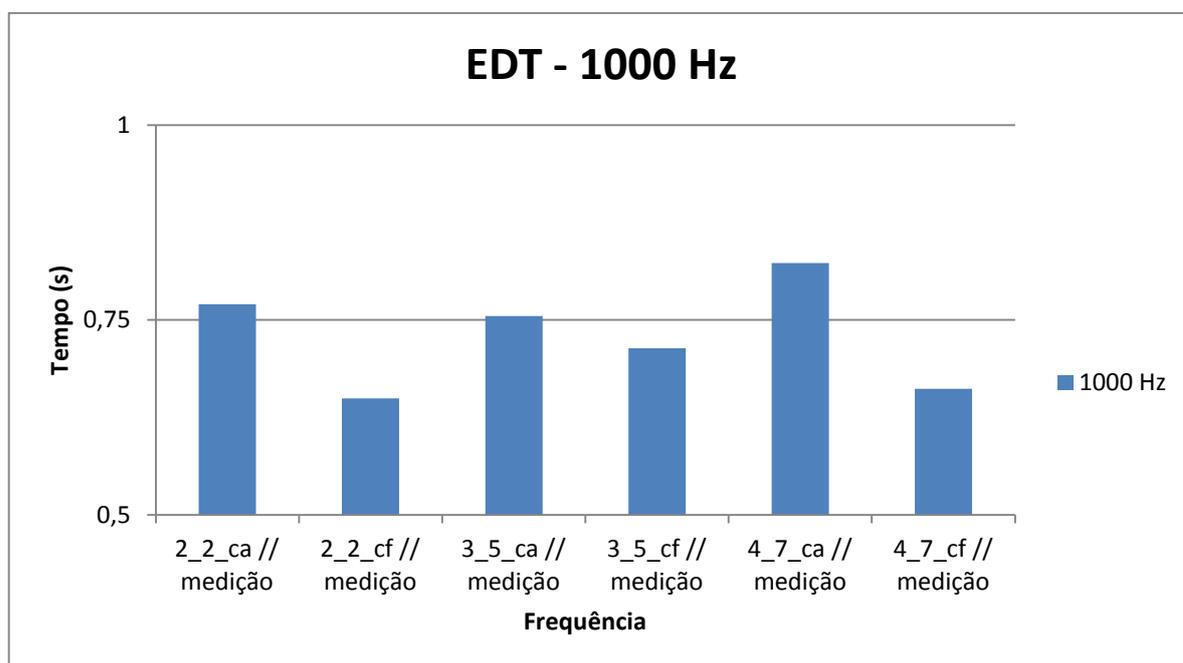
Para efeito de estudo e comparação foi utilizado a frequência de 1000 Hz, visto que para simulação utilizando o método Traçado de Raios entradas com baixa frequência não funcionam bem. As Figuras 8, 9 e 10 mostram através de gráficos as comparações entre os valores medidos com a cortina aberta, ou seja, com as ondas sonoras se chocando contra a janela e com a cortina fechada. Também podemos observar a diferença entres os tempos de reverberação e EDT entre as diferentes posições do receptor.



**Figura 8: Gráfico T20 para a frequência de 1000 Hz obtidos da medição**

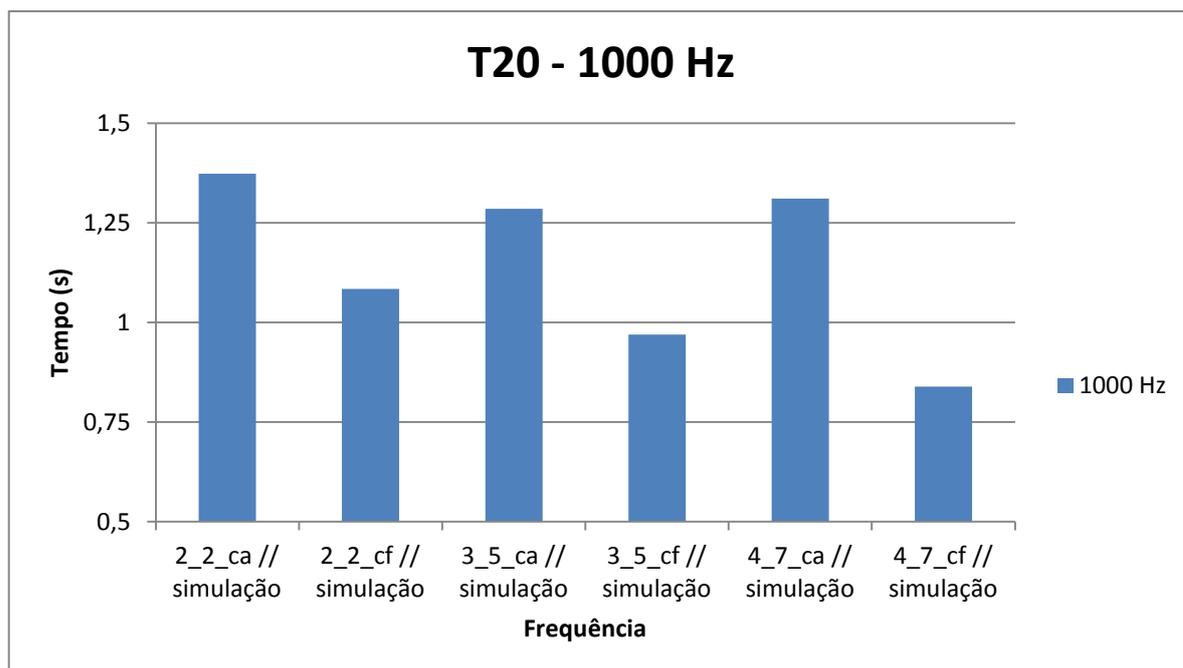


**Figura 9: Gráfico T30 para a frequência de 1000 Hz obtidos da medição**

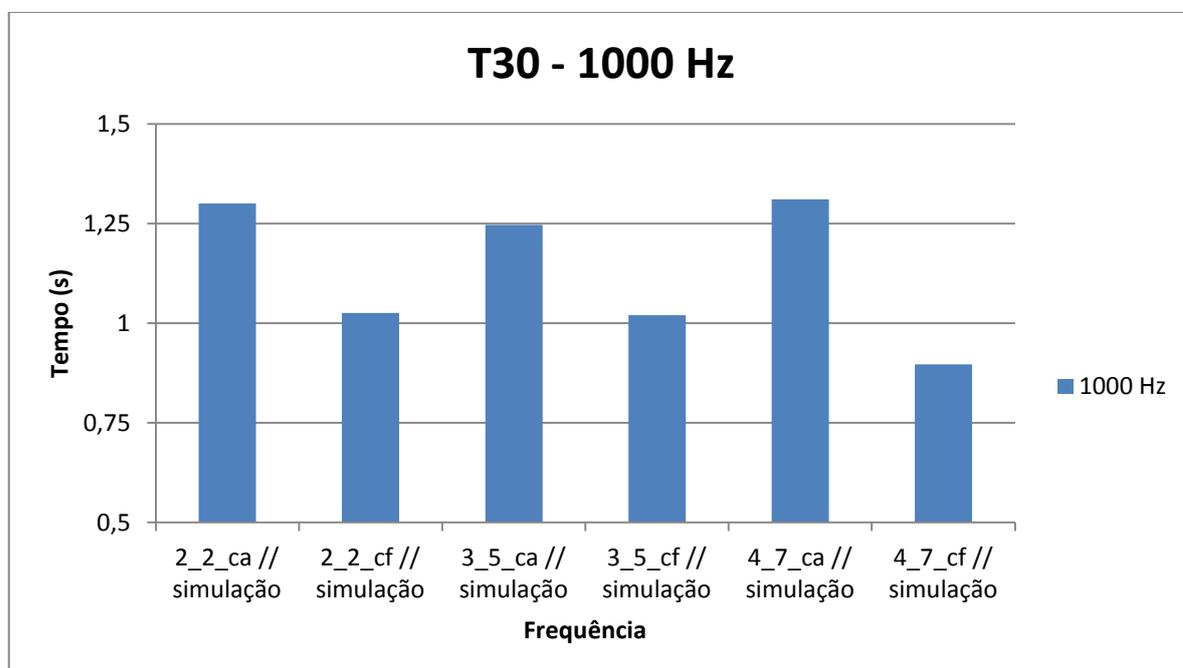


**Figura 10: Gráfico EDT para a frequência de 1000 Hz obtidos da medição**

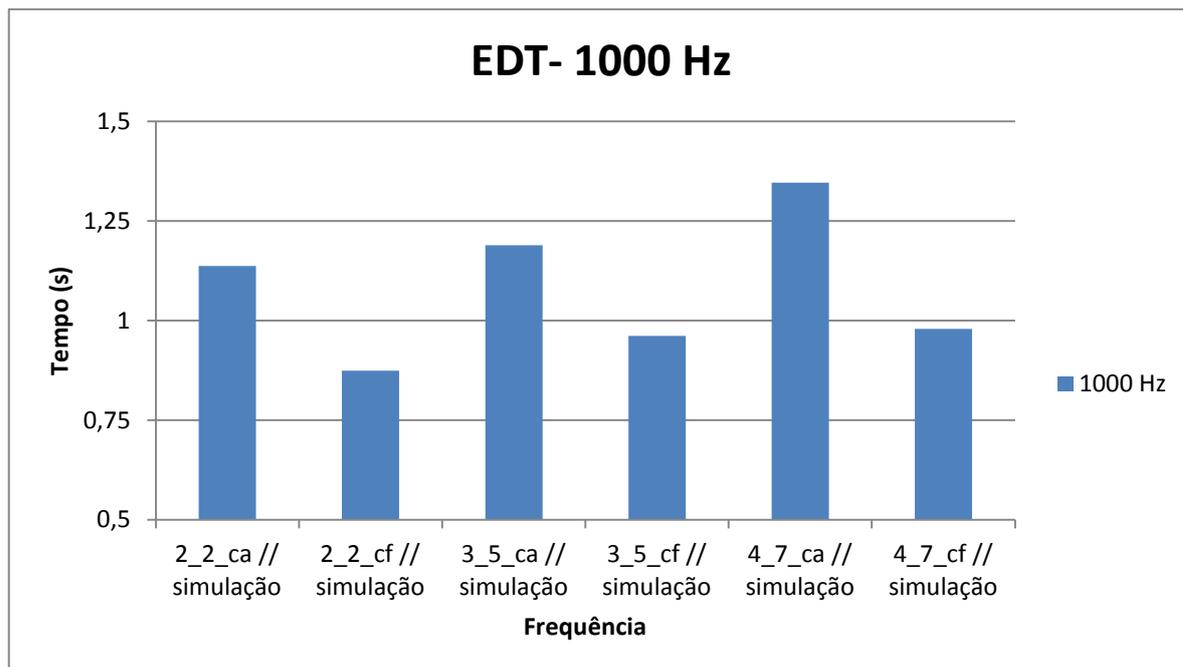
As figuras 11, 12 e 13 ilustram os valores T20, T30 e EDT obtidos da simulação utilizando o programa feito pelos alunos da Unb.



**Figura 11: Gráfico T20 para a frequência de 1000 Hz obtidos da simulação**

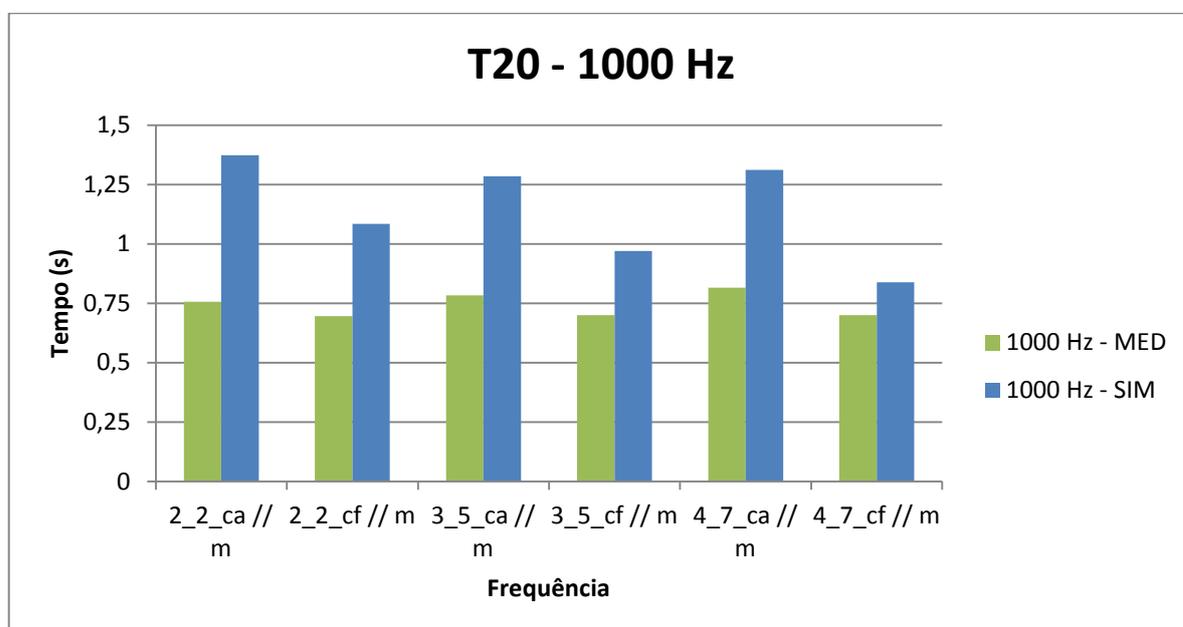


**Figura 12: Gráfico T30 para a frequência de 1000 Hz obtidos da simulação**



**Figura 13: Gráfico EDT para a frequência de 1000 Hz obtidos da simulação**

As figuras 14, 15 e 16 comparam para a frequência de 1000 Hz os valores medidos com os simulados.



**Figura 14: Comparação entre T20 a 1000 Hz da medição e da simulação**

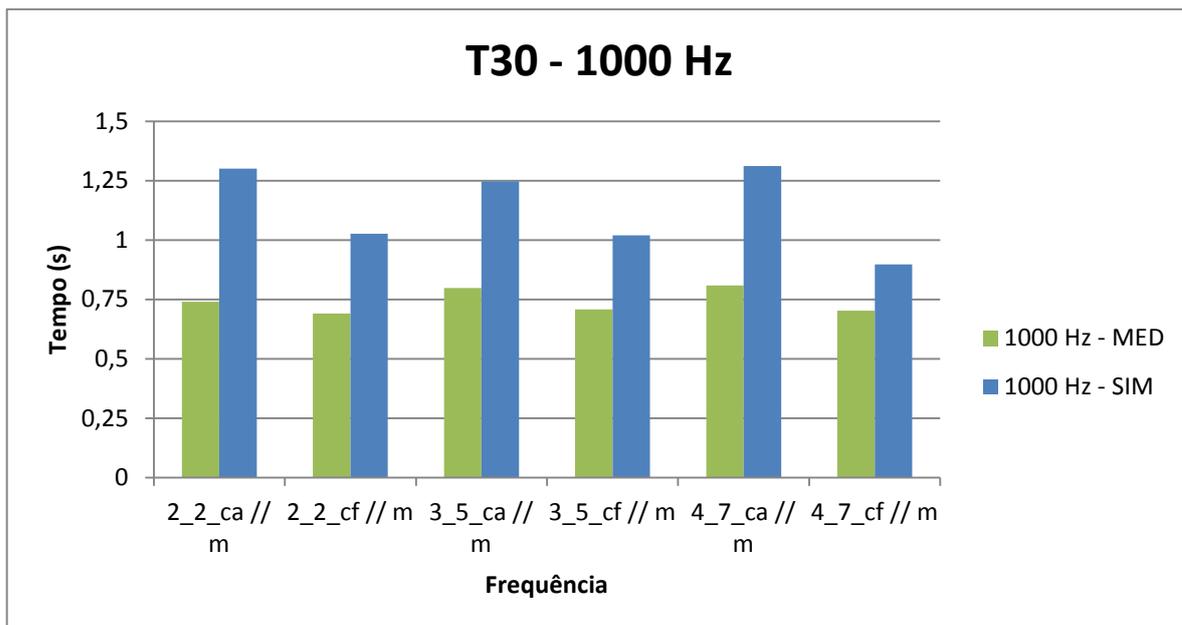


Figura 15: Comparação entre T30 a 1000 Hz da medição e da simulação

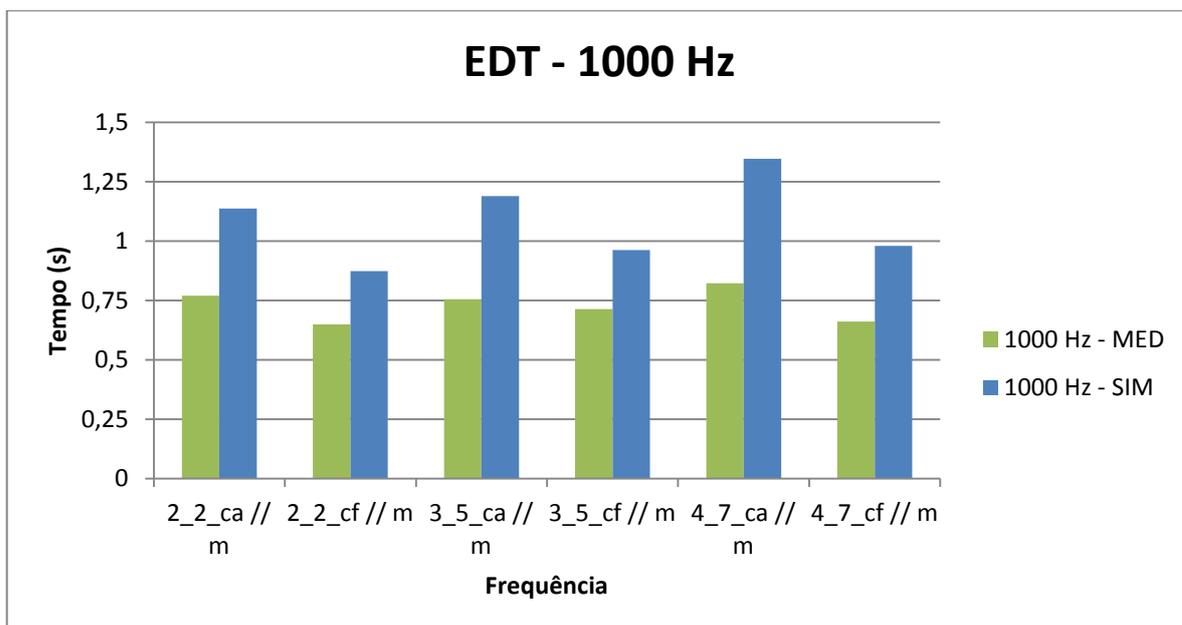


Figura 16: Comparação entre EDT a 1000 Hz da medição e da simulação

## 6 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos podemos observar que com a cortina fechada os tempos de reverberação e EDT foram sempre menores do que com a cortina fechada, pois a cortina possui um coeficiente de absorção das ondas sonoras maiores que da janela. Isto foi verificado tanto na medição quanto na simulação.

Quando comparados os valores medidos com os valores simulados verificamos que os valores simulados ficaram acima dos valores medidos. O principal fator para o desvio foi o fato de não encontrarmos na literatura um valor coerente para o coeficiente de absorção das divisórias utilizadas nas paredes da sala. Os valores utilizados foram retirados do livro do professor Bistafa para uma divisória de madeira compensada.

A Figura 17 ilustra o tempo de reverberação recomendado para uma sala. No caso da sala E-305 que tem  $171 \text{ m}^3$  de volume o tempo de reverberação adequado para a frequência de 500 Hz é de 0,55 segundos. O tempo de reverberação médio medido da sala foi de 0,92 segundos. Portanto, concluímos que a sala não apresenta boas condições de absorção sonora.

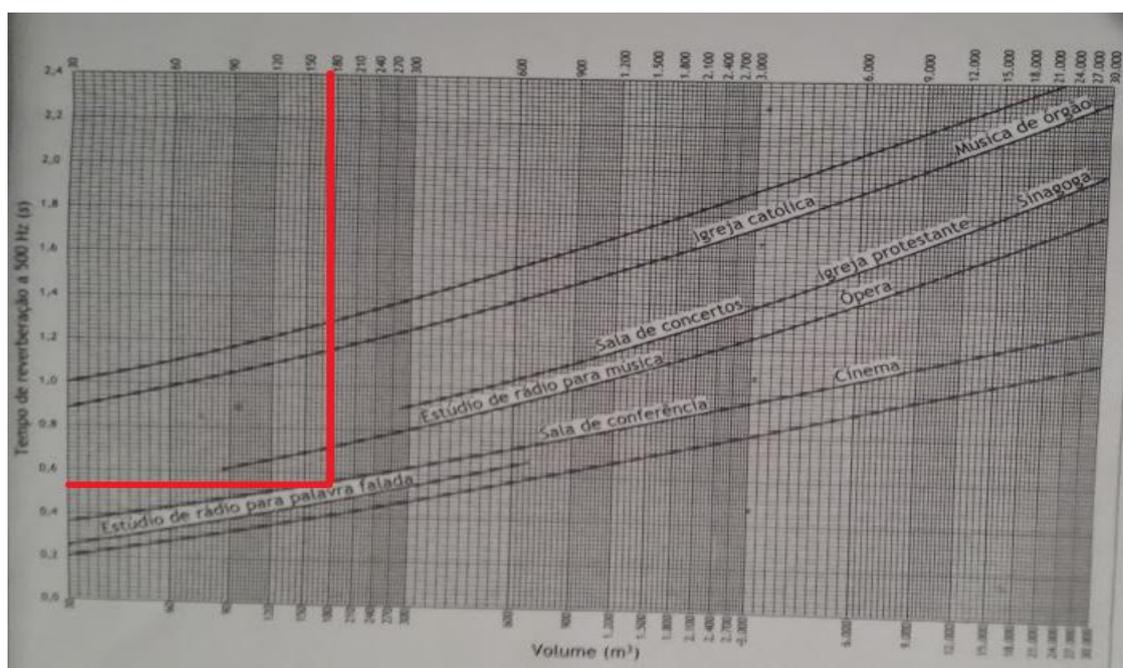


Figura 17: Tempos de reverberação recomendados em 500 Hz

## REFERÊNCIAS

Bistafa, Sylvio R. Acústica aplicada ao controle do ruído/Sylvio R. Bistafa – 2.<sup>a</sup> edição – São Paulo: Bluncher, 2011.

Gomes, M.H.A.; Bertoli, S.R.; Dedecca, J.G. Implementação de Métodos para a Simulação Acústica e Auralização de Salas. Acústica e Vibrações, revista da Sociedade Brasileira de Acústica, Campinas, S.P., março de 2007.

Gomes, M.H.A.; Tourinho, A.M.C.; Oliveira, A.B.S. Simulações e medições acústicas de uma cavidade adotada como referência em estudos vibro-acústicos. Acústica e Vibrações, revista da Sociedade Brasileira de Acústica, Brasília, D.F., n. 43, setembro de 2011.

Camilo, T. S.; Tenenbaum, R.A.; Método Híbrido para Simulação Numérica de Acústica de Salas: Combinação dos Métodos de Traçado de Raios e Transição de Energia. Tese COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

S. Muller, P. Massarani; Transfer function measurement with sweeps. Journal of the Audio Engineering Society, Vol 49, n. 6, june, 2011.

Vorlaender, M.; Simulation of the Transient and Steady-state Sound Propagation in Rooms Using a New Combined Ray-tracing/Image-source Algorithm. Journal of the Acoustical Society of America, n. 86, july, 1989.

Medrado, L.O, Tenenbaum, R.A.; Simulação Numérica de Acústica de Raios: Implementação do Código Computacional RAIOS e sua Validação por Comparação. Anais do XX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica – SOBRAC, Rio de Janeiro, outubro, 2002.

Rindel, J.H.; The Use of Computer Modeling in Room Acoustics. Journal of Vibroengineering. Paper of the International Conference Baltic-Acoustic, 2000.

Vorlaender, M.; Auralization, Springer, 2008.