

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**OBTENÇÃO DE PARÂMETROS PARA A AVALIAÇÃO DA
QUALIDADE ACÚSTICA DE SALAS ATRAVÉS DA TÉCNICA MLS E
ACÚSTICA DE RAIOS**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

MÁRCIO HENRIQUE DA AVELAR GOMES

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 1998.

**OBTENÇÃO DE PARÂMETROS PARA A AVALIAÇÃO DA
QUALIDADE ACÚSTICA DE SALAS ATRAVÉS DA TÉCNICA MLS E
ACÚSTICA DE RAIOS**

MÁRCIO HENRIQUE DA AVELAR GOMES

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



Prof. Samir N. Y. Gerges, PhD. – Orientador



Prof. Abelardo de Queiroz, PhD.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA



Prof. Arcanjo Lenzi, PhD. – Presidente



Prof. Fernando O. Ruttkay Pereira, PhD.



Prof. Roberto Jordan, Dr.Eng.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Samir, pela oportunidade, apoio e orientação;

Ao colega Mauricy, por horas de paciência, discussões e incentivo;

Aos Professores e colegas do Laboratório de Vibrações e Acústica;

À Profa. Stelamaris Rolla e ao Prof. José Roberto de França Arruda, pelo incentivo e apoio quanto à minha decisão de estudar Acústica;

Ao Sr. Pedro Magyar (um dos pesquisadores pioneiros na área de acústica no Brasil), pelo incentivo e pela cessão de uma grande quantidade de publicações que foram prontamente aproveitadas na pesquisa bibliográfica feita para este trabalho;

Aos meus pais, em especial, pelo apoio e carinho dado em todas as horas de decisão.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	vi
LISTA DE FIGURAS E TABELAS	viii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Psico-Acústica.....	5
2.2 Acústica Estatística.....	11
2.3 Ondas Acústicas.....	14
2.3.1 O campo acústico em um ambiente fechado.....	14
2.3.2 Modos acústicos em salas retangulares de paredes rígidas.....	17
2.3.3 Salas retangulares com as paredes não rígidas.....	20
2.3.4 Campo acústico estacionário.....	22
2.3.5 Reverberação e atenuação dos modos em uma sala.....	23
2.4 Raios Acústicos.....	25
2.4.1 O algoritmo fonte imagem especular (“image-source”).....	26
2.4.2 O algoritmo de raios acústicos (ray-tracing).....	29
2.4.3 Algoritmos híbridos para o cálculo de respostas impulsivas.....	31
2.4.4 Considerações sobre respostas impulsivas e outros problemas envolvidos na aplicação dos algoritmos descritos.....	33
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A TÉCNICA DE MEDIÇÃO	
UTILIZADA: MAXIMUM LENGTH SEQUENCE (MLS)	35
3.1 Introdução.....	35
3.2 “Novo” método para a medição do Tempo de Reverberação.....	36
3.3 O uso de “Maximum-Length Sequences” (MLS) para a determinação de	

respostas impulsivas de sistema lineares e invariantes com o tempo.....	39
3.4 Abordagem do uso de MLS, quanto à teoria de sinais discretos.....	44
3.5 Aspectos práticos do uso de MLS.....	47
3.6 Considerações quanto ao uso de MLS para medição de respostas impulsivas em salas ocupadas.....	52
4 DETERMINAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	55
4.1 Determinação da caixa acústica a ser usada no sistema de medição.....	55
4.2 Otimização da faixa dinâmica do sistema de medição.....	61
4.3 Comparação de Tempo de Reverberação, medido com o sistema MLS e outro tipo de sistema.....	65
4.4 Procedimento experimental adotado para a medição das salas.....	69
5 SIMULAÇÕES: DESCRIÇÃO DAS SALAS UTILIZADAS NESTE ESTUDO E TESTES DE CONVERGÊNCIA DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS SIMULADOS PARA AS SALAS.....	71
5.1 Descrição das salas utilizadas neste estudo.....	72
5.2 Verificação da convergência dos parâmetros acústicos calculados, em função da escolha dos parâmetros de entrada (N e R).....	76
6 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS SIMULADOS E MEDIDOS.....	84
6.1 Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica.....	85
6.2 Teatro do Centro Integrado de Cultura (CIC).....	97
7 COMENTÁRIOS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	113
7.1 Comentários e conclusões.....	113
7.2 Sugestões para futuros trabalhos.....	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
APÊNDICE 1: Detalhes do equipamento utilizado.....	121
APÊNDICE 2: Coeficientes de absorção adotados nas simulações.....	122
APÊNDICE 3: Relação entre os elementos dos modelos e o tipo de material associado à superfície em questão.....	125
APÊNDICE 4: Equações para alguns parâmetros acústicos.....	128

RESUMO

Ferramentas de avaliação da qualidade acústica de uma sala vêm sendo desenvolvidas há vários anos, mas só recentemente, com os avanços na área de psico-acústica e a tendência entre os pesquisadores a se chegar a um consenso sobre quais parâmetros acústicos são realmente importantes para realizar esta avaliação, tem se verificado um desenvolvimento significativo do conhecimento e da tecnologia envolvida no estudo da acústica de salas. Grande parte destes parâmetros pode ser determinada a partir da resposta impulsiva entre dois pontos em uma sala. Neste trabalho alguns parâmetros acústicos determinados das respostas impulsivas em duas salas foram calculados usando um programa comercial de raios acústicos e os resultados comparados àqueles obtidos através de uma das técnicas mais modernas de medição de respostas impulsivas em salas, cujo sinal de excitação é um sinal pseudo-aleatório denominado "Maximum Length Sequence" (MLS). Limitações existentes, tanto na aplicação desta ferramenta de medição (MLS), quanto no uso do programa são descritas na dissertação.

Além disso, uma revisão bibliográfica aborda brevemente alguns aspectos relacionados aos avanços na área de Psico-acústica e também descreve cada uma das teorias que servem de base para o estudo de características acústicas de salas nos dias de hoje.

Palavras-chaves: [Maximum Length Sequence], [Acústica de Salas], [Acústica Arquitetônica], [Acústica de Raios]

Abstract

Advances in psychoacoustics through the years, have made it possible to evaluate the acoustical quality of a room, based on several numerical parameters that have been developed. Even though there is not a total agreement about which parameters are truly important, some of them are accepted by most of the acousticians. Most of these parameters can be determined from the impulse responses of a room. This work presents a comparison between results simulated using a commercial ray-tracing computer program, and measured with one of the most modern techniques of measuring impulse responses, which uses a Maximum Length Sequence (MLS) as the driving signal. Limitations concerning the use of the measuring technique, and the ray-tracing program, as well, are analyzed, and discussed.

Also, in chapter 2, the latest advances in psychoacoustics, and the basis of the theories used nowadays to predict characteristics of the sound in a room are briefly described.

Key words: [Maximum Length Sequence], [Room Acoustics], [Architectural Acoustics], [Geometrical Acoustics], [Ray-Tracing].

Lista de Figuras e Tabelas

Figura 2.3.1 - Sala retangular, de dimensões L_x , L_y e L_z	18
Figura 2.3.2 - Ondas estacionárias entre duas paredes paralelas, para três casos: a) paredes rígidas, b) paredes com impedâncias predominantemente complexas e c) paredes com impedâncias predominantemente reais.....	22
Figura 2.4.1 - Representação da sala com a fonte virtual especular, S_1 , substituindo uma reflexão de primeira ordem.....	27
Figura 2.4.2 - Representação da sala com a fonte virtual especular, S_{12} , substituindo uma reflexão de segunda ordem.....	27
Figura 2.4.3 - Representação gráfica do teste de visibilidade.....	28
Figura 2.4.4 - Histograma típico, resultante de um algoritmo de raios acústicos (ray-tracing).....	30
Figura 2.4.5 - Fonte sonora e esfera detetora, sendo a distância $r=ct$	31
Figura 2.4.6 - Feixes de raios cônicos. A fonte imagem S_1 é visível ao receptor R_1 , mas não ao R_2	32
Figura 2.4.7 - Estreitamento de raios, representados em uma sala retangular.....	33
Figura 3.1 - Diagrama representando a relação recursiva apresentada na Seção 3.2.3.....	42
Figura 3.2 - O fenômeno de "Time Aliasing" da resposta impulsiva $h(n)$, verificado na resposta impulsiva periódica $h'(n)$	45
Figura 4.1.1 - Respostas em frequência para as caixas acústicas JBL e Brüel & Kjaer.....	56
Figura 4.1.2 - Comparação entre os desvios padrão, devido à diretividade das fontes, para Tempo de Reverberação (-5: -35 dB), Decaimento inicial (EDT), Fator de Clareza ("Clarity", C_{80}), "Center Time" (TS) e Definição (D), em banda de 1/1 oitava com frequência central de 500 Hz.....	59
Figura 4.1.3 - Comparação entre os desvios padrão, devido à diretividade das fontes, para Tempo de Reverberação (-5: -35 dB), Decaimento inicial (EDT), Fator de Clareza ("Clarity", C_{80}), "Center Time" (TS) e Definição (D), em banda de 1/1 oitava com frequência central de 1000 Hz.....	59

Figura 4.1.4 - Comparação entre os desvios padrão, devido à diretividade das fontes, para Tempo de Reverberação (-5: -35 dB), Decaimento inicial (EDT), Fator de Clareza ("Clarity", C_{80}), "Center Time" (TS) e Definição (D), em banda de 1/1 oitava com frequência central de 4000 Hz.....	60
Figura 4.1.5 - Sistema de medição utilizado.....	61
Figura 4.2.1 - Equipamentos utilizados para verificar a influência do nível de sinal na faixa dinâmica das medições realizadas com MLS.....	62
Figura 4.2.2 - Faixa dinâmica média, em dB, medida das curvas de decaimento, em função do nível do sinal aplicado ao alto-falante, para diferentes níveis de ruído de fundo. Nível de referência do sinal aplicado ao alto-falante (0 dB): 25 V (RMS).....	64
Figura 4.3.1 - Coeficientes de absorção medidos com o sistema MLS e B&K.....	66
Figura 4.3.2 - Tempos de Reverberação da câmara reverberante vazia.....	67
Figura 4.3.3 - Tempos de Reverberação da câmara reverberante com as amostras de material.....	67
Figura 4.3.4 - Comparação entre a curva de decaimento, medida em um determinado ponto do Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, em 1000 Hz (banda de 1/1 de oitava), corrigida (vermelha) e não corrigida (preta).....	69
Figura 5.1.1 - Modelo construído através do RAYNOISE, representando o Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.....	73
Figura 5.1.2 - Modelo construído através do RAYNOISE, representando o Teatro do CIC.....	75
Figura 5.1.3 - Fotografia do interior do Teatro do CIC.....	76
Figura 5.2.1a) - Variação dos resultados de EDT, em função do número de raios, para o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica.....	77
Figura 5.2.1b) - Variação dos resultados de EDT, em função da ordem de reflexão, para o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica.....	77
Figura 5.2.2a) - Variação dos resultados de Definição, em função do número de raios, para o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica.....	78

Figura 5.2.2b) - Variação dos resultados de Definição, em função da ordem de reflexão, para o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica.....	78
Figura 5.2.3a) - Variação dos resultados de Fator de Clareza (“Clarity”), em função do número de raios, para o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica.....	79
Figura 5.2.3b) - Variação dos resultados de Fator de Clareza (“Clarity”), em função da ordem de reflexão, para o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica.....	79
Figura 5.2.4a) - Variação dos resultados de EDT, em função do número de raios, para o Teatro do CIC.....	81
Figura 5.2.4b) - Variação dos resultados de EDT, em função da ordem de reflexão, para o Teatro do CIC.....	81
Figura 5.2.5a) - Variação dos resultados de Definição, em função do número de raios, para o Teatro do CIC.....	82
Figura 5.2.5b) - Variação dos resultados de Definição, em função da ordem de reflexão, para o Teatro do CIC.....	82
Figura 5.2.6a) - Variação dos resultados de Fator de Clareza (“Clarity”), em função do número de raios, para o Teatro do CIC.....	83
Figura 5.2.6b) - Variação dos resultados de Fator de Clareza (“Clarity”), em função da ordem de reflexão, para o Teatro do CIC.....	83
Figura 6.1.1 - Posições da fonte e do microfone onde foram feitas as medições das respostas impulsivas (auditório do Depto. de Engenharia Mecânica).....	85
Figura 6.1.2 – EDT: microfone na posição 4, auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.....	87
Figura 6.1.3 – Definição: microfone na posição 4, auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.....	88
Figura 6.1.4 - Fator de Clareza: microfone na posição 4, auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.....	89
Figura 6.1.5 - EDT, em função da posição do microfone.....	91
Figura 6.1.6 - Definição, em função da posição do microfone.....	92
Figura 6.1.7 – Fator de Clareza (“Clarity”), em função da posição do microfone.....	92
Figura 6.1.8 – Definição: microfone na posição 1, auditório do Depto. de Eng. Mecânica da UFSC.....	93

Figura 6.1.9 – Definição: microfone na posição 2, auditório do Depto. de Eng. Mecânica da UFSC.....	94
Figura 6.1.10 – Definição: microfone na posição 3, auditório do Depto. de Eng. Mecânica da UFSC.....	94
Figura 6.1.11 - Fator de Clareza: microfone nas posição 1, auditório do Depto. de Eng. Mecânica da UFSC.....	95
Figura 6.1.12 - Fator de clareza: microfone nas posição 2, auditório do Depto. de Eng. Mecânica da UFSC.....	96
Figura 6.1.13 - Fator de clareza: microfone na posição 3, auditório do Depto. de Eng. Mecânica da UFSC.....	96
Figura 6.2.1 - Posições da fonte e do microfone usadas para a comparação entre os resultados das medições e das simulações no Teatro do CIC.....	98
Figura 6.2.2 – EDT: posição 1 do microfone, Teatro do CIC.....	99
Figura 6.2.3 – Definição: posição 1 do microfone, Teatro do CIC.....	100
Figura 6.2.4 – Definição: posição 2 do microfone, Teatro do CIC.....	101
Figura 6.2.5 – Definição: posição 3 do microfone, Teatro do CIC.....	102
Figura 6.2.6 – Definição: posição 4 do microfone, Teatro do CIC.	103
Figura 6.2.7 – Definição: posição 5 do microfone, Teatro do CIC.	104
Figura 6.2.8 – Definição: posição 6 do microfone, Teatro do CIC.	105
Figura 6.2.9 - Fator de Clareza: posição 1 do microfone, Teatro do CIC.....	106
Figura 6.2.10 - Fator de Clareza: posição 2 do microfone, Teatro do CIC.	107
Figura 6.2.11 - Fator de Clareza: posição 3 do microfone, Teatro do CIC.	108
Figura 6.2.12 - Fator de Clareza: posição 4 do microfone, Teatro do CIC.	109
Figura 6.2.13 - Fator de Clareza: posição 5 do microfone, Teatro do CIC.	109
Figura 6.2.14 - Fator de Clareza: posição 6 do microfone, Teatro do CIC.	110
Tabela 4.1.1 - Resultados médios e desvios padrão para Tempo de Reverberação (-5: -35 dB), Decaimento inicial (EDT), Fator de Clareza (“Clarity”, C_{80}), “Center Time” (TS) e Definição (D), em banda de 1/1 oitava com frequência central de 500 Hz, para cada caixa.....	57
Tabela 4.1.2 - Resultados médios e desvios padrão para Tempo de Reverberação (-5: -35 dB), Decaimento inicial (EDT), Fator de Clareza (“Clarity”, C_{80}), “Center Time” (TS)	

e Definição (D), em banda de 1/1 oitava com frequência central de 1000 Hz, para cada caixa.....	58
Tabela 4.1.3 - Resultados médios e desvios padrão para Tempo de Reverberação (-5: -35 dB), Decaimento inicial (EDT), Fator de Clareza ("Clarity", C_{80}), "Center Time" (TS) e Definição (D), em banda de 1/1 oitava com frequência central de 4000 Hz, para cada caixa.....	58
Tabela 4.2.1 - Faixa dinâmica média, em dB, medida das curvas de decaimento, em função do nível do sinal aplicado ao alto-falante, para diferentes níveis de ruído de fundo. Nível de referência do sinal aplicado ao alto-falante (0 dB): 25 V (RMS).....	63
Tabela 4.3.1 - Coeficientes de absorção medidos com o sistema MLS e B&K.....	66
Tabela 6.1 - Variação necessária de alguns parâmetros acústicos, para que uma pessoa perceba a diferença e limites de tolerância (adotados em [15]) para que os resultados das simulações sejam aceitáveis.....	85
Tabela 6.1.1 - Tempos de Reverberação medidos e calculados pela fórmula de Sabine, com os mesmos coeficientes de absorção usados nas simulações do Auditório.....	90
Tabela 6.2.1 - Coordenadas das posições da fonte e do microfone utilizadas para a comparação entre resultados das medições e das simulações.....	98
Tabela A2.1 - Coeficientes de absorção utilizados para as simulações do auditório do Depto. de Engenharia Mecânica da UFSC.....	122
Tabela A2.2 - Coeficientes de absorção utilizados para as simulações do Teatro do CIC.....	123
Tabela A3.1 - Tipos de superfície e material associados a cada elemento do modelo do Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.....	125
Tabela A3.2 - Tipos de superfície e material associados a cada elemento do modelo do Teatro do CIC.....	126

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A qualidade acústica de qualquer tipo de ambiente pode, atualmente, ser projetada ou prevista a partir de diversas ferramentas desenvolvidas a partir dos estudos científicos realizados ao longo dos últimos anos [1, 2, 3, 4, 5, 7]. Muito já se especulou sobre a acústica de salas de concerto e algumas convicções mais antigas, desde o tempo do arquiteto romano Vitruvius [3], mesmo que incorretas, persistiam até recentemente. Grande parte dessas crenças foram desfeitas, principalmente neste século, quando algumas teorias e modelos matemáticos sobre acústica de salas foram desenvolvidos e extensamente estudados. Mesmo assim, a falta de um conhecimento mais profundo sobre a relação entre os fenômenos físicos que podem ser previstos (ou medidos) e a sensação provocada em uma pessoa, limitavam a aplicação prática destes modelos.

A acústica de qualquer recinto fechado, como um cinema, uma igreja, uma sala de concerto ou mesmo um dormitório, pode apresentar características satisfatórias ou não, dependendo da finalidade de seu uso, de legislações ou de impressões subjetivas de cada pessoa. No caso de um dormitório ou de um ambiente industrial, por exemplo, a preocupação principal deve ser, em geral, o nível de ruído. Em outros tipos de ambientes, como Igrejas, auditórios ou salas de concerto, além da preocupação com o ruído no ambiente, outros fatores (em geral ligados à resposta transiente da sala) são igualmente importantes. A avaliação ou previsão da qualidade acústica de uma sala pode assumir diversos níveis de complexidade, dependendo dos tipos de atividades desenvolvidas no recinto. Em uma sala de aula, por exemplo, a qualidade acústica poderia ser julgada com relação a dois parâmetros, basicamente: o nível de ruído de fundo e o grau de inteligibilidade com que o interlocutor é escutado em cada posição da sala. Em uma sala de concerto, no entanto, este julgamento pode não ser tão simples, já que inúmeros fatores subjetivos estão envolvidos. E é bom lembrar, neste caso, que impressões subjetivas podem estar ligadas tanto a certas condições biológicas, quanto a padrões e referências culturais de cada indivíduo. A relação entre as impressões

subjetivas de cada pessoa e grandezas mensuráveis, para que estas possam ser dominadas e compreendidas pela ciência, foi e é a principal preocupação da especialidade denominada psico-acústica.

Ao longo dos anos, vários parâmetros relacionados à percepção subjetiva foram desenvolvidos, a maioria determinada a partir das respostas impulsivas do ambiente (transiente). Mesmo não tendo se chegado a um consenso, com relação a estes parâmetros, atualmente alguns deles podem ser usados para qualificar uma sala de forma bem mais eficiente do que há algumas décadas, quando o único parâmetro disponível para esta análise era o Tempo de Reverberação. A psico-acústica tem evoluído de tal forma que hoje algumas medições são feitas de forma a “simular” o processamento de um sinal sonoro conforme realizado pelo cérebro, como é o caso das medições de respostas impulsivas binaurais, medidas com dois microfones, em cabeças artificiais (“Dummy Heads”), correspondentes aos ouvidos humanos, e envolvendo uma correlação cruzada entre os sinais. O sucesso na realização de projetos acústicos é diretamente dependente do sucesso dos estudos da área da psico-acústica.

O complemento deste caminho interdisciplinar depende da compreensão do fenômeno físico envolvido, estudado por vários pesquisadores, já ao longo de muitos anos. De todos estes esforços, atualmente, três linhas básicas de tratar o tema são importantes na tentativa de estudar, ou de prever, certas características do campo acústico em uma sala. São elas:

- estudos estatísticos;
- acústica geométrica;
- ondas acústicas.

A era moderna do estudo da acústica de salas de concerto foi marcada pelo desenvolvimento da conhecida equação de Sabine, por volta de 1900 [1], e os estudos decorrentes desta linha de pesquisa são referidos como estudos estatísticos. Após cinco anos de pesquisa, conduzidos nas salas da Universidade de Harvard, Wallace Clement Sabine desenvolveu uma equação para o cálculo do Tempo de Reverberação, para cada banda de frequência, em função do volume e dos coeficientes de absorção das superfícies internas de uma sala. Esta equação pioneira sofreu algumas correções,

mas continua sendo essencial no desenvolvimento de projetos acústicos dos mais diversos tipos de ambientes.

A descrição do fenômeno acústico em espaços fechados, através de formulações de equações de onda e imposição das condições de contorno, é tema de estudo já um tanto antigo que, no entanto, falha em apresentar resultados práticos para recintos de geometria mais complexa (ou seja, que difiram de uma sala “retangular”). Soluções analíticas para as equações são desconhecidas, em geral, e as soluções numéricas só são possíveis para salas com pequeno volume ou para a obtenção de respostas em baixas frequências, discretas em seu domínio. Este tipo de abordagem traz alguns esclarecimentos, mas não a solução efetiva da equação da onda para os casos encontrados na prática, de forma geral.

Dessa forma, os especialistas em acústica de salas encontraram outras formas de realizar os projetos. Entre estas formas alternativas, estão aquelas identificadas pelo nome de acústica geométrica, que partem de uma suposição básica; a de que o som, em frequências mais altas, se comporta aproximadamente como raios de luz, que são parte refletidos e parte absorvidos na fronteira entre um certo meio de propagação e outro. A partir dessa premissa, estudos são realizados em modelos de salas em escalas reduzidas, por vezes usando a própria luz como representação da fonte sonora, ou ainda em métodos computacionais, empregando diversos tipos de algoritmos de acústica de raios

Para correlacionar as sensações auditivas e as grandezas físicas conhecidas, têm-se pesquisado formas de medir parâmetros acústicos determinados pelo ramo da psico-acústica como sendo os mais importantes para a nossa percepção auditiva [3, 5]. Existe um consenso, atualmente, em torno do fato que quase todos estes parâmetros podem ser determinados a partir da resposta impulsiva medida entre uma posição da sala e uma posição da fonte sonora. Os métodos de se determinar a resposta impulsiva experimentalmente são vários, e podem usar desde tiros de festim, estouros de balões, até sinais mais elaborados (chirp ou Maximum Length Sequence - MLS), como sinal de excitação.

Neste trabalho são apresentadas comparações entre alguns parâmetros obtidos da medição de uma sala, usando o sinal “Maximum-Length Sequence” como excitação (método já aceito e muito usado pelos especialistas em acústica de salas) e os

resultados obtidos através do modelo correspondente à mesma sala, processado em um computador através de um programa comercial de acústica de raios. Como será descrito no capítulo 5, duas salas foram usadas com este propósito: o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina e o Teatro do Centro Integrado de Cultura, localizado em Florianópolis. O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar a eficiência de um programa deste tipo no projeto acústico de uma sala, analisando as diferenças entre os resultados medidos e calculados.

Como o tipo de excitação aqui discutido, utilizado nas medições das respostas impulsivas é relativamente novo, medições de coeficientes de absorção de um certo material foram realizadas usando duas técnicas distintas, com o objetivo de verificar a confiabilidade do uso de "Maximum Length Sequence". Este experimento é descrito no capítulo 4.

Nos capítulos que seguem, uma breve revisão de cada um dos tópicos envolvidos é apresentada. São eles: psico-acústica, acústica estatística, ondas acústicas, acústica de raios e o método de medição utilizado ("Maximum Length Sequence").

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Psico-acústica

A qualidade acústica de uma sala é determinada pelo julgamento subjetivo das pessoas expostas ao campo acústico. Se existir uma dificuldade de entender um interlocutor ou se o público achar que o som de uma orquestra não é suficientemente claro ou intenso (volume), isto pode significar que os parâmetros acústicos da sala não são todos ótimos. Isto é, alguns, como por exemplo, o Tempo de Reverberação, podem ser e outros não. Parâmetros objetivos do campo acústico são confiáveis se existir uma boa correlação entre estes e as impressões subjetivas. Tais correlações têm sido determinadas para discursos em auditórios, mas, quando se trata de música, essas correlações ainda estão sendo investigadas. Como dito anteriormente, neste caso não existe um consenso sobre quais parâmetros são realmente significativos ou sobre quais são completamente independentes uns dos outros. A seguir, uma breve revisão das pesquisas mais importantes feitas neste sentido, até hoje, resumidas na referência [3], são apresentadas.

Antes disso, cabe esclarecer a importância deste assunto no presente trabalho. Não se pretende aqui, avaliar a qualidade acústica de sala alguma, mas sim a eficiência das ferramentas de auxílio na previsão de um campo acústico. A comparação, no entanto, deverá ser feita através dos resultados, medidos e simulados, de vários destes parâmetros. E para que os números aqui apresentados tenham significado, faz-se por bem defini-los, explicá-los e comentá-los. Alguns parâmetros a serem relacionados não serão utilizados neste trabalho, mas devem ser úteis para esclarecer o contexto.

Beranek [3], no capítulo de título “Procurando uma linguagem de consenso”, apresenta dezoito termos usados para definir as impressões sobre a acústica de uma sala de concerto, tais como “presença”, “reverberação”, “spaciousness”, “clareza”,

“loudness”, “brilho”, etc... Posteriormente o autor relaciona alguns destes termos com fenômenos acústicos, ligando, por exemplo, “spaciousness” com a diferença entre as primeiras reflexões que atingem cada ouvido de uma pessoa nas frequências médias e com o Nível de Pressão Sonora (NPS) em frequências mais baixas.

Mais adiante, na mesma referência, são apresentados resumos dos principais estudos na área de psico-acústica que contribuíram na determinação de parâmetros acústicos *independentes*, segundo seu ponto de vista, que estão diretamente ligados a determinadas impressões subjetivas. Por exemplo, Marshall determinou um novo parâmetro acústico (objetivo) importante na avaliação final de uma sala de concerto, baseado na seguinte hipótese: “preferências por salas de concerto retangulares mais estreitas, com relação a salas mais largas, devem-se à existência de reflexões laterais do som mais fortes e em maior quantidade (chegando aos ouvidos de uma pessoa)”. Este parâmetro é chamado de Coeficiente de Correlação Cruzada interaural (“Interaural Cross-correlation Coefficient”, IACC), determinado a partir dos sinais de dois microfones colocados nos ouvidos de uma pessoa ou em uma cabeça artificial (“dummy head”). Outro fator correlacionado a este é chamado de Fração Lateral (“Lateral Fraction”, LF), determinado pela razão entre a saída de um microfone direcional e a saída de um microfone onidirecional, nos primeiros 80 ms que seguem a chegada do som direto. A conclusão de Marshall é que as reflexões laterais causam a impressão, no ouvinte, de ser “envolvido” pelo som, fato que hoje é conhecido como Impressão Espacial. Esta impressão cresce também com o NPS, segundo Marshall.

Investigando estes parâmetros, entre outros, Schroeder [4] chama a atenção para o fato de que a tendência de se construir salas mais largas e de teto mais baixo tem um aspecto negativo, que é a preponderância das primeiras reflexões do teto sobre as primeiras reflexões laterais chegando ao ouvinte. Este aspecto negativo se justifica porque as reflexões provenientes do teto tendem a chegar aos ouvidos de uma pessoa com aproximadamente a mesma fase e amplitude, isto é, monofonicamente. A solução mais adequada, segundo o autor, é redirecionar o som refletido no teto para as laterais, usando determinados tipos de difusores. Existem conclusões em conflito com estas; segundo Beranek [3], estudos de Barron e Marshall (1981) concluem que as reflexões no teto não mascaram as reflexões laterais, independentemente de quais ocorrem primeiro.

A referência [3] relaciona outros estudos, além dos de Marshall, mencionados anteriormente. Entre eles estão os realizados, em várias etapas, na Universidade de Goettingen. Trechos de uma certa sinfonia foram gravados estereofonicamente pela orquestra da BBC em um ambiente anecóico. Posteriormente esta gravação foi reproduzida em 25 salas de concerto vazias, através de dois alto-falantes não direcionais no palco, distanciados de 5m. Uma cabeça artificial (“dummy head”) com dois microfones, colocada no centro de cada sala, foi usada para gravar estereofonicamente o som que seria ouvido por uma pessoa na sala vazia. Estas gravações foram reproduzidas numa câmara anecóica, através de dois alto-falantes, para 13 estudantes. Ainda nas salas de concerto os seguintes parâmetros acústicos foram medidos:

Tempo de Reverberação (TR), “Early Decay Time” (EDT), Strength Factor (G), “Interaural Cross- correlation Coefficient” (IACC) e “fator de clareza” (C_{50}).

Os estudantes decidiram por três parâmetros dominantes: (1) a diferença no som entre os dois ouvidos, correlacionada a IACC, (2) o Tempo de Reverberação (TR), mas apenas se este for significativamente menor que 2 s e (3) a clareza, correlacionada a C_{50} .

Em Berlim (Technical University) um estudo similar foi realizado. No entanto, ao invés de reprodução, a Orquestra Sinfônica de Berlim tocou trechos de três sinfonias em seis salas vazias. As gravações, feitas também por uma cabeça artificial, foram reproduzidas para um determinado número de pessoas através de fones de ouvido. Das impressões subjetivas das pessoas submetidas aos testes, os seguintes atributos foram isolados (Cremer, Mueller e Schultz [9], 1982): (1) a “intensidade” da fonte, correlacionada ao “Strength Factor” (G) (como já haviam concluído Yamamoto e Suzuki, em 1976) e ao tempo de reverberação (TR), (2) clareza, correlacionada a C_{80} e (3) timbre, correlacionado ao parâmetro denominado “Bass Ratio”, definido como a razão entre o TR em baixas frequências e o TR em frequências médias.

Ando, citado em [3], (1985) expôs algumas pessoas a campos acústicos criados eletronicamente, usando vários trechos de composições sinfônicas. Os campos acústicos simulavam aqueles de salas de concerto, incluindo o som direto, reflexões de várias direções, com várias intensidades e diferentes tempos de reverberação. Dos resultados tratados estatisticamente, Ando numerou quatro atributos independentes: (1)

“Loudness”, correlacionado a G; (2) “intimacy”, correlacionado ao atraso de tempo inicial (“Initial-time-delay gap”, t_1), que é definido como a diferença entre o tempo que o som leva para, a partir da fonte, ser refletido e chegar ao ouvinte e o tempo que o som leva para chegar diretamente ao ouvinte; (3) reverberação, correlacionado a TR; (4) a diferença no som entre os dois ouvidos, correlacionado a IACC.

Gade, citado em [3], realizou medições em 35 salas de concerto desocupadas, na tentativa de descobrir quais parâmetros acústicos são estatisticamente independentes. Destes estudos foi concluído que (1) TR, EDT (Early Decay Time) e C_{80} (Fator de clareza) são altamente correlacionados; (2) G (Strength Factor) e LF (Lateral Fraction) são independentes e ambos independentes dos parâmetros relacionados em (1); em seu trabalho não foram mencionados t_1 (initial-time-delay gap), nem BR (Bass Ratio). IACC não foi medido. Foram feitas medições também nos palcos, que mostram o grau com que o som emitido por um instrumento de um determinado músico é refletido a ele próprio e a seus vizinhos, o que foi definido como “Early Energy”, entre 20 ms e 100 ms (ST1). Gade concluiu também que LF é altamente correlacionada com a distância média entre as paredes.

Um fato reconhecidamente importante na avaliação da qualidade acústica de uma sala é o grau de “difusividade” do campo acústico. E já há algum tempo se sabe que quanto mais irregular a geometria da sala e as superfícies internas, maior a probabilidade do campo acústico em seu interior ser difuso. Mesmo assim, nenhuma forma padronizada de se avaliar este item foi desenvolvida até hoje. Um estudo recente relaciona a qualidade acústica de uma sala de concerto ao grau de irregularidade do teto e das paredes, avaliados *visualmente* [3]. No método desenvolvido, são estabelecidos 3 “graus de difusividade”, avaliados visualmente, contando uma certa pontuação:

- Alta difusividade - 1,0;
- Média difusividade - 0,5;
- Baixa difusividade - 0.

Estes números servem como peso em uma soma da área superficial do teto e das paredes da sala. O Índice de Difusividade da Superfície (“Surface Diffusivity Index”,

SDI) é definido como a razão entre esta soma ponderada e a área total do teto e das paredes. Haan e Ficke, citado em [3], concluem, através da análise de avaliações subjetivas, que a difusividade das superfícies é altamente responsável pela diferença entre as salas cotadas como excelentes e aquelas cotadas como boas ou medíocres.

Esta conclusão é criticada por Beranek [3], constatando o fato de que a difusividade das superfícies não diz nada a respeito das primeiras reflexões laterais (Early Lateral Reflections), Tempo de Reverberação, “loudness” e resposta em baixas frequências, já que estes fatores também parecem ser decisivos na avaliação de uma sala de concerto.

Mesmo admitindo que o índice de difusividade das superfícies (SDI) ainda não é uma medição satisfatória, este parâmetro é um dos selecionados a constar na lista dos seis parâmetros “estatisticamente independentes” mais importantes na avaliação objetiva de salas de concerto, segundo Beranek [3].

Resumindo, a partir destes estudos, os parâmetros isolados foram:

- $IACC_3$: Coeficiente de Correlação Cruzada Interaural (“Interaural Cross-correlation Coefficient”), que é uma medida da diferença entre os sinais sonoros que chegam em cada ouvido de uma pessoa durante uma “performance” nesta sala de concerto. O índice “3” indica que neste caso, em particular, IACC é determinado para um período de tempo entre 0 e 80 ms, tomando a média entre os valores médios em três bandas de oitava, com frequências centrais de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz (ver apêndice 4).

- EDT : Tempo de Decaimento Inicial (“Early Decay Time”), definido como o tempo necessário para o Nível de Pressão Sonora ser atenuado de 10 dB, após desligar a fonte sonora.

- G_{mid} : “Strength Factor”; é a razão, em dB, entre a energia que chega a um certo local da sala, devido a uma fonte não direcional no palco e a energia da mesma fonte quando medida em uma câmara anecóica a 10 m de distância. G_{mid} , em particular, é a média dessas medições feitas em bandas de oitava com frequências centrais em 500 Hz e 1000 Hz.

- t_1 : Tempo de Atraso Inicial (“Initial-time-delay gap”); o intervalo de tempo entre a chegada do som direto, proveniente de uma fonte no palco, e a chegada da primeira reflexão, em um determinado local da sala.

- BR : “Bass Ratio”; definido como a razão entre o tempo de reverberação médio em 125 Hz e 250 Hz e o tempo de reverberação médio em 500 Hz e 1000 Hz. É determinado apenas para a sala ocupada.

- SDI : Índice de difusividade das superfícies (“Surface Diffusivity Index”), determinado a partir de inspeção visual, como descrito anteriormente.

Chama-se a atenção para o fato que nenhum destes parâmetros é útil para avaliar a qualidade acústica no palco, isto é, como o músico ouve a si próprio e aos outros músicos. Efeitos de distorção, ruído de fundo e eco também não são levados em conta. De qualquer forma, ainda segundo Beranek [3], estes parâmetros se relacionam bem com as opiniões colhidas sobre várias salas de concerto, através de entrevistas e questionários.

Outros parâmetros são freqüentemente usados para avaliar salas de concerto, não sendo completamente “independentes” com relação aos apresentados até aqui, como o próprio Tempo de Reverberação. São eles:

- Tempo de Reverberação (TR): definido como o tempo necessário para que o nível de pressão sonora (NPS) seja atenuado de 60 dB.

- Fator de Clareza (“Clarity”, C_{50} ou C_{80}): é definido como uma razão entre a energia do trecho inicial do som e a energia do som reverberante (em dB). Este limite do que é o som inicial ou reverberante é estabelecido, em geral, em 50 ms ou 80 ms depois da chegada do som proveniente diretamente da fonte. Dependendo deste limite, o parâmetro é referido como C_{50} ou C_{80} . Em geral, quando a sala em questão é utilizada para música, escolhe-se C_{80} para avaliá-la. De qualquer forma isso depende da preferência do autor (ver apêndice 4).

- Definição (“Definition”, D): este parâmetro é sutilmente diferente do anterior, e é definido como a razão entre a energia do trecho inicial do som (até 50 ms) e a energia total contida no sinal (dado em porcentagem). É usado, em geral, para avaliar o grau de inteligibilidade (ver apêndice 4).

A maioria destes parâmetros, com exceção do IACC e do Índice de Difusividade (SDI), pode ser determinada das respostas impulsivas da sala, inclusive o Tempo de Reverberação e o decaimento inicial (EDT), como provado em 1965 por Schroeder [17], e que será discutido posteriormente com mais detalhes. O apêndice 4 apresenta as equações matemáticas relativas a alguns parâmetros acústicos.

2.2 Acústica Estatística

Como mencionado anteriormente, a fórmula desenvolvida experimentalmente por Wallace Clement Sabine, por volta do ano de 1900, foi um marco histórico, quanto à forma de tratar a acústica de ambientes fechados. As superstições envolvendo o tema só começaram a ser substituídas pela fundamentação científica a partir desta época. Vale ressaltar que mesmo hoje, quase um século depois, crenças e superstições antigas ainda podem ser identificadas em vários projetos acústicos, como, por exemplo, a crença de que a presença de madeira melhora a “acústica” de uma sala.

Sabine, experimentalmente, chegou à seguinte equação para o Tempo de Reverberação:

$$T = 0,161V/a \quad (2.1)$$

onde:

V - volume da sala, em m³;

a - capacidade de absorção, área de Sabine, em m².

A área de Sabine é definida como:

$$a = \sum \alpha_i S_i \quad (2.2)$$

onde:

α_i - coeficiente de absorção da superfície de área S_i .

Mais tarde, outros pesquisadores chegaram a esta equação, teoricamente, baseados nos princípios da acústica geométrica. Formas alternativas também surgiram, dependendo da grandeza dos coeficientes de absorção e incluindo o efeito da absorção do som no ar.

A forma desta equação, deduzida a partir dos princípios da acústica geométrica, é:

$$T = \frac{55,2V}{ac} \quad (2.3)$$

onde:

c - velocidade do som no ar.

Ao longo dos anos, a equação de Sabine foi sendo corrigida, de forma a representar a realidade de maneira mais próxima. Desta forma, um termo foi adicionado ao denominador, introduzindo o efeito da absorção do som no ar. Este efeito tende a ser mais significativo em salas onde o som se propaga por mais tempo no ar, isto é, em salas muito reverberantes ou de grande volume. O pesquisador Vern O. Knudsen [1] foi o responsável por esta correção, rescrevendo a equação da seguinte maneira:

$$T = \frac{55,2V}{c(a + 4mV)} \quad (2.4)$$

onde:

m - coeficiente de atenuação do som no ar [1/m].

O coeficiente de atenuação (m) depende da temperatura e umidade do ar, em cada faixa de frequência.

A fórmula de Sabine, como escrita originalmente, apresenta resultados cada vez mais incorretos, à medida que o coeficiente médio de absorção ultrapassa o valor 0,2. Dessa forma, alguns pesquisadores, usando os princípios da acústica geométrica, chegaram a formas alternativas para a equação de Tempo de Reverberação. Uma dessas formas, proposta por Eyring é apresentada aqui. Segundo Eyring [28], a capacidade de absorção (a) pode ser escrita da seguinte maneira:

$$a = -S \ln(1 - \bar{\alpha}) \quad (2.5)$$

onde:

$\bar{\alpha}$ - coeficiente médio de absorção

S - área das superfícies internas da sala.

e:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{S} \quad (2.6)$$

Essas equações assumem que o campo acústico existente no ambiente é idealmente difuso. Deve-se notar ainda que a teoria estatística não leva em conta eventuais particularidades do campo acústico em determinadas posições da sala e é pouco relacionada com a geometria da sala [11].

2.3 Acústica de Ondas

O campo acústico em um ambiente fechado pode ser estudado, em certos casos, mediante a ótica da teoria ondulatória. Como soluções analíticas para salas de geometria mais complexas não são conhecidas, este tipo de abordagem é feito há algum tempo, na busca de conclusões qualitativas sobre a acústica de um recinto fechado. Mais recentemente, com o desenvolvimento de recursos computacionais e de métodos numéricos mais poderosos, a acústica de ondas tem se apresentado como uma alternativa prática no projeto acústico de certos ambientes, principalmente em frequências mais baixas. Esta frente de estudos possui um grande potencial a ser desenvolvido e um exemplo da aplicação prática desta teoria é a determinação das respostas impulsivas de uma sala de concerto, até 1000 Hz, utilizando o Método dos Elementos de Contorno, em trabalho realizado por Terai e Kawai [7].

De qualquer forma, o potencial mencionado anteriormente não será explorado neste trabalho, e a teoria acústica de ondas será brevemente revista, em busca apenas das conclusões qualitativas que alguns autores já chegaram no passado. A revisão de alguns princípios da teoria de ondas acústicas apresentada a seguir, é baseada, principalmente, na referência [2].

2.3.1 O campo acústico em um ambiente fechado

O ponto de partida para a representação do campo acústico de uma sala, é a equação da onda independente do tempo, conhecida como equação de Helmholtz. Assume-se que a pressão é uma função harmônica do tempo, com uma frequência angular ω . Dessa forma, escreve-se:

$$\Delta p + k^2 p = 0 \quad (2.7)$$

onde:

$$k = \omega/c$$

p - pressão;

k - número de onda;

ω - frequência angular;

c - velocidade do som no ar;

Δ - Operador Laplaciano.

A partir daí, assume-se que as características das paredes podem ser descritas pela impedância, que depende das coordenadas e da frequência, mas não do ângulo de incidência, isto é, as paredes são consideradas localmente reativas.

A componente da velocidade, normal a qualquer superfície, pode ser escrita da seguinte forma:

$$v_n = \frac{i}{\omega \rho_0} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (2.8)$$

onde:

v_n - componente normal da velocidade;

ρ_0 - densidade do meio de propagação;

n - direção normal à parede.

E daí, substituindo v_n por p/Z (onde Z é a impedância), chega-se a:

$$Z \frac{\partial p}{\partial n} + i\omega \rho_0 p = 0 \quad (2.9)$$

que representa uma condição de contorno.

Pode-se mostrar que as soluções desta formulação genérica do problema existem apenas para valores discretos de k , os chamados autovalores do problema, k_n . Se um único valor for atribuído a k (ou ω), o que pode ser realizado se a fonte possuir apenas uma frequência, é possível provar que os autovetores são ortogonais, ou:

$$\begin{aligned} \iiint_V p_n(r) p_m(r) dv &= K_n, \text{ para } n = m \\ &0, \text{ para } n \neq m \end{aligned} \quad (2.10)$$

onde a integração deve ser realizada em todo o volume limitado pelas paredes e K_n é uma constante. Na equação acima, r representa as coordenadas x , y e z .

Supondo que fontes sonoras sejam distribuídas continuamente em uma sala, de acordo com a função $q(r)$, e assumindo que ω seja uma frequência comum a todas as fontes, a equação de onda pode ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta p + k^2 p = -i\omega\rho_0 q(r) \quad (2.11)$$

Como os autovetores formam um conjunto de funções ortogonais, é possível expandir a função $q(r)$ em uma série de p_n , assim como a solução procurada $p_0(r)$. Assumindo, ainda, o caso mais simples, de uma fonte pontual localizada em r_0 , a qual tem uma velocidade de volume igual a Q , pode-se chegar à solução final para a distribuição de pressão sonora em uma sala excitada por uma fonte pontual de frequência ω :

$$P_\omega(r) = iQ\omega\rho_0 \sum \frac{p_n(r)p_n(r_0)}{K_n(k^2 - k_n^2)} \quad (2.12)$$

chamada a "Função de Green" da sala em consideração.

O propósito principal de se chegar até aqui é notar a simetria das coordenadas r e r_0 , isto é, o mesmo resultado pode ser observado se a fonte estiver no ponto r e a pressão for avaliada no ponto r_0 , ou vice-versa. Dessa forma a equação acima é a expressão matemática do princípio da reciprocidade, e que pode ser muito útil na medição de respostas impulsivas, por exemplo, de uma sala.

Manipulando ainda, a última equação, assumindo que k_n são, em geral, quantidades complexas, escreve-se:

$$k_n = \frac{\omega_n}{c} + i \frac{\delta_n}{c} \quad (2.13)$$

e, assumindo que $\delta_n \ll \omega_n$ e substituindo na equação, temos:

$$p_{\omega}(r) = iQc^2\omega\rho_0 \sum_n \frac{p_n(r)p_n(r_0)}{(\omega^2 - \omega_n^2 - 2i\delta_n\omega_n)k_n} \quad (2.14)$$

Se considerada como uma função da frequência, esta expressão representa a função de transferência da sala entre os pontos r e r_0 . Na frequência $\omega = \omega_n$, o termo (n) associado da série assume um valor muito alto, e a frequência correspondente é referida como um auto-valor da sala, ou frequência de ressonância. O termo δ_n representa as constantes de atenuação dos modos acústicos correspondentes. A pressão no ponto r pode ser escrita como uma função do tempo:

$$p(r,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_{\omega}(r) \exp(i\omega t) d\omega \quad (2.15)$$

O sinal ainda pode ser considerado como uma função espectral $Q(\omega)$, com várias componentes em frequência, e o sinal da fonte pode ser expresso por:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} Q(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (2.16)$$

Nas equações anteriores, Q pode ser substituído por $Q(\omega)$.

2.3.2 Modos acústicos normais em salas retangulares de paredes rígidas

A sala a ser considerada tem as dimensões L_x , L_y e L_z nas direções x , y e z , respectivamente, como mostra a figura 2.3.1 :

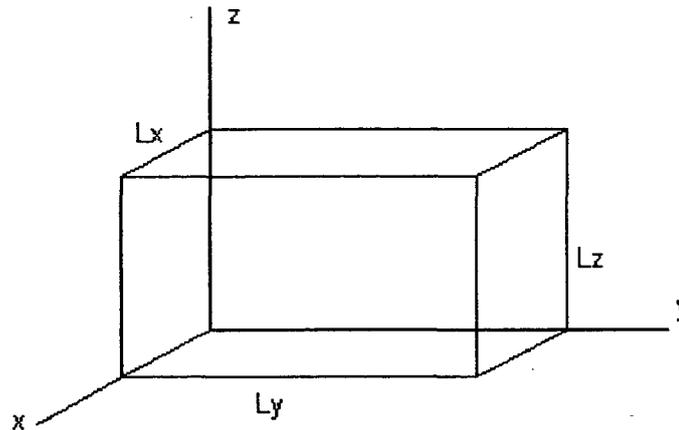


Figura 2.3.1 - Sala retangular, de dimensões L_x , L_y e L_z .

Supondo que as paredes são rígidas, a componente normal da velocidade de partícula deve ser nula nas paredes. Em coordenadas cartesianas, a equação da onda pode ser escrita da seguinte maneira [2]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0 \quad (2.17)$$

onde: $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$ (2.18)

e as condições de contorno podem ser escritas assim:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \text{para } x = 0 \text{ e } x = L_x,$$

e da mesma forma para as direções y e z . Esta equação pode ser resolvida por separação de variáveis e a solução será:

$$P_{n_x n_y n_z}(x, y, z) = A \cos\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right) \quad (2.19)$$

onde A é uma constante e:

$$k_x = \frac{n_x \pi}{L_x}, k_y = \frac{n_y \pi}{L_y} \text{ e } k_z = \frac{n_z \pi}{L_z} \quad (2.20)$$

n_x , n_y e n_z são números inteiros.

Esta solução representa uma onda estacionária tridimensional e, como ela não depende do tempo, alguns pontos têm a pressão igual a zero em qualquer instante, isto é, são nós de alguns modos da sala.

A equação de auto-valores do problema pode ser escrita substituindo a equação acima na equação (2.18). Dessa forma tem-se:

$$k n_x n_y n_z = \pi \left[\left(\frac{n_x}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y} \right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

Desenvolvendo o raciocínio, Kuttruff [2] apresenta uma equação para a densidade modal (modos/Hz) no domínio da frequência, considerando apenas os modos oblíquos:

$$\frac{dN_f}{df} = 4\pi V \frac{f^2}{c^3} \quad (2.22)$$

onde:

V - volume da sala;

f - frequência;

c - velocidade do som no ar.

E ainda uma equação para o número de auto-valores, de 0 Hz a uma frequência qualquer, f:

$$N_f = \frac{4\pi}{3} V \left(\frac{f}{c} \right)^3 + \frac{\pi}{4} S \left(\frac{f}{c} \right)^2 + \frac{Lf}{8c} \quad (2.23)$$

onde:

S - área superficial da sala;

L - soma do comprimento das arestas.

Foi comprovado que, à medida em que a frequência aumenta, a equação acima pode ser aplicada para salas de geometria arbitrária, e não apenas para salas retangulares. Este comportamento pode ser explicado, imaginando que o volume da sala pode ser “preenchido” por pequenas cavidades retangulares (volumes elementares). Em frequências mais altas, as dimensões destes volumes elementares são grandes, comparados ao comprimento de onda [2].

2.3.3 Salas retangulares com as paredes não rígidas

Para esta situação, a velocidade não é nula nas paredes e as condições de contorno são:

$$\zeta_x \frac{dp_1}{dx} = ikp_1, \text{ para } x = 0;$$

$$\zeta_x \frac{dp_1}{dx} = -ikp_1, \text{ para } x = L_x.$$

onde ζ_x é a impedância específica, que é constante com a frequência, mas complexa:

$$\zeta_x = \xi_x + i\eta_x \quad (2.24)$$

Assim como o número de onda:

$$k_x = \beta_x - i\gamma_x \quad (2.25)$$

Dois casos particulares podem ser analisados; (1) para impedâncias puramente complexas, e outro, (2) para impedâncias predominantemente reais. No caso (1) os autovalores, comparados ao caso onde as paredes são rígidas, apenas mudam de valor. Se $\eta_x < 0$ (impedância de uma mola [2]), os autovalores são menores. Se $\eta_x > 0$ (impedância de uma massa), os autovalores são maiores.

Para impedâncias predominantemente reais, caso (2), os autovalores são:

$$K_{n_x n_y n_z} = [(\beta n_x - i\gamma n_x)^2 + (\beta n_y - i\gamma n_y)^2 + (\beta n_z - i\gamma n_z)^2]^{1/2}$$

$$\approx \beta n_x n_y n_z - i \frac{\gamma n_x \beta n_x + \gamma n_y \beta n_y + \gamma n_z \beta n_z}{\beta n_x n_y n_z} \quad (2.26)$$

e:

$$\beta^2_{n_x n_y n_z} \approx \pi^2 \left[\left(\frac{n_x}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y} \right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z} \right)^2 \right] \quad (2.27)$$

onde β são chamados “constantes de fase”.

Os auto-vetores são dados, aproximadamente, por:

$$P_{n_x n_y n_z} = C_{n_x n_y n_z} \cdot \cos(\beta n_x x + \phi n_x) \cdot \cos(\beta n_y y + \phi n_y) \cdot \cos(\beta n_z z + \phi n_z) \quad (2.28)$$

A Figura 2.3.2 ilustra os dois casos descritos anteriormente, comparados com uma distribuição de pressão (um auto-vetor) entre duas paredes rígidas paralelas. Nota-se que, no caso (1), a forma da onda estacionária é basicamente a mesma, comparada com o caso de paredes rígidas, e os nós ficam mais próximos (ou mais distantes) uns dos outros. No caso (2), percebe-se que não existem nós exatos, isto é, a pressão é diferente de zero em todos os pontos. Este fato pode ser interpretado, imaginando que a energia que é perdida na parede deve ser suprida por ondas não-estacionárias.

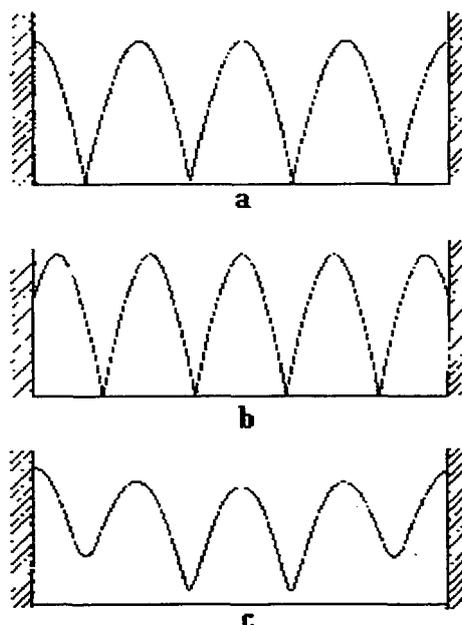


Figura 2.3.2 - Ondas estacionárias entre duas paredes paralelas, para três casos: a) paredes rígidas, b) paredes com impedâncias predominantemente complexas e c) paredes com impedâncias predominantemente reais.

2.3.4 Campo acústico estacionário

Em geral, é impossível excitar uma sala exatamente em uma frequência, dada a densidade de auto-valores e a largura à meia altura de cada “pico”. O estado estacionário (com a fonte em uma determinada frequência) em um ponto da sala pode ser considerado como uma superposição de vários componentes da mesma frequência, mas com distribuição aleatória de amplitude e fase (componentes independentes de uma série).

Na curva de resposta em frequência, os “picos” têm contribuição de vários modos excitados simultaneamente, em fase. Os “vales” são causados por cancelamentos de amplitude e fase. Se as medições são feitas em pontos diferentes da sala, os detalhes são diferentes, mas o aspecto geral da curva é similar.

A distância média entre máximos, de acordo com Schroeder [2], pode ser estimada por:

$$(\Delta f)_{\text{MAX}} = \frac{\bar{\delta}}{\sqrt{3}} \quad (2.29)$$

Para frequências maiores que:

$$f_g = \frac{5000}{(\bar{v}\bar{\delta})^{1/2}} \text{ Hz} \quad (2.30)$$

onde:

f_g - menor frequência para a qual o tratamento estatístico de modos superpostos é válido;

$\bar{\delta}$ - valor médio das constantes de atenuação dos modos acústicos.

Kuttruff [2] concluiu que, visto que as propriedades gerais da função de transferência não dependem especificamente do ponto de observação ou da sala, não é possível estabelecer um critério para a qualidade acústica com base nas quantidades envolvidas nesta função. Originalmente pensava-se que, quanto mais plana fosse a curva de resposta em frequência, melhor a acústica da sala. Isto não é verdade, devido a vários fatores.

Em primeiro lugar, a fala e a música são sinais que variam tão rapidamente, que uma sala grande não atinge, em geral, um estado estacionário. Além disso, de acordo com pesquisas recentes, nosso sistema auditivo não percebe flutuações do espectro do sinal, se as irregularidades são muito próximas em frequência.

Medições do estado estacionário, distribuição espacial em uma só frequência, não têm nenhuma significância na descrição da qualidade acústica [2].

2.3.5 Reverberação e atenuação dos modos em uma sala

Excitando uma sala com um pulso, de curta duração, obtém-se, no limite, com esta duração tendendo a zero, uma resposta impulsiva da sala. A resposta impulsiva corresponde à Transformada de Fourier da função de transferência da sala. Para cada par de fonte e receptor, uma resposta impulsiva é obtida.

A resposta impulsiva pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 g(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} p_{\omega} \exp(i\omega t) d\omega \\
 &= 2\pi \sum_n \frac{A_n}{\omega_n} \exp(-\delta_n t) \sin(\omega_n t), \quad \text{para } t \geq 0
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

Portanto, a resposta impulsiva é composta por vibrações senoidais que decaem exponencialmente. Cada termo da série tem sua frequência e sua constante de atenuação. Também existem diferenças de fase entre os diversos componentes. Se a sala constitui um sistema invariante com o tempo, a resposta a uma excitação arbitrária pode ser calculada pela convolução entre o sinal de excitação e a resposta impulsiva:

$$h(t) = \int_{-\infty}^0 s(\tau) g(t - \tau) d\tau, \quad \text{para } t > 0 \tag{2.32}$$

O resultado desta operação pode ser escrito em forma de uma série, para mostrar mais claramente que os modos excitados na sala dependem das componentes em frequência do sinal de excitação e são estes modos que contribuem para o processo de decaimento. Este processo é chamado de “reverberação”, um dos fenômenos acústicos mais importantes em uma sala [2]. A curva de decaimento pode se apresentar de forma linear ou não, dependendo dos fatores de atenuação dos modos envolvidos no processo.

Uma frente de estudos recente, se aproveita da propriedade correspondente à equação (2.32) para realizar o que é chamado de “auralização”. O processo de “auralização” consiste em calcular a convolução entre uma resposta impulsiva de uma sala e um sinal previamente gravado em um ambiente anecóico. O resultado audível é similar ao percebido se aquele sinal fosse realmente reproduzido naquela sala. Espera-se usar esta técnica no auxílio de projetos acústicos, assim como na indústria de áudio [13].

2.4 Raios Acústicos

Apesar dos avanços que vêm permitindo, cada vez mais, a aplicação da teoria de ondas acústicas no projeto de ambientes fechados, a teoria de raios acústicos ainda é a mais aplicável nestes casos. Vários programas baseados nesta teoria são comercializados, observando, no entanto, que nem todos são classificados como totalmente confiáveis [15].

A teoria de raios acústicos considera que o som se propaga como raios, com propriedades semelhantes às encontradas na ótica geométrica, não considerando, no entanto, fenômenos como a refração ou desvio de raios que se propagam em meios não-homogêneos. A reflexão é o fenômeno mais importante para esta teoria. Para se chegar a esta simplificação, considera-se que o comprimento de onda é infinitamente pequeno, comparado às dimensões da sala. Em geral, esta condição é verificada na prática, mas deve-se ficar atento ao fato de que, em baixas frequências, esta consideração pode não ser satisfatória. Assim como a difração, interferências devido a diferenças de fase não são levadas em conta, se dois campos acústicos se sobrepõem, suas energias são simplesmente somadas, não existindo a possibilidade de haver cancelamento. Uma condição de coerência entre os sinais envolvidos deve ser satisfeita (os diferentes componentes envolvidos devem ser incoerentes) [2].

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

Cada um destes algoritmos apresenta suas vantagens e desvantagens e, dessa forma, outros algoritmos foram desenvolvidos, combinando estes dois primeiros [12]. O algoritmo fonte imagem especular ("image-source") apresenta, como vantagem principal, a boa resolução temporal obtida, fato importante, principalmente quando se

pretende realizar a convolução da resposta impulsiva com um sinal gravado (com uma certa frequência de amostragem), em processos de “auralização”. Em compensação, o tempo de computação necessário para calcular respostas impulsivas cresce exponencialmente com o comprimento desta. Outra desvantagem é que este algoritmo não leva em conta os efeitos de difusão das reflexões, ou o espalhamento devido às formas irregulares das superfícies refletoras.

O algoritmo de raios acústicos (“ray-tracing”), apesar de não oferecer um resultado com uma boa resolução temporal, pode levar em conta as reflexões difusas e ainda requer um tempo de computação que é proporcional ao comprimento da resposta impulsiva.

A seguir, os princípios destes dois algoritmos são brevemente descritos e, por último, é apresentada a forma e a justificativa de se combinar estes dois algoritmos, com base, inclusive, na importância das diferentes porções da resposta impulsiva para a percepção auditiva de uma pessoa.

2.4.1 O algoritmo fonte imagem especular (“image-source”)

Como dito anteriormente, a idéia principal deste algoritmo é tratar as reflexões como raios provenientes de uma fonte virtual, correspondente à imagem especular da fonte original, com relação à parede responsável pela reflexão, como representado na Figura 2.4.1.

A Figura 2.4.1 representa uma fonte virtual de primeira ordem, representando um raio que chega ao receptor depois de apenas uma reflexão, mas existem reflexões de ordem maiores que devem ser levadas em conta e, para isso, a fonte imagem virtual deve ser novamente espelhada, com relação à parede responsável por esta segunda reflexão, como representado na Figura 2.4.2.

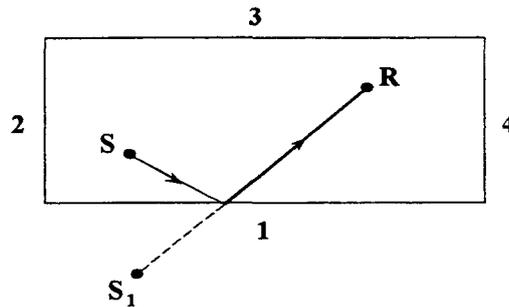


Figura 2.4.1 - Representação da sala com a fonte virtual especular, S_1 , substituindo uma reflexão de primeira ordem.

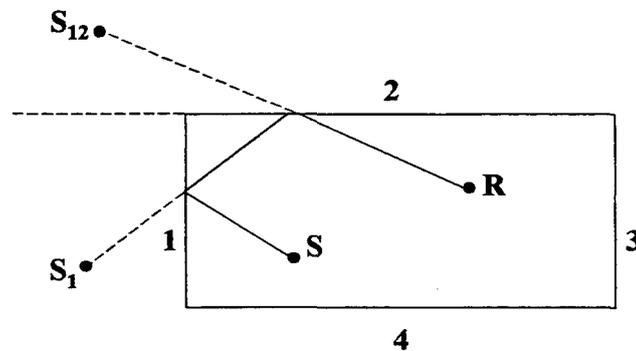


Figura 2.4.2 - Representação da sala com a fonte virtual especular, S_{12} , substituindo uma reflexão de segunda ordem.

Depois de determinadas todas as fontes imagens, deve-se simplesmente somar a contribuição de cada fonte, ao receptor, levando-se em consideração a lei de propagação $1/r^2$, a absorção nas paredes e a atenuação devido à massa de ar. Se o sinal sonoro da fonte é um pulso (delta de Dirac), o resultado final é a resposta impulsiva da sala, entre os dois pontos considerados.

Um certo problema ainda deve ser levado em consideração: nem todas as reflexões, devido a uma fonte em uma determinada posição, são “visíveis” a um receptor em outra posição. Portanto, depois de determinadas as fontes imagens, de primeira ou maior ordem, um teste de “visibilidade” deve ser feito. A Figura 2.4.3

representa uma fonte imagem visível a um receptor e outra invisível a este mesmo receptor.

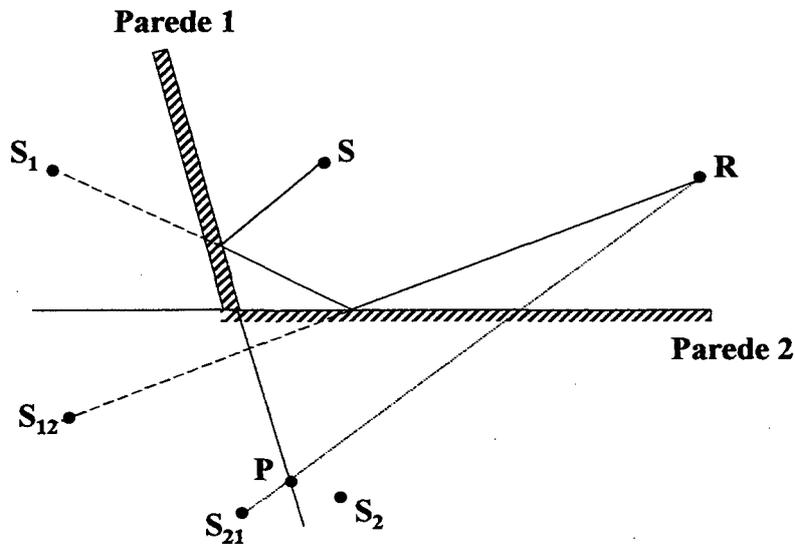


Figura 2.4.3 - Representação gráfica do teste de visibilidade. A fonte S₁₂ é visível ao receptor R, enquanto S₂₁ não é.

Se a interseção da linha que liga a fonte imagem ao receptor com o plano da parede onde a fonte foi espelhada pela última vez acontece fora dos limites da parede, esta fonte é “invisível” a este receptor. Uma vez considerada “invisível”, a contribuição desta fonte deve ser omitida, caso contrário, sua energia deve ser armazenada ao longo do eixo temporal, proporcional a sua distância do receptor. Não existem erros estatísticos neste processo e este algoritmo é classificado como sendo determinístico [12].

A maior dificuldade para realizar o teste de visibilidade é verificar quando um ponto de interseção está contido em um certo polígono. Outra questão é saber quantos testes devem ser realizados para encontrar uma fonte “invisível” [12].

O número de fontes imagem, de acordo com a ordem de reflexão e o número de paredes da sala segue a seguinte lei:

$$N = [(n_w - 1)^j - 1] \tag{2.4.1}$$

onde:

N - número de fontes imagem;

n_w - número de paredes;
 i - ordem de reflexão.

O tempo de cálculo necessário para é de, aproximadamente:

$$t = t_s N \quad (2.4.2)$$

onde:

t_s - tempo necessário para realizar o teste de interseção de um ponto com o polígono.

A lei exponencial, devido ao número de fontes imagem, influi no tempo total de computação, como mostrado pela equação (2.4.2). Por esta razão, este algoritmo é útil nos seguintes casos: (1) para respostas impulsivas de curta duração, (2) para um pequeno número de paredes e (3) para salas retangulares.

2.4.2 O algoritmo de raios acústicos (ray-tracing)

Neste algoritmo, imagina-se que uma fonte emite várias “partículas” de som em diferentes direções, num certo momento. O caminho percorrido por estas partículas é determinado, levando em conta as reflexões nas superfícies (que neste caso podem ser difusas e não estritamente especulares) e a respectiva absorção sofrida. Certos “detetores” são criados e, sempre que interceptados por uma partícula, sua energia e tempo de chegada são registradas. O resultado deste processo pode ser apresentado em forma de histograma, mostrando a distribuição temporal da energia recebida e pode ser considerada como uma aproximação da resposta impulsiva energética entre a fonte e o receptor (Figura 2.4.4), sendo que o grau de aproximação depende do número de partículas emitidas.

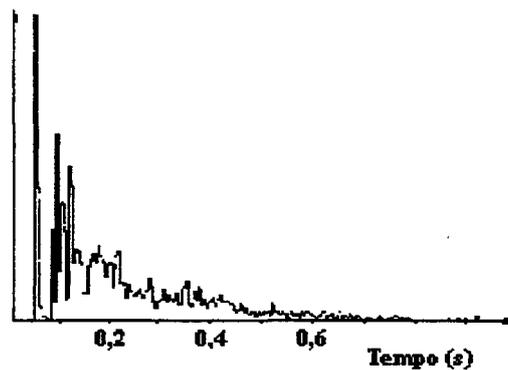


Figura 2.4.4 - Histograma típico, resultante de um algoritmo de raios acústicos (ray-tracing).

Uma vez determinada a direção da partícula, deve-se determinar qual parede vai ser atingida, envolvendo a investigação das n_p paredes, que leva um determinado tempo t_p , para cada parede. Além disso, deve-se investigar se um “detetor” foi atingido neste intervalo, requerendo um tempo $n_d t_d$ (sendo n_d o número de detetores). Ainda deve-se calcular a nova direção da partícula, depois desta reflexão, sendo necessário um tempo t_c . Dessa forma, cada processo de reflexão requer um tempo elementar de:

$$\tau = n_p t_p + n_d t_d + t_c \quad (2.4.3)$$

Este tempo elementar deve ser multiplicado pelo número de reflexões nt_{\max} de uma partícula durante o intervalo de tempo t_{\max} e pelo número de partículas N . Portanto, o tempo total de cálculo é:

$$t = N nt_{\max} \tau \quad (2.4.4)$$

Cada um destes tempos depende do tipo de computador utilizado, mas o que é possível perceber é que não existe nenhuma forma de crescimento exponencial do tempo de computação.

2.4.3 Algoritmos híbridos para o cálculo de respostas impulsivas

Para combinar algumas vantagens dos algoritmos mais tradicionais, algoritmos alternativos começaram a ser propostos. Vorlaender [12] apresentou um algoritmo que usa o método de raios acústicos (ray-tracing) para identificar as fontes visíveis e, posteriormente, aplicar o algoritmo de fonte-imagem especular para as fontes selecionadas como visíveis e calcular suas contribuições.

Este novo algoritmo permite calcular respostas impulsivas de maior duração e com maior resolução temporal, com um tempo computacional menor. No entanto, ainda é restrito às reflexões especulares. Inicialmente, Vorlaender [12] propôs um algoritmo onde os detetores são constituídos por esferas, por apresentarem sensibilidade igual em todas as direções, como representado (no plano) na Figura 2.4.5.

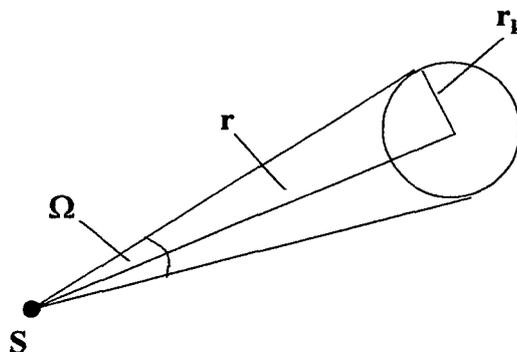


Figura 2.4.5 – Fonte sonora e esfera detetora, sendo a distância $r=ct$.

Uma forma de implementar este algoritmo é imaginar que feixes de raios, na forma de cones, são emitidos da fonte e a propagação dos cones é conduzida pela aplicação do algoritmos de raios acústicos aos seus eixos[14]. Se um ponto de recepção se encontra dentro do volume do cone, uma fonte imagem visível foi encontrada e sua contribuição é calculada. Dessa forma, somente fontes imagem visíveis serão encontradas (ver Figura 2.4.6).

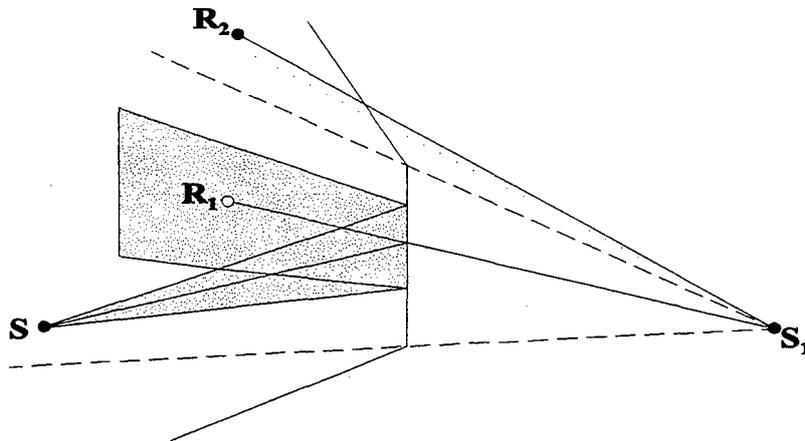


Figura 2.4.6 - Feixes de raios cônicos. A fonte imagem S_1 é visível ao receptor R_1 , mas não ao R_2 .

Alguns problemas podem ocorrer, neste caso. Um é que, como o algoritmo fonte imagem assume que o receptor é um ponto, e no algoritmo de raios acústicos este receptor tem dimensão finita, algumas partículas são contadas e relacionadas com fontes imagem que não são visíveis ao centro da esfera. A dimensão deste erro depende do tamanho da esfera. Um caminho ainda pode ser contado duas vezes, devido à superposição de cones adjacentes [14] e, para minimizar este efeito, é possível ponderar a energia recebida pelo cone, dando maior peso ao centro do cone do que às bordas. Outro problema que pode existir é que, quando o cone atinge uma aresta ocorre o conhecido “estreitamento de raios”, que pode “perder” algumas fontes imagens (ver Figura 2.4.7).

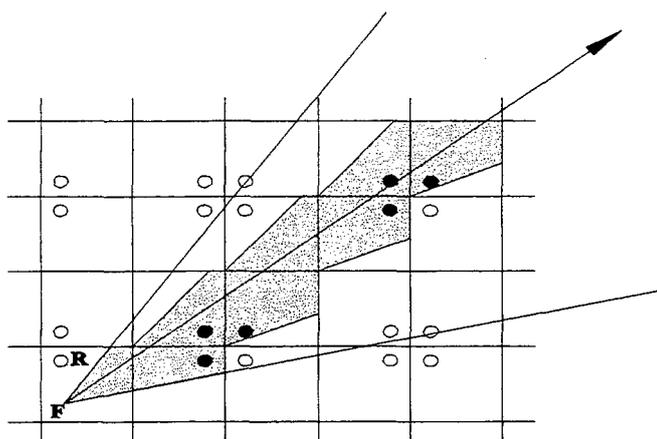


Figura 2.4.7 – Estreitamento de raios, representados em uma sala retangular.

Uma alternativa para se evitar o erro de superposição citado, é usar, ao invés de feixes de raios cônicos, feixes de raios com a base triangular. Mesmo assim, os outros tipos de erro ainda podem ocorrer.

No algoritmo híbrido proposto por Vorlaender [12], os efeitos de reflexões difusas não são considerados. Outros programas, no entanto, utilizam algoritmos híbridos e ainda incorporam estes efeitos que, como verificado durante uma comparação entre diversos programas de raios acústicos [15], não devem ser desprezados.

2.4.4 Considerações sobre respostas impulsivas e outros problemas envolvidos na aplicação dos algoritmos descritos

Para transformar a resposta impulsiva energética obtida nos algoritmos anteriormente descritos, assume-se que as paredes possuem impedância real e que os efeitos de difração nas arestas podem ser negligenciados. Dessa forma, a resposta impulsiva, relativa à pressão, é composta de pulsos de Dirac e é simplesmente a raiz quadrada da resposta impulsiva energética [12].

Segundo alguns autores [13], pode-se dividir a resposta em duas porções, responsáveis por diferentes efeitos sobre a percepção auditiva das pessoas. O trecho inicial, constituído pelo som direto e pelas primeiras reflexões, é importante para as

sensações de “loudness”, clareza (“clarity”) e “spaciousness”, por exemplo [13], assim como para variações quanto à audibilidade em diferentes pontos da sala. A distribuição e intensidade das primeiras reflexões é importante para todas estas sensações. O trecho final da resposta impulsiva, conhecido como o trecho “reverberante”, também é importante para a percepção auditiva. No entanto, a importância maior depende da aparência de sua distribuição e não tanto com relação aos detalhes. O limite entre um trecho e outro ocorre, em geral, entre 100 e 150 ms, depois da chegada do som direto. Tendo conhecimento deste fato, é possível usar um algoritmo que combine o da fonte imagem especular, para calcular o trecho inicial, e o algoritmo de raios acústicos, para determinar o comportamento do trecho final da resposta impulsiva.

Um efeito que não é levado em consideração, em nenhum destes algoritmos, é o do comportamento diferenciado da absorção em ângulos de incidência muito grandes (com relação à direção normal) e, por enquanto, não existem dados mais precisos sobre este fenômeno, de forma que ele possa ser levado em consideração.

Para finalizar, vale lembrar que os métodos de determinação da resposta impulsiva aqui discutidos são limitados pelos princípios da acústica geométrica.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A TÉCNICA DE MEDIÇÃO UTILIZADA: “MAXIMUM LENGTH SEQUENCE” (MLS)

3.1 Introdução

A maioria dos parâmetros acústicos utilizados atualmente para avaliar a qualidade acústica de uma sala, pode ser calculada a partir das respostas impulsivas da sala. Já há alguns anos, Schroeder [16] demonstrou que a curva de decaimento pode ser obtida a partir de uma certa integral sobre a resposta impulsiva entre dois pontos da sala, equivalente, inclusive, àquela (curva de decaimento) que seria obtida depois de calculada a média sobre um número infinito de medições.

Pesquisadores de várias áreas vêm, também há vários anos, estudando métodos para determinar a resposta impulsiva de diversos tipos de sistemas. A forma mais simples é excitar o sistema com um impulso e medir sua resposta. Isto pode até parecer uma redundância, mas, tratando dos casos práticos (especificamente em acústica de salas), uma série de questões restringem o uso desta técnica. De início, é difícil gerar uma excitação que se aproxime de um impulso, e que possa ser repetida exatamente vezes seguidas.

No caso de sistemas de áudio, como alto-falantes, por exemplo, é comum o uso de métodos alternativos, como o “Time Delay Spectrometry”, onde a excitação é um sinal senoidal que varre uma banda de frequência a uma determinada taxa [17].

Um outro método alternativo para medir respostas impulsivas de sistemas (lineares e invariantes com o tempo) se baseia no uso de seqüências binárias, conhecidas como “Maximum-Length Sequences” (MLS), usadas como sinal de excitação. Este tipo de sinal surgiu da necessidade observada em outras áreas, especialmente na área de técnicas de radar, onde problemas similares são encontrados [18].

Schroeder [4] propõe que este tipo de sinal seja usado como excitação em uma sala para medir as respostas impulsivas e, conseqüentemente, curvas de decaimento, chamando a atenção para a possibilidade de, através desta técnica, medir respostas impulsivas em ambientes com altos níveis de ruído, mais especificamente, de salas ocupadas durante suas atividades normais. Neste mesmo trabalho o autor propõe o uso de um sinal baseado em seqüências de Legendre.

Nos últimos anos vários trabalhos têm sido publicados, abordando o uso de MLS para a medição de respostas impulsivas de sistemas lineares e invariantes com o tempo e o método vem se consolidando como um dos mais poderosos para a determinação de vários parâmetros na área de acústica de salas. Mais detalhes sobre a teoria e os aspectos práticos envolvendo a técnica MLS serão revistos a seguir.

3.2 “Novo” método para a medição do Tempo de Reverberação

O método mais comum, até hoje, para determinar as curvas de decaimento de uma sala, consiste em excitar esta sala com um sinal de espectro uniforme, como ruído branco ou rosa, e, depois de atingir uma condição estacionária na sala, desligar a fonte e registrar o comportamento do nível de pressão sonora com o tempo. A forma da curva de decaimento é intimamente ligada às características geométricas da sala, assim como dos coeficientes de absorção das superfícies internas da sala (paredes, móveis, pessoas, etc...).

As curvas de decaimento obtidas desta forma contém um componente de caráter aleatório, que dificulta a observação de detalhes e, por vezes, a distinção entre diferentes taxas de decaimento das curvas, fato que pode indicar que o campo acústico em uma sala não é suficientemente difuso [16]. Além disso, as porções iniciais destas curvas (em geral desprezadas, quando utilizado o método acima) são também importantes quando se trata de avaliar impressões subjetivas. Uma forma de eliminar parte deste comportamento aleatório é fazer a média entre as curvas obtidas em várias medições, o que pode se tornar um tanto dispendioso.

Como alternativa a este processo de cálculo de médias, Schroeder [16] demonstrou, em 1965, que a curva de decaimento pode ser obtida a partir de uma

certa integral sobre o quadrado da resposta impulsiva, e o resultado final equivale àquele que seria obtido se realizadas médias sobre infinitas curvas de decaimento.

Esta demonstração é transcrita aqui [16]:

“Seja $n(t)$ um ruído branco estacionário. Para o sinal atender a condição de estacionaridade, sua auto-covariância $\langle n(t_1)n(t_2) \rangle$ deve depender apenas da diferença (t_1-t_2) . Se o sinal tem o espectro plano, a auto-covariância é zero, exceto para $t_1=t_2$.

Assim, é possível escrever:

$$\langle n(t_1)n(t_2) \rangle = N\delta(t_1-t_2) \quad (3.1.1)$$

onde:

N - densidade espectral de potência;

$\delta(t_1-t_2)$ - função delta de Dirac.

Em medições do Tempo de Reverberação, quando o ambiente atinge uma condição de estacionaridade, o ruído é desligado. Até este momento, assumindo que o sistema seja linear e invariante com o tempo, a resposta em outro ponto da sala pode ser descrita por:

$$s(t) = \int_{-\infty}^0 n(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (3.1.2)$$

onde:

$h(t)$ - resposta impulsiva do sistema (sala + filtros + amplificadores + transdutores);

$s(t)$ - resposta em um certo ponto da sala.

O quadrado do sinal recebido é:

$$s^2(t) = \int_{-\infty}^0 d\tau \int_{-\infty}^0 n(\tau)n(\theta)h(t-\tau)h(t-\theta)d\theta \quad (3.1.3)$$

A média do quadrado do sinal recebido é, de (3.1.1):

$$\langle s^2(t) \rangle = \int_{-\infty}^0 d\tau \int_{-\infty}^0 N\delta(\theta-\tau)h(t-\tau)h(t-\theta)d\theta \quad (3.1.4)$$

$$\langle s^2(t) \rangle = N \int_{-\infty}^0 h^2(t-\tau)d\tau \quad (3.1.5)$$

Fazendo a mudança de variáveis:

$$x = t - \tau$$

tem-se:

$$\langle s^2(t) \rangle = -N \int_{+\infty}^t h^2(x)dx$$

ou

$$\langle s^2(t) \rangle = N \int_t^{+\infty} h^2(x)dx \quad (3.1.6)''$$

Segundo o autor [16], a Eq.(3.1.6) pode ser interpretada da seguinte forma:

“se o sistema em questão é linear e invariante com o tempo, e a Densidade Espectral de Potência (DEP) do sinal utilizado para excitar este sistema é idêntica à DEP do ruído branco, o valor da média dos quadrados da resposta,

devido ao ruído, é igual ao quadrado da resposta impulsiva, integrado de zero a “infinito”.

Na verdade, o limite superior da integral é definido pelo momento a partir do qual a resposta impulsiva tende a valores desprezíveis. O fato importante aqui é a constatação da existência de uma identidade entre a média dos quadrados das curvas de decaimento e o quadrado da resposta impulsiva, e de que, enquanto o lado esquerdo da Eq.(3.1.6) envolve o cálculo de uma média entre um grande número de medições, o lado direito envolve uma operação matemática com uma medição apenas. Esta vantagem tem um certo preço, pois envolve um esforço computacional.

Ainda da Eq.(3.1.6) é possível perceber que, se a resposta impulsiva é monotonamente decrescente com o tempo, a curva de decaimento também o será. Isto significa que a curva de decaimento obtida por este método, tenderá a não apresentar as indesejáveis flutuações (componentes de caráter aleatório). Na prática estas flutuações podem existir, devido a outros fatores, como o ruído elétrico das fontes sonoras e dos transdutores. Ainda assim, é possível fazer médias entre as curvas obtidas para melhorar o resultado final.

Os pontos cruciais desta técnica ficam por conta da determinação dos limites de integração da resposta impulsiva do sistema e da garantia de que o sistema seja invariante com o tempo. Isto significa, por exemplo, que ela não pode ser empregada em salas com difusores rotativos [19].

Deve-se observar que esta técnica de obtenção da curva de decaimento não é aplicada apenas em sistemas cujo sinal de excitação é uma MLS. Outros tipos de medição também fazem uso deste procedimento.

3.3 O uso de “Maximum-Length Sequences” (MLS) para a determinação de respostas impulsivas de sistema lineares e invariantes com o tempo

Como mencionado anteriormente, a dificuldade de gerar pulsos de alta intensidade, em curtos espaços de tempo e com espectro plano em faixas de

freqüência de interesse, levou pesquisadores de várias áreas a buscar formas alternativas de determinar a resposta impulsiva de um sistema.

No caso específico de acústica de salas, o uso de alto-falantes é inadequado para a reprodução de pulsos muito intensos, pois, em geral, o limite de resposta linear do alto-falante é ultrapassado, proporcionando distorções e espectros não planos.

Outras fontes de excitação são freqüentemente utilizadas, como pistolas e faíscas produzidas por “spark-gaps”, mas também produzem sinais que nem sempre têm espectro plano nem uma boa repetibilidade.

Para um sistema linear e invariante com o tempo, é possível demonstrar que a correlação cruzada entre o sinal de entrada e o sinal de saída é igual à convolução entre a auto-correlação do sinal de entrada e a resposta impulsiva do sistema, isto é:

$$f_{xy}(k) = f_{xx}(k) * h(k) \quad (3.2.1)$$

onde:

f_{xy} - correlação cruzada entre o sinal de entrada (x) e o de saída (y);

f_{xx} - auto-correlação do sinal de entrada;

h - resposta impulsiva do sistema.

Supondo que a auto-correlação do sinal de entrada é uma função delta de Dirac, a relação passa a ser [20]:

$$f_{xy}(k) = h(k) \quad (3.2.2)$$

Portanto um sinal aleatório pode ser utilizado para determinar a resposta impulsiva de um sistema linear e invariante com o tempo, assim como outros tipos de sinais pseudo-aleatórios, com características próximas à desejada, quanto à função de auto-correlação. Schroeder [18], em 1979, sugeriu o uso de dois tipos de sinais para a obtenção de respostas impulsivas de uma sala, pensando na eficiência, facilidade de computação e relação sinal/ruído; um, baseado em seqüências de Legendre e outro, um sinal conhecido em outras áreas, gerado por “shift registers”, chamado “Maximum-

Length Sequence”. Este último se tornou mais popular e já há alguns anos é considerado uma importante ferramenta utilizada na obtenção de respostas impulsivas de sistemas lineares e invariantes com o tempo.

As seqüências do tipo “Maximum-Length” são geradas por “shift registers”, que satisfazem relações recursivas, como, por exemplo [20]:

$$\tilde{n}(k+3) = \tilde{n}(k) \oplus \tilde{n}(k+2) \tag{3.2.3}$$

onde:

$\tilde{n}(\cdot)$ - “palavra” binária;

\oplus - símbolo que representa a operação conhecida como “ou exclusivo”, conforme a tabela abaixo:

A	B	C
0	0	0
1	0	1
1	1	0
0	1	1

A - estado da saída;

B, C - estado da entrada.

A relação recursiva apresentada em (3.2.3) pode ser representada em diagrama, da seguinte forma:

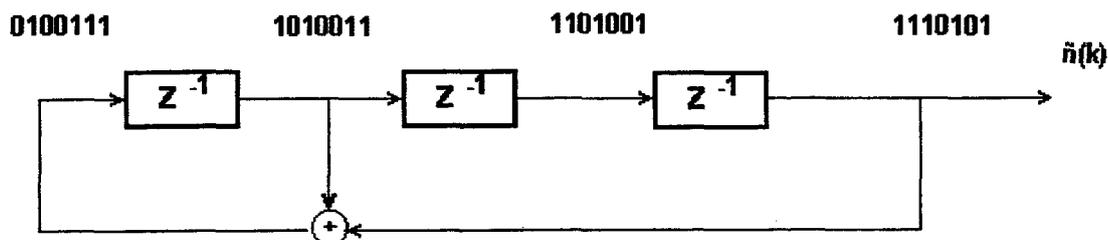


Figura 3.1 - Diagrama representando a relação recursiva apresentada na Seção 3.2.3.

Os blocos representados por z^{-1} atrasam um “bit” da “palavra binária” que existe no nó anterior. As “palavras” apresentadas no diagrama são produzidas quando o estado inicial do sistema for $\hat{n}(k) = 1111111$. Um “shift register” com vários estágios é capaz de produzir 2^m estados diferentes. No entanto, se ocorrer o estado $\hat{n}(k) = 0000000$, será impossível a ocorrência de estados diferentes. Para evitar este problema, a seqüência mais longa que pode ser gerada, usando realimentação linear tem comprimento $2^m - 1$. Uma seqüência binária de comprimento $2^m - 1$ é denominada “Maximum-Length Sequence”.

O uso de MLS traz as seguintes vantagens, para o caso aqui estudado:

- seu espectro é plano , exceto por uma pequena diferença em $f = 0$ Hz;
- por ser um sinal determinístico, apenas um canal de medição é necessário;
- sua função de auto-correlação é um impulso periódico;
- por se tratar de uma seqüência binária, a correlação cruzada é simples de ser computada (só requer operações de adição e subtração);
- sendo um sinal determinístico, pode ser repetido precisamente. Assim, diferenças em medições sucessivas são atribuídas ao ruído do sistema, o que permite que, por exemplo, a faixa dinâmica de uma curva de decaimento obtida em uma sala excitada por este sinal possa ser aumentada calculando a média entre resultados de várias medições.

Além disso, ao contrário de medições feitas com sinais de excitação tipo impulso, que, em geral, têm baixa relação sinal/ruído devido à limitação de transdutores em reproduzir um sinal de alta intensidade, a energia do sinal tipo MLS é distribuída no tempo, o que permite trabalhar com níveis de sinais mais baixos e obter uma relação

sinal/ruído mais alta. O processo de correlação cruzada também tende a eliminar o ruído de fundo, o que contribui ainda mais para o aumento da relação sinal/ruído.

A correlação cruzada pode ser feita calculando-se a Transformada de Fourier da entrada (MLS) e da saída, multiplicando as duas transformadas e realizando a Transformada Inversa de Fourier. Como, em certa época, o trabalho de computação deveria ser minimizado ao máximo, devido a limitações tecnológicas, uma outra forma de se calcular a correlação cruzada foi desenvolvida. A forma computacionalmente mais econômica encontrada foi baseada na transformação da matriz que contém a seqüência, para uma matriz de Hadamard do tipo Sylvester e, a partir daí, aplicar o algoritmo conhecido como Transformada Rápida de Hadamard para calcular a correlação cruzada entre a excitação e a resposta. Se a resposta for amostrada com a mesma freqüência de geração de pulsos da MLS, o resultado final pode ser escrito como [21]:

$$[h] = n^{-1} [Mn] [So]$$

onde:

n - comprimento da seqüência;

[h] - vetor resposta impulsiva;

[Mn] - matriz nxn contendo a versão circularmente atrasada para a direita da seqüência;

[So] - vetor resposta a MLS.

A matriz [Mn] é a que sofre a transformação. O algoritmo para esta transformação foi desenvolvido por Alrutz Lemppel (1979), citado em [21] e Borish e Angell [20], paralelamente.

Para medições que devem ser feitas em bandas de freqüência, tanto o sinal de excitação, quanto a resposta impulsiva podem ser filtrados na faixa de freqüência de interesse. Alguns problemas podem surgir neste último caso, quanto à faixa dinâmica da curva de decaimento.

3.4 Abordagem do uso de MLS, quanto à teoria de sinais discretos

MLS's foram tratadas, em uma certa época, como sinais analógicos (Davies, em 1966, citado em [22]), mas, atualmente, é mais conveniente tratá-las como seqüências periódicas discretas no tempo [22].

Um sistema linear e invariante no tempo é descrito por sua "unit sample response" $h(n)$, e a saída é relacionada à entrada pela convolução discreta linear:

$$y(n) = x(n) * h(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k) h(n-k) \quad (3.4.1)$$

onde:

$x(n)$ - sinal de entrada;

$y(n)$ - sinal de saída;

$h(n)$ - "unit sample response".

Um sistema linear e invariante com o tempo também pode ser caracterizado por sua convolução periódica envolvendo sua resposta impulsiva periódica $h'(n)$:

$$y'(n) = x'(n) \otimes h'(n) = \sum_{k=0}^{L-1} x'(k) h'(n-k) \quad (3.4.2)$$

onde:

L - período da seqüência;

$h'(n)$ - resposta impulsiva do sistema a um impulso unitário periódico (de período L);

\otimes - convolução periódica.

Existe uma relação entre a "unit sample response" $h(n)$ e a resposta do sistema a um impulso periódico $h'(n)$, que pode ser representada como na figura 3.1.

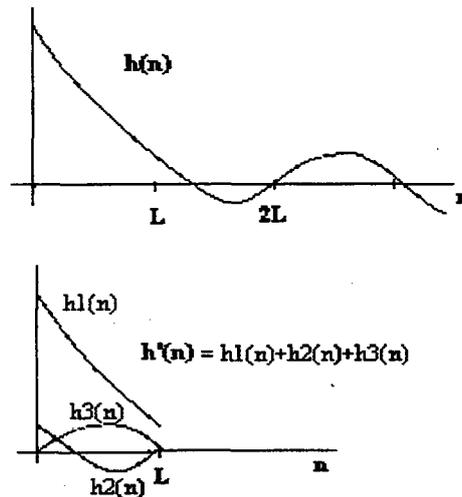


Figura 3.2 - O fenômeno de “Time Aliasing” da resposta impulsiva $h(n)$, verificado na resposta impulsiva periódica $h'(n)$.

Esta relação é também conhecida como “Time Aliasing”. Se $h(n)$ passa a assumir valores muito pequenos em sua primeira amostragem (de comprimento L), o “Time Aliasing” é evitado e $h'(n)$ será uma boa aproximação de $h(n)$.

A importância deste fato é que, usando MLS, determina-se $h'(n)$ necessariamente, e não $h(n)$. Desta forma, para medir o Tempo de Reverberação, procura-se usar uma seqüência com período maior que uma certa porcentagem do Tempo de Reverberação da sala. Na prática, o estado 1 é associado a um nível de sinal -1 e o estado 0, a um nível +1. Isto torna a seqüência simétrica em torno de zero. Pode-se demonstrar que a auto-correlação de uma MLS simétrica é [22]:

$$W_{ss}(0) = \frac{L}{L+1} \quad , n = 0;$$

$$W_{ss}(n) = \frac{-1}{L+1} \quad , 0 < n < L.$$

onde o valor pico da função de auto-correlação é 1.

Partindo da Eq.(3.4.2), substituindo $x'(k)$ por $s'(k)$, correspondente à MLS, tem-se:

$$y'(n) = s'(n) \otimes h'(n) = \sum_{k=0}^{L-1} s'(k) h'(n-k) \quad (3.4.3)$$

Para se encontrar $h'(n)$, faz-se a correlação cruzada periódica entre $y'(n)$ e $s'(n)$ [normalizada por $(L+1)$, por conveniência]:

$$W_{xy}(n) = s'(n) f y'(n) = \frac{1}{L+1} \sum_{k=0}^{L-1} s'(n) y'(n+k) \quad (3.4.4)$$

onde:

$W_{xy}(n)$ - correlação cruzada entre a entrada e a saída;

f - operação de correlação cruzada periódica.

Substituindo (3.4.3) em (3.4.4):

$$\begin{aligned} W_{xy}(n) &= s'(n) f [s'(n) \otimes h'(n)] = [s'(n) f s'(n)] \otimes h'(n) = W_{ss}(n) \otimes h'(n) = \\ &= \sum_{k=0}^{L-1} W_{ss}(n) h'(n-k) \end{aligned} \quad (3.4.5)$$

Esta relação diz que a correlação cruzada periódica da entrada com a saída é igual à convolução da auto-correlação W_{ss} com a $h'(n)$. A partir daí pode-se demonstrar que:

$$W_{xy}(n) = h'(n) - \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} h'(n) + \frac{1}{L(L+1)} \sum_{k=0}^{L-1} h'(n) \quad (3.4.6)$$

Da relação acima, o segundo termo pode ser interpretado como o valor médio de $h'(n)$, sendo subtraído da resposta final. Ou melhor, pode-se dizer que este termo cancela o componente "d.c." da resposta $h'(n)$, e a correlação circular depende, basicamente, da componente "a.c." da resposta impulsiva. A terceira parcela pode ser

considerada como um pequeno resíduo $[(L+1)$ vezes menor que o segundo termo].

Em geral, especialmente para grandes valores de L , pode-se afirmar que:

$$W_{xy}(n) = h'(n) \quad (3.4.7)$$

O tratamento acima considera que o sistema é discreto. Para medir sistemas lineares contínuos no tempo, a MLS é convertida para um sinal analógico, através de um conversor analógico/digital (A/D). Este sinal é aplicado ao sistema que, por sua vez, pode ser ligado a um filtro “anti-aliasing”. A saída do filtro é amostrada e o processo volta a ser discreto. É bom lembrar que o sistema, neste caso, é constituído de todo o conjunto envolvendo os filtros, conversores A/D, transdutores e o objeto da medição, propriamente dito.

3.5 Aspectos práticos do uso de MLS

Como a técnica que envolve o uso de MLS para a medição de respostas impulsivas de sistemas é relativamente nova, vários experimentos têm sido realizados nos últimos anos, na tentativa de se determinar com mais clareza quais as vantagens e quais as limitações existentes no processo.

Uma das primeiras questões práticas levantadas, quanto ao uso de MLS, foi com relação ao comprimento, ou mais especificamente, da duração da seqüência. Schroeder [18], já em 1979, afirmou que a seqüência deveria ter uma duração igual a uma certa fração do Tempo de Reverberação (no caso de acústica de salas). Borish e Angell [20] e, de uma maneira mais clara, Rife e Vanderkooy [22], apontaram o problema e atestaram que, para que a resposta impulsiva periódica $h'(n)$ corresponda à resposta impulsiva do sistema $h(n)$, a seqüência deve ter um período suficiente para que a resposta impulsiva passe a assumir valores muito pequenos comparados aos valores iniciais. Ainda segundo Rife e Vanderkooy [22], como a energia do campo reverberante é muito menor que a energia do campo direto, MLS de períodos relativamente curtos podem ser usadas, sem que o “Time Aliasing” afete muito a medição.

Uma outra questão é a que se refere à influência dos componentes da cadeia de medição no resultado final. A resposta em frequência e a diretividade dos alto-falantes e microfones, assim como as respostas dos filtros e dos amplificadores, são fatores que podem influenciar demasiadamente o resultado final.

As funções de transferência dos filtros existentes na cadeia de medição devem estar entre certos limites. Numa cadeia de medição que usa MLS, podem existir filtros anti-aliasing e filtros passa banda utilizados para filtrar o sinal de excitação ou resposta. Em um trabalho publicado por Chu [21], uma breve comparação é feita entre curvas de decaimento obtidas com uma MLS filtrada na banda de interesse e curvas de decaimento obtidas com a resposta impulsiva filtrada na banda de interesse. O autor concluiu que os resultados obtidos com ambos os procedimentos foram satisfatórios, mas o último, que consiste em filtrar a resposta impulsiva, tende a diminuir a faixa dinâmica da curva de decaimento.

Lundeby et al. [23], por sua vez, afirmam que diferenças substanciais podem existir entre parâmetros acústicos medidos, dependendo de qual procedimento é aplicado. Uma outra questão é levantada neste trabalho; supondo que o procedimento de filtrar a resposta impulsiva seja escolhido, deve-se escolher os limites de integração para obter a curva de decaimento. Estes limites são escolhidos aplicando janelas temporais nas respostas impulsivas e a tendência é acreditar que o melhor procedimento seja truncar a resposta impulsiva antes de filtrá-la. No entanto os autores mostram, através de um exemplo prático, que o melhor procedimento consiste em truncar o sinal depois de filtrá-lo, corrigindo o resultado como sugerido por Barron [23].

Segundo Vanderkooy [24], erros também podem ocorrer devido à existência de “inclinações” onde deveriam ocorrer “saltos lógicos”, e podem gerar imagens na resposta impulsiva que podem ser interpretadas erroneamente como reflexões, quando se mede, por exemplo, respostas de uma sala. Para identificar quais destas imagens são realmente reflexões, sugere-se que a medição seja realizada com uma MLS de ordem (número de “shift registers”) diferente ou, conhecendo a ordem e o “feedback tap” da seqüência, usar uma tabela fornecida no próprio artigo.

O problema da influência da resposta em frequência dos sensores (microfones) não tem sido profundamente investigada e Vörländer [25] propõe que este fato seja objeto de estudo um pouco mais aprofundado.

O alto-falante é constantemente apontado como um dos pontos mais fracos da cadeia de medição. Em primeiro lugar, dependendo da resposta em frequência do alto-falante, o sinal reproduzido em um ambiente pode não ser mais uma MLS de espectro plano. Além disso, se o nível de sinal que chega ao alto-falante for muito alto, distorções, ou melhor, efeitos não lineares podem ser introduzidos ao sistema, infringindo uma das condições básicas do uso de MLS para determinação de respostas impulsivas.

Um estudo preliminar de Vanderkooy [24] aponta para o efeito de distorções de baixa ordem nas respostas impulsivas e curvas de decaimento. O autor realizou um experimento, aplicando um sinal (MLS) de 20 V (rms) em um alto-falante, com o objetivo de medir a resposta impulsiva da sala. As curvas de decaimento, de “banda larga” e filtradas em banda de 1/1 oitava, apresentam um “ruído de fundo” extremamente elevado e faixa dinâmica bastante reduzida. Para este tipo de distorção é proposto um procedimento de correção que consiste em extrapolar a curva de decaimento a partir do decaimento inicial, estimar a energia média do ruído e subtraí-la de uma nova integração da resposta impulsiva. O melhor procedimento, no entanto, é otimizar o nível do sinal no alto-falante.

A otimização da configuração do sistema de medição é o objeto de estudo de um artigo publicado por Bradley [26], em 1996. Segundo ele, para calcular os parâmetros acústicos a partir da curva de decaimento, é importante que a faixa dinâmica desta seja maximizada. Os fatores que podem limitar esta faixa são:

- relação sinal MLS/ruído de fundo inadequada;
- comprimento pequeno da MLS;
- número inadequado de médias;
- distorção excessiva do alto-falante.

Como visto anteriormente, em alguns casos, aumentar o nível do sinal a ser reproduzido pode diminuir a faixa dinâmica. No experimento conduzido por Bradley foram variados:

- o comprimento da seqüência;

- o número de médias;
- a equalização do sinal da fonte;
- o nível do sinal de entrada.

A equalização do sinal do alto-falante pode ser feita de forma que sua resposta tenha um espectro branco ou rosa. Este último tem a vantagem de fornecer níveis de sinais mais altos em baixas frequências, onde o ruído ambiente costuma ser mais alto (o efeito deste tipo de equalização deve ser descontado no final). Qualquer tipo de equalização pode causar uma diminuição da faixa dinâmica por dois motivos:

- (1) ao aumentar o nível do sinal em uma frequência em que o alto-falante tem uma resposta deficiente, o nível de distorção também pode estar sendo aumentado;
- (2) ao diminuir o nível do sinal onde o alto-falante tem um “pico” na resposta, a relação entre o nível do sinal da MLS e o ruído de fundo diminui nesta faixa de frequência.

Assim sendo, existe um certo compromisso entre a equalização e a faixa dinâmica da curva de decaimento.

Para estudar o efeito da relação entre o nível do sinal e o nível do ruído de fundo, Bradley sintetizou o ruído de fundo e comparou o efeito de várias combinações de nível de sinal e nível de ruído de fundo. Suas conclusões foram:

- para ambientes silenciosos, pode ser mais importante diminuir do que aumentar o nível do sinal, para aumentar a faixa dinâmica;
- para cada nível de ruído de fundo existe um nível ótimo do sinal, de forma a produzir a maior faixa dinâmica;
- a faixa dinâmica aumenta com a diminuição do ruído ambiente e o ponto ótimo ocorre com níveis mais baixos de sinal;
- existe um “limite de distorção” do sistema de medição, isto é, melhores faixas dinâmicas não podem ser obtidas por causa da distorção que passa a existir no alto-falante.

Como a MLS é um sinal determinístico, é possível aumentar a relação sinal/ruído e a faixa dinâmica da curva de decaimento, fazendo a média entre as respostas de vários períodos de MLS. Para cada número de médias utilizado, também existe um valor ótimo para o nível de sinal de entrada. No experimento mencionado acima constatou-se que, multiplicando por 10 o número de médias, a faixa dinâmica aumentou de 10 dB, aproximadamente. Isto é válido se o sistema não estiver operando na região que já é limitada pela distorção do alto-falante. Quanto maior o número de médias, menor o nível do sinal necessário para se obter a maior faixa dinâmica possível.

O aumento do comprimento da seqüência também contribui para o aumento da faixa dinâmica da curva de decaimento. Bradley constatou que, dobrando o comprimento da seqüência, a faixa dinâmica é aumentada em 3 dB, aproximadamente. Uma vantagem deste procedimento é que ele não é limitado pela distorção do alto-falante. É importante frisar que, para níveis de sinal mais altos, a faixa dinâmica pode ser aumentada com o aumento do comprimento da seqüência, mas não com o número de médias. Deste raciocínio conclui-se que é importante usar o maior comprimento de seqüência possível (admitindo que o sistema a ser medido é invariante com o tempo).

Um procedimento de otimização do sistema de medição é sugerido por Bradley [26]:

- (1) Determinar o limite de distorção do sistema de medição em ambiente silencioso (plotar a curva faixa dinâmica x nível do sinal);
- (2) avaliar o ruído de fundo da sala;
- (3) usar um sinal de saída suficientemente baixo para atingir a faixa dinâmica desejada;
- (4) usar o maior comprimento da seqüência possível;
- (5) se o sistema não estiver limitado pela distorção do alto-falante, deve-se aumentar o número de médias;
- (6) limitar a duração total da medição, se existirem fatores que violam a condição de invariabilidade no tempo.

Em medições de saias, em geral, além de ser importante que o alto-falante tenha uma resposta razoavelmente plana, para que medições feitas por diferentes equipes sejam comparáveis, é importante que ele seja o mais omni-direcional possível [23].

Do estudo feito por Lundeby et al.[23], concluiu-se que as maiores diferenças encontradas em parâmetros acústico medidos por diferentes equipes, na mesma sala, devem-se principalmente ao processamento das respostas impulsivas. Isto é, as respostas impulsivas medidas são similares, mas os algoritmos utilizados para o cálculo de, por exemplo, Tempo de Reverberação, introduzem erros sistemáticos. Assim, a etapa de processamento da resposta impulsiva é também um elemento crítico do processo.

3.6 Considerações quanto ao uso de MLS para medição de respostas impulsivas em salas ocupadas

Quando o uso de MLS para a determinação de curvas de decaimento foi proposto por Schroeder, em 1979, imaginava-se que, por causa da alta relação sinal/ruído (um dos principais atrativos da técnica), medições poderiam ser realizadas em auditórios ocupados, a níveis quase inaudíveis. A idéia era que, como a música e a imagem falada, supostamente, são sinais incoerentes, eles seriam excluídos durante a realização da correlação cruzada, no cálculo da resposta impulsiva. Eventuais ruídos remanescentes seriam minimizados realizando outras medições e calculando a média entre os resultados. Assim, a medição seria realizada durante quase todo o decorrer do evento, sem que as pessoas presentes percebessem. Na ocasião, Schroeder descreveu uma experiência bem sucedida, realizada durante suas próprias palestras. Já na época, foi chamada a atenção para o fato de que as respostas da sala deveriam ser razoavelmente estáveis durante a medição e a platéia não deveria se movimentar nem falar demasiadamente.

Dessa forma, a possibilidade de realizar medições durante as palestras ou concertos sempre foi um dos principais atrativos envolvendo o uso de MLS em acústica de salas. Em 1990, Chu [21] realizou medições de Tempo de Reverberação em uma

câmara reverberante, na presença de um rádio tocando música em alta intensidade e, comparando com medições feitas sem música como ruído de fundo, teve bons resultados. Os trechos iniciais das curvas de decaimento obtidas nas duas situações são muito parecidos, mas com o ruído de fundo artificial (música), a faixa dinâmica tende a ser bem menor.

No entanto, o experimento de Chu [21] não representa exatamente a situação real de uma sala de concerto (ou qualquer outro tipo de sala ocupada). Em um ambiente deste tipo, podem existir vários fatores que não permitam que o sistema possa ser considerado invariante com o tempo. Dispositivos de controle de “feedback” (microfonia) e a variação de temperatura são exemplos de tais fatores.

Recentemente, Bradley [26], percebendo a possível influência de pequenas variações em curvas de decaimento obtidas usando MLS, realizou medições em uma sala contendo um aquecedor de 1 KW, ligado por uma hora. As respostas foram medidas antes, depois e durante o período em que o aquecedor estava ligado. O autor afirma que, mesmo não havendo grandes mudanças na temperatura média da sala, variações locais devem ter ocorrido. Os Tempos de Reverberação medidos antes e depois do período de uma hora são similares mas, durante este período, logo depois de ligar o aquecedor, diferenças de até 0,5s foram verificadas. Também foi verificado que diferenças maiores ocorriam em frequências mais altas. Ainda foi verificado que, aumentando o número de médias feitas durante o funcionamento do aquecedor, mais os resultados tendem a se afastar do correto.

Isto significa que, na tentativa de aumentar a faixa dinâmica da curva de decaimento, aumentando o número de médias e o comprimento da seqüência, se variações ocorrerem nas condições do sistema, corre-se o risco de aumentar o erro da medição. O autor afirma que o uso de longas medições com baixos níveis de sinal pode ser impraticável em auditórios ocupados. Curvas de decaimentos ligeiramente côncavas para baixo podem indicar erros devidos à variação do sistema no tempo.

Griesinger [27] publicou um artigo recentemente, investigando outros tipos de sinais de excitação que, na sua opinião, seriam mais adequados para a medição de parâmetros acústicos de salas ocupadas. Analisando os problemas causados por variações da resposta impulsiva no tempo e afirmando que a eficiência computacional proporcionada pelo uso da Transformada de Hadamard, para o cálculo da correlação cruzada não é

mais tão importante (devido ao avanço tecnológico, quanto à capacidade de computação), o autor chega a afirmar que o uso de MLS, como sugerido por Schroeder, é muito obsoleto. A técnica sugerida por este pesquisador, como tendo um bom potencial para o uso em situações de salas ocupadas, é a "Time Delay Spectrometry".

É claro que o uso de MLS ainda apresenta uma série de problemas, principalmente quanto a seu uso em auditórios ocupados e salas que dispõem de equipamentos eletrônicos para correção do campo acústico, mas a conclusão de Griesinger parece ser um tanto precipitada. Mais experiências devem ser feitas para se chegar a uma conclusão tão categórica. De qualquer forma, o uso de MLS para medição de respostas impulsivas de outros tipos de sistemas, como alto-falantes, por exemplo, tem se consolidado ao longo dos anos como um dos métodos mais rápidos e eficientes.

CAPÍTULO 4

DETERMINAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Antes de definir o procedimento a ser adotado para as medições dos parâmetros acústicos nas salas (respostas impulsivas) foi necessário definir a configuração do sistema de medição. As respostas em frequência de algumas caixas acústicas, assim como a influência dos padrões de diretividade das fontes sobre alguns parâmetros acústicos, foram investigadas. Uma vez determinada a caixa acústica a ser usada no sistema de medição, o procedimento sugerido por Bradley [26] para otimizar a faixa dinâmica das medições foi executado. A seguir são apresentados os detalhes destas investigações.

4.1 Determinação da caixa acústica a ser usada no sistema de medição

Algumas medições preliminares foram realizadas em algumas salas do Laboratório de Vibrações e Acústica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, usando três tipos de caixas acústicas. Destas medições preliminares foi decidido investigar, com mais detalhes, os resultados obtidos com duas delas; uma caixa marca JBL, com três alto-falantes voltados para apenas uma direção, e uma caixa especial marca Brüel & Kjaer, tipo 2706, com doze alto-falantes, supostamente onidirecional.

A resposta em frequência das duas caixas foi medida. Infelizmente, por problemas técnicos afetando a câmara semi-anecóica do laboratório nesta época, não foi possível adotar o melhor procedimento para realizar estas medições. De qualquer forma, o próprio sinal MLS foi usada para este fim, não possibilitando, no entanto uma ótima resolução em frequência. As respostas medidas, para as duas caixas são apresentadas na Figura 4.1.1.

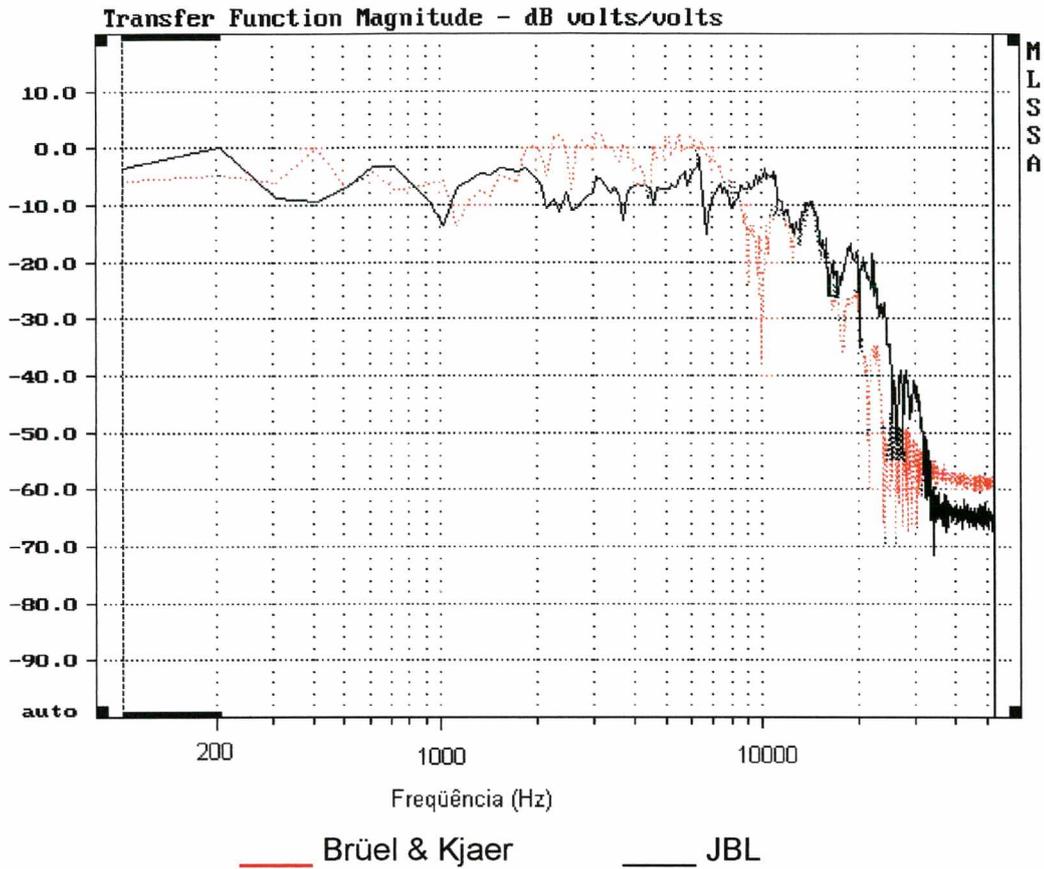


Figura 4.1.1 - Respostas em frequência para as caixas acústicas JBL e Brüel & Kjaer.

Como é possível notar, a caixa JBL tem uma resposta em frequência mais plana do que a caixa Brüel & Kjaer, especialmente próximo de 8000 Hz, e incorporar essa caixa ao sistema de medição poderia significar uma vantagem, já que o sinal poderia ser pouco equalizado. No entanto, sabe-se que o padrão de diretividade da fonte tem certa influência sobre os parâmetros medidos e existe uma norma que sugere que a fonte sonora a ser utilizada deve obedecer certos padrões de diretividade. Segundo esta norma, a fonte a ser utilizada pode ter um desvio de até 5% da omnidiretividade [23].

Conhecendo este fato, foi decidido investigar a influência da diretividade das duas caixas na medição de alguns parâmetros acústicos de uma sala, como o Tempo de Reverberação (-5: -35 dB), Decaimento inicial (EDT), Fator de Clareza ("Clarity", C_{80}), "Center Time" (TS) e Definição (D). Para este fim, dezoito medições foram feitas com cada caixa, no auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da

Universidade Federal de Santa Catarina, girando a caixa testada em 20° em torno de seu próprio eixo, com relação à posição anterior. O sinal foi reproduzido aproximadamente 10 dB acima do ruído de fundo, tomando-se dez médias em cada medição. O nível de sinal escolhido pode não ser o ideal, como será visto na próxima seção. O microfone não foi movido e as medições foram feitas todas na mesma posição.

Os resultados médios e os desvios padrão são apresentados nas Tabelas 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3, para 500 Hz, 1000 Hz e 4000 Hz, respectivamente. Para melhor comparação os desvios padrão de cada parâmetro, para cada caixa, são apresentados nas Figuras 4.1.2, 4.1.3 e 4.1.4.

Tabela 4.1.1 - Resultados médios e desvios padrão para Tempo de Reverberação (-5: -35 dB), Decaimento inicial (EDT), Fator de Clareza (“Clarity”, C₈₀), “Center Time” (TS) e Definição (D), em banda de 1/1 oitava com frequência central de 500 Hz, para cada caixa.

500 Hz

	T30	EDT	D	TS	C80
Média (B&K)	0,74	0,65	52,13	54,24	6,06
Média (JBL)	0,73	0,72	64,69	48,37	5,88
Desvio Padrão (B&K)	2,97	3,45	3,38	1,79	4,13
Desvio Padrão (JBL)	5,19	9,62	8,49	13,02	21,6

Tabela 4.1.2 - Resultados médios e desvios padrão para Tempo de Reverberação (-5: -35 dB), Decaimento inicial (EDT), Fator de Clareza ("Clarity", C_{80}), "Center Time" (TS) e Definição (D), em banda de 1/1 oitava com frequência central de 1000 Hz, para cada caixa.

1000 Hz

	T30	EDT	D	TS	C80
Média (B&K)	0,53	0,57	66,83	44,34	7,13
Média (JBL)	0,53	0,55	68,6	41,68	8,11
Desvio Padrão (B&K)	1,94	2,67	1,9	1,94	3,46
Desvio Padrão (JBL)	2,79	9,78	9,84	15,7	15,89

Tabela 4.1.3 - Resultados médios e desvios padrão para Tempo de Reverberação (-5: -35 dB), Decaimento inicial (EDT), Fator de Clareza ("Clarity", C_{80}), "Center Time" (TS) e Definição (D), em banda de 1/1 oitava com frequência central de 4000 Hz, para cada caixa.

4000 Hz

	T30	EDT	D	TS	C80
Média (B&K)	0,5	0,53	69,83	40,98	8,13
Média (JBL)	0,49	0,52	70,89	39,08	8,66
Desvio Padrão (B&K)	1,26	3,51	4,02	5,99	5,65
Desvio Padrão (JBL)	1,17	7,86	10,32	21,05	17,59

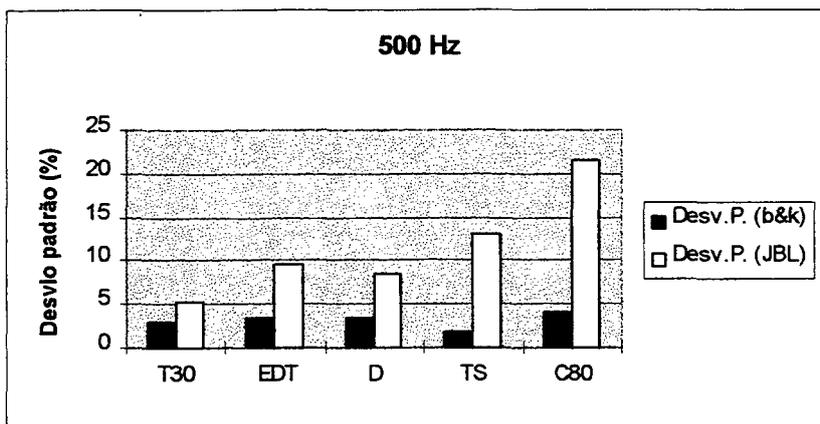


Figura 4.1.2 - Comparação entre os desvios padrão, devido à diretividade das fontes, para Tempo de Reverberação (-5: -35 dB), Decaimento inicial (EDT), Fator de Clareza (“Clarity”, C_{80}), “Center Time” (TS) e Definição (D), em banda de 1/1 oitava com frequência central de 500 Hz.

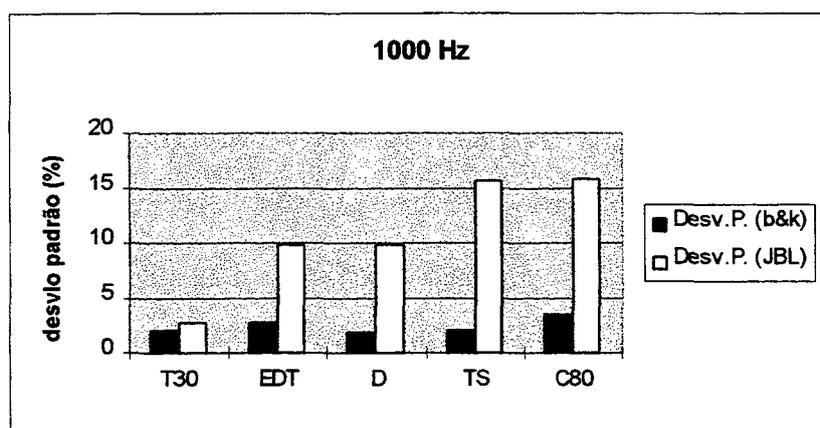


Figura 4.1.3 - Comparação entre os desvios padrão, devido à diretividade das fontes, para Tempo de Reverberação (-5: -35 dB), Decaimento inicial (EDT), Fator de Clareza (“Clarity”, C_{80}), “Center Time” (TS) e Definição (D), em banda de 1/1 oitava com frequência central de 1000 Hz.

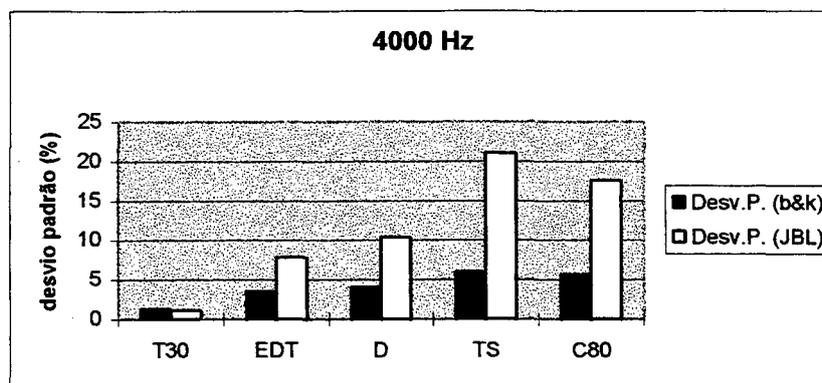


Figura 4.1.4 - Comparação entre os desvios padrão, devido à diretividade das fontes, para Tempo de Reverberação (-5: -35 dB), Decaimento inicial (EDT), Fator de Clareza ("Clarity", C_{80}), "Center Time" (TS) e Definição (D), em banda de 1/1 oitava com frequência central de 4000 Hz.

Como é possível observar, os desvios padrão verificados para a maioria dos parâmetros para a caixa JBL são maiores que 5%, ultrapassando os 20%, em certos casos. Mesmo na banda de 500 Hz, onde o padrão de diretividade poderia se aproximar mais da omnidiretividade, desvios da ordem de 20% são verificados. Para a caixa Brüel & Kjaer, no entanto, os desvios padrão dos parâmetros acústicos se mantêm dentro de uma faixa de 0 a 5% em quase todos os casos. A caixa Brüel & Kjaer é composta de duas partes; uma contendo os doze alto-falantes, formando um dodecaedro, responsável pela resposta em frequências médias e altas, e outra por uma caixa contendo um alto-falante para melhorar a resposta em frequências mais baixas. Diferenças entre os alto-falantes que compõe o dodecaedro podem ser responsáveis pelos desvios de até 6% que ocorrem na banda de 4000 Hz.

Verificando a influência do padrão de diretividade das caixas acústicas testadas, foi decidido utilizar a caixa fabricada pela Brüel & Kjaer para compor o sistema de medição a ser utilizado, mesmo com certa deficiência na resposta em frequência. Dessa forma, faz-se necessário também, o uso de um equalizador para compensar, à medida do possível, esta deficiência.

Um esquema do sistema de medição utilizado neste trabalho é apresentado na Figura 4.1.5. e a descrição detalhada de cada componente é apresentada no Apêndice 1.

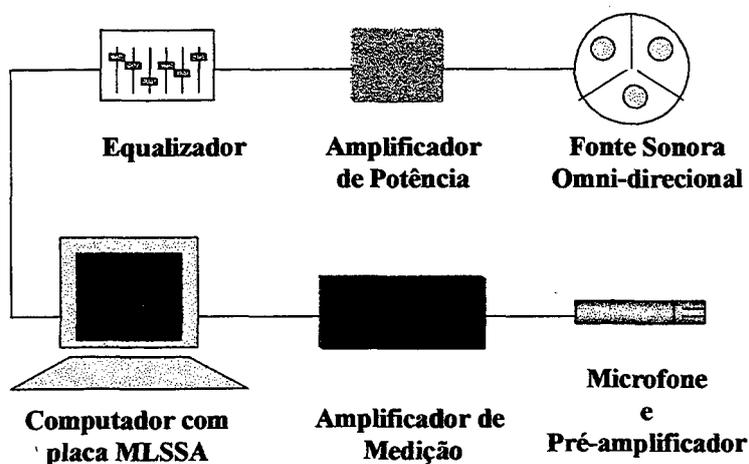


Figura 4.1.5 - Sistema de medição utilizado.

A resposta impulsiva medida é correspondente à resposta da sala, adicionada à resposta do alto-falante, do equalizador, do amplificador de potência e do filtro interno da placa que gera o sinal. Quanto menor a influência de cada um destes componentes, mais a resposta impulsiva medida se aproximará da resposta real da sala. O uso do equalizador, do amplificador de potência e do alto-falante deve ser feito de forma cautelosa, de forma a não introduzir distorções em excesso no alto-falante e, conseqüentemente, nas medições. Como dito anteriormente, essas distorções podem diminuir a faixa dinâmica das medições, prejudicando uma das principais vantagens de se usar Maximum Length Sequences. Na próxima seção, um procedimento de otimização da faixa dinâmica realizado para este sistema será descrito.

4.2 Otimização da faixa dinâmica do sistema de medição

Como visto anteriormente, na seção 3.5, uma seqüência de comprimento pequeno, um número de médias inadequadas ou distorções excessivamente altas no alto-falante, podem prejudicar a faixa dinâmica das medições. O comprimento da

seqüência deve ser suficiente para que, quando reproduzida com uma certa freqüência de leitura, ela dure, no mínimo, uma certa porcentagem do Tempo de Reverberação da sala. Dessa forma, avaliando preliminarmente o Tempo de Reverberação da sala, foi escolhida uma seqüência de comprimento adequado para executar o procedimento sugerido por Bradley [26] para traçar curvas que permitam usar o sistema da melhor forma possível, quanto à faixa dinâmica, dependendo do ruído de fundo da sala. O procedimento utilizado é descrito a seguir:

- (1) Foi usado o maior comprimento da seqüência possível (65535 pontos, correspondentes a uma seqüência de ordem 16).
- (2) Foi determinado o limite de distorção do sistema de medição em ambiente silencioso (traçada a curva faixa dinâmica x nível RMS do sinal). Para cada nível de sinal foi verificada a faixa dinâmica da medição.
- (3) Foi avaliado o ruído de fundo da sala.
- (4) Um ruído branco reproduzido por um um alto-falante ligado a um gerador de ruído foi utilizado para simular o ruído de fundo.
- (5) O passo (2) foi repetido para três níveis de ruído sintetizados (56 dB, 62 dB e 71 dB).

O equipamento foi montado em uma sala, conforme o esquema mostrado na Figura 4.2.1.

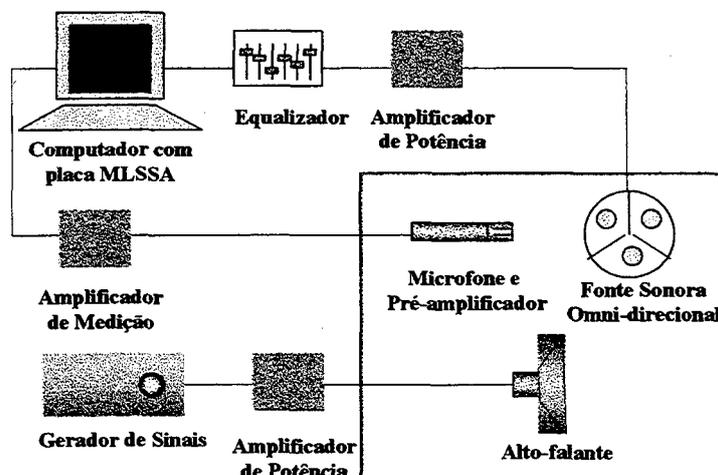


Figura 4.2.1 - Equipamentos utilizados para verificar a influência do nível de sinal na faixa dinâmica das medições realizadas com MLS.

O equalizador foi ajustado com ganho de 3 dB nas bandas de 1/3 de oitava com frequências centrais de 500, 1000 e 8000 Hz. Um ganho de 8 dB foi ajustado para a banda de frequência central de 125 Hz. Estes ganhos se justificam por deficiências na resposta dos alto-falantes utilizados nestas frequências.

A Tabela 4.2.1 apresenta a faixa dinâmica média, em dB, medida das curvas de decaimento, para as bandas de frequência centrais de 500, 1000, 2000 e 4000 Hz, em função do nível do sinal aplicado ao alto-falante, para diferentes níveis de ruído de fundo. O nível de referência do sinal aplicado ao alto-falante (0 dB) é de 25 V. A Figura 4.2.2 representa o gráfico correspondente aos dados da Tabela 4.2.1.

Tabela 4.2.1 - Faixa dinâmica média, em dB, medida das curvas de decaimento, em função do nível do sinal aplicado ao alto-falante, para diferentes níveis de ruído de fundo. Nível de referência do sinal aplicado ao alto-falante (0 dB): 25 V (RMS).

Sinal de saída (dBv)	Faixa dinâmica (dB)			
	natural (38 dB)	56 dB	62 dB	71 dB
-30,4	51,93	23,33	18,53	10,40
-25,8	54,53	28,48	24,10	14,03
-19,7	54,33	36,05	26,33	23,13
-14,7	53,73	39,76	34,48	27,95
-10,4	52,48	42,55	41,80	27,98
-5,11	48,30	47,95	42,20	38,35
0,1	32,70	31,00	33,08	35,28

Como pode ser observado, no ambiente silencioso a faixa dinâmica tende a crescer com a diminuição do nível do sinal de saída e, para diferentes níveis de ruído de fundo sintetizado, existe um nível de sinal de saída ótimo, com relação à faixa dinâmica das curvas de decaimento. A tendência deste ponto ótimo é se deslocar para a direita (maior nível de sinal) à medida que o ruído de fundo é aumentado. Com base nessas curvas, para realizar medições em uma sala, deve-se, em primeiro lugar, medir o ruído de fundo e, consultando a Figura 4.2.2, determinar o nível RMS do sinal a ser utilizado.

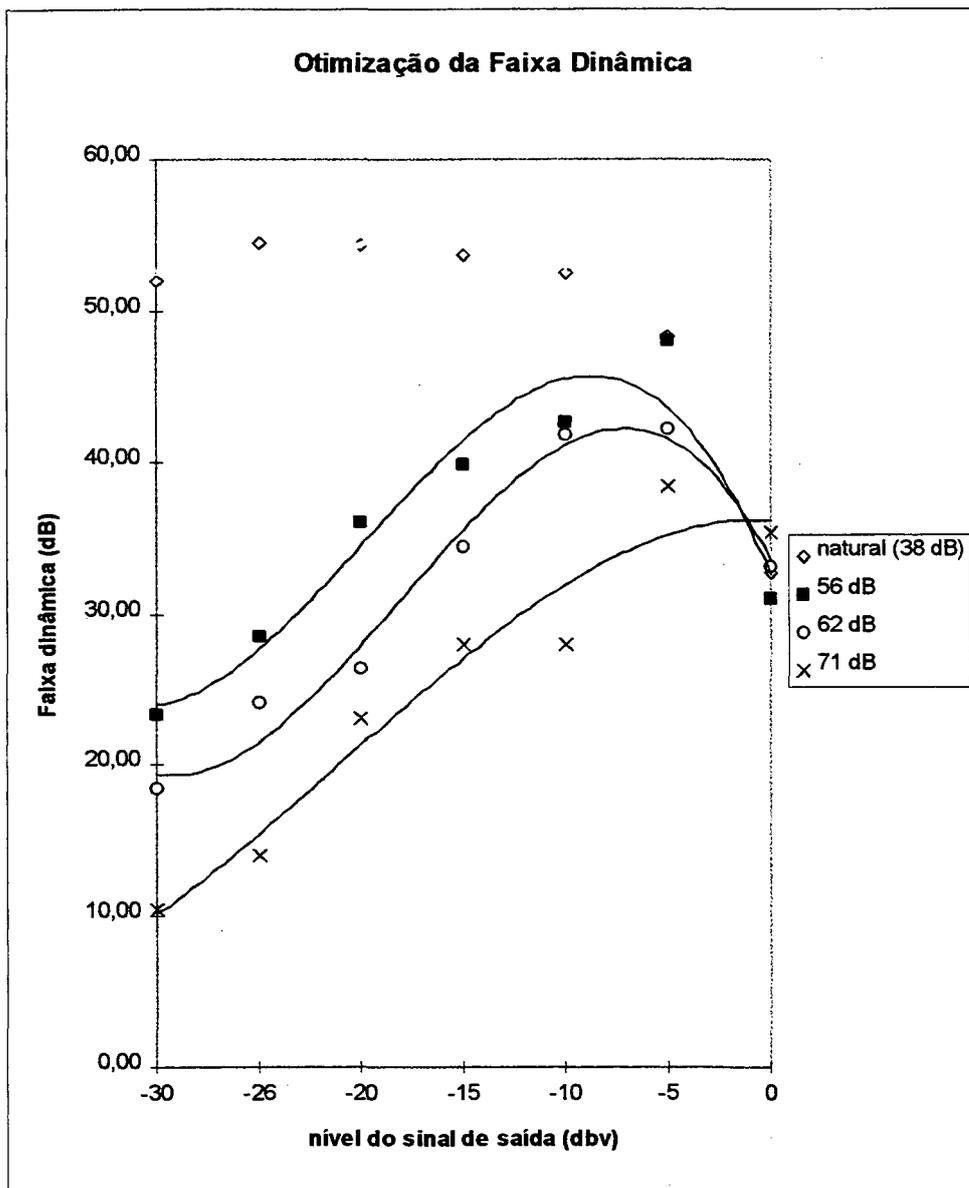


Figura 4.2.2 - Faixa dinâmica média, em dB, medida das curvas de decaimento, em função do nível do sinal aplicado ao alto-falante, para diferentes níveis de ruído de fundo. Nível de referência do sinal aplicado ao alto-falante (0 dB): 25 V (RMS).

4.3 Comparação de Tempo de Reverberação, medido com o sistema MLS e outro tipo de sistema

Apesar de todo o respaldo científico da técnica MLS, obtido através dos anos, por vários cientistas, foi decidido comparar medições do tempo de reverberação da câmara reverberante do Laboratório de Vibrações e Acústica, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, realizadas com um sistema fabricado pela Brüel & Kjaer, tradicionalmente usado neste Laboratório, e aquelas realizadas com o sistema MLS. O sistema de “referência” é composto pelos seguintes equipamentos:

- Analisador Digital de Sinais da B&K tipo 2144
- Microfone Capacitivo de 1/2" da B&K tipo 4166
- Pré-amplificador para microfone da B&K tipo 2645
- Fonte Sonora Padrão da B&K tipo HP1001
- Fonte de Potência Sonora da B&K tipo 4205

O sistema MLS utilizado é descrito na Seção 4.1 e no Apêndice 1. As medições foram realizadas com o objetivo de determinar os coeficientes de absorção de um certo material. Com ambos sistemas os Tempos de Reverberação foram medidos para duas posições da fonte sonora, posicionando o microfone em três posições diferentes, para cada posição da fonte (total de 6 posições). Em cada posição os resultados obtidos foram médias de duas medições.

Os coeficientes de absorção obtidos são apresentados na Tabela 4.3.1, assim como a diferença percentual correspondente. Os dados apresentados na Tabela 4.3.1 são representados graficamente na Figura 4.3.1.

Tabela 4.3.1 - Coeficientes de absorção medidos com o sistema MLS e B&K.

F (Hz)	alfa B&K	alfa MLS	Diferença (%)
100	0,1	0,08	13,40
125	0,04	0,04	4,79
160	0,18	0,12	34,93
200	0,29	0,30	3,71
250	0,40	0,49	20,82
315	0,71	0,60	15,99
400	0,92	0,80	12,04
500	0,92	0,88	3,68
630	0,88	0,88	0,23
800	0,83	0,75	9,72
1000	0,80	0,76	4,13
1250	0,78	0,77	0,49
1600	0,76	0,78	3,57
2000	0,78	0,78	0,03
2500	0,75	0,71	5,32
3150	0,74	0,71	4,04
4000	0,76	0,73	3,93
5000	0,77	0,76	2,28

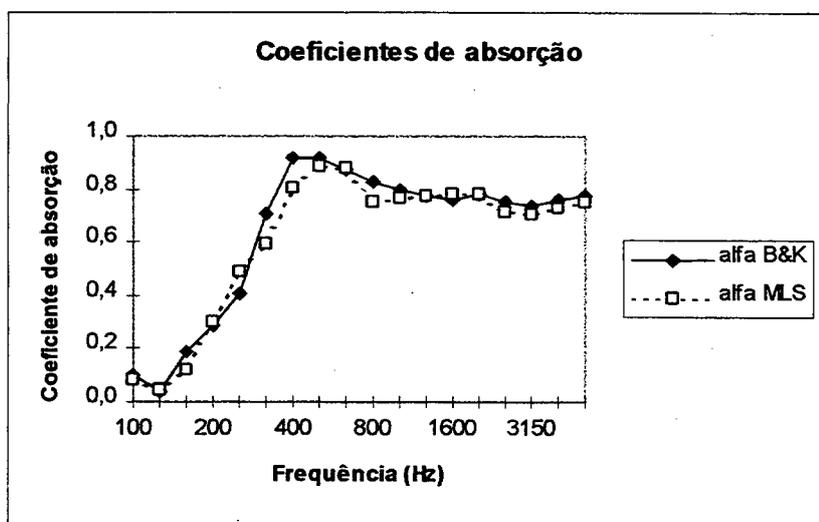


Figura 4.3.1 - Coeficientes de absorção medidos com o sistema MLS e B&K.

Os Tempos de Reverberação obtidos com os dois sistemas de medição são apresentados abaixo, para a câmara sem e com as amostras do material, respectivamente, as Figuras 4.3.1 e 4.3.2.

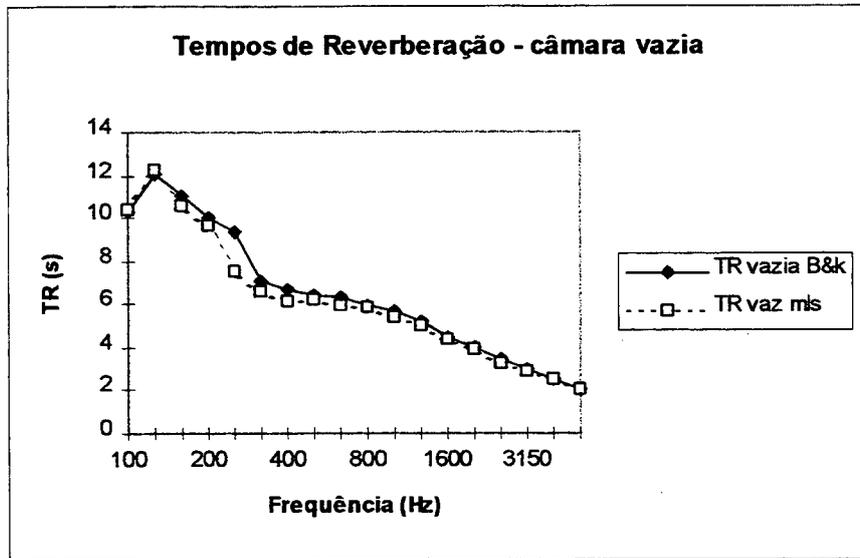


Figura 4.3.1 - Tempos de Reverberação da câmara reverberante vazia.

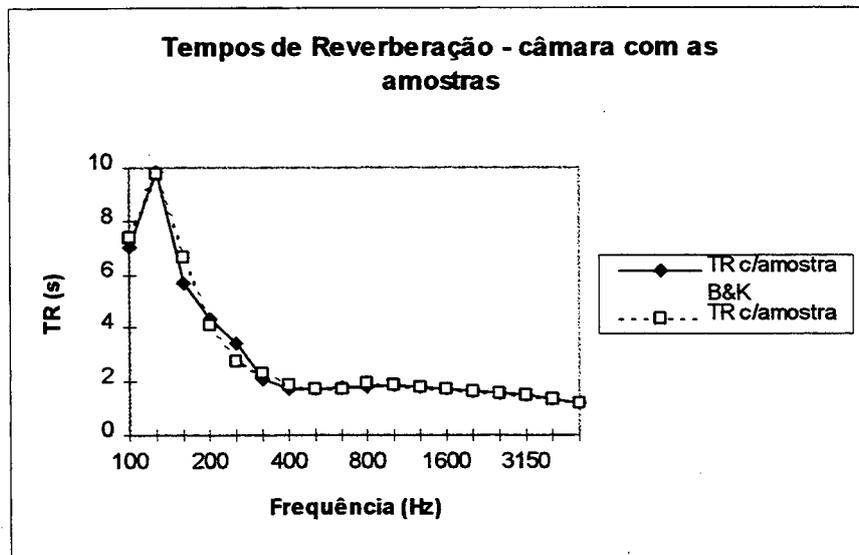


Figura 4.3.2 - Tempos de Reverberação da câmara reverberante com as amostras de material.

Apesar das diferenças nas medições, mais evidentes no coeficiente de absorção, o sistema de medição MLSSA demonstrou-se confiável. As diferenças verificadas podem ser atribuídas às condições das amostras, já que os ensaios foram realizados em dias diferentes, e talvez por algum efeito do ruído de fundo sobre as medições. O sinal MLS é usado justamente para que o ruído de fundo tenha a mínima influência sobre os resultados, isto é, uma alta relação sinal/ruído. No entanto, para que as medições fossem comparáveis, apenas duas médias foram feitas para cada posição da fonte e do microfone. Um número maior de médias poderia ser realizado facilmente. A faixa da curva de decaimento utilizada para determinar o tempo de reverberação, para os dois sistemas, foi limitada pela direita, a partir de uma atenuação de 5 dB no nível do sinal medido, prosseguindo até que esta atenuação seja de 35 dB ($T_{30, -5} : -35$ dB). Em certos casos, o sistema MLS permite que faixas dinâmicas de até 50 dB sejam utilizadas.

Adicionalmente, deve-se chamar a atenção para o seguinte fato: a curva obtida com a integração da resposta impulsiva corresponde à curva de decaimento se a medição for livre de ruídos e se a integração for feita sobre um intervalo de tempo infinito (como provado por Schroeder). Como nenhuma dessas condições é obtida na prática, uma correção deve ser feita na curva de decaimento obtida. O programa utilizado (MLSSA) possui essas correções incorporadas, e a diferença entre as curvas corrigida e não corrigida pode ser observada na Figura 4.3.4.

A partir da curva corrigida é possível determinar o Tempo de Reverberação usando uma faixa dinâmica maior. No exemplo apresentado na Figura 4.3.4, a curva não corrigida permitiria que o Tempo de Reverberação fosse determinado usando a faixa que vai de -5 dB até -25 dB. A curva corrigida permite que este seja determinado usando a faixa de -5 dB a -35 dB.

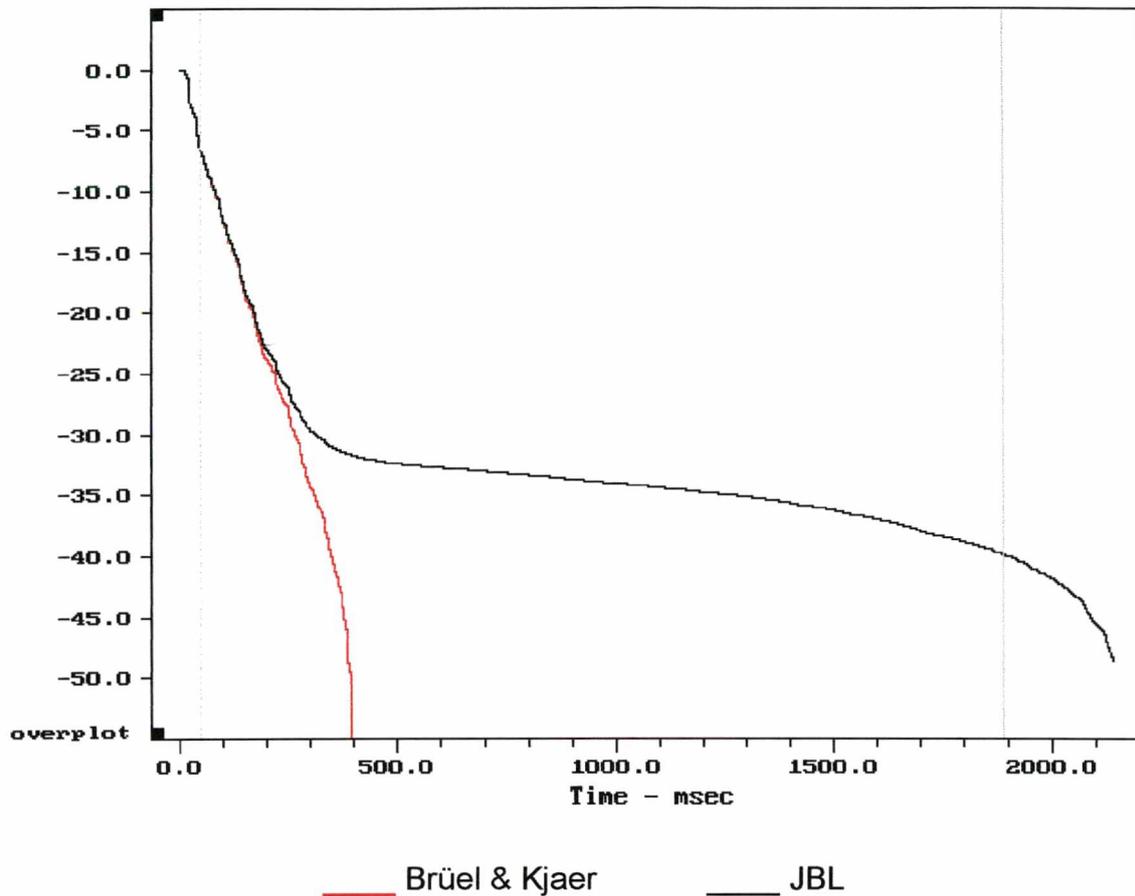


Figura 4.3.4 - Comparação entre a curva de decaimento, medida em um determinado ponto do Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, em 1000 Hz (banda de 1/1 de oitava), corrigida (vermelha) e não corrigida (preta).

4.4 Procedimento experimental adotado para a medição das salas

Feita a escolha do sistema de medição, foi definido o procedimento a ser adotado para as medições das salas estudadas neste trabalho. Alguns passos são numerados abaixo:

- 1 - Verificação do ruído de fundo no local e ajuste do nível de sinal a ser utilizado, de acordo com o Figura 4.2.2.;
- 2 - Seleção do maior comprimento de seqüência possível;

3 - Realização de medições preliminares, verificando o Tempo de Reverberação em cada banda de frequência, com o objetivo de ajustar a frequência de leitura da MLS ("Maximum Length Sequence") e, conseqüentemente, a duração da seqüência, de forma a evitar o fenômeno conhecido por "Time Aliasing" (ver Seção 3.4);

4 - Escolha do número de médias a serem realizadas;

5 - Escolha das posições da fonte e do microfone onde devem ser realizadas as medições.

Quando se deseja avaliar a qualidade acústica de uma sala de concerto a norma ISO 3382 recomenda que a fonte seja posicionada em três pontos no palco e, para cada uma dessas posições, medições sejam realizadas com o microfone em no mínimo dez e no máximo vinte posições diferentes sobre a região ocupada pelo público. No auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, oito medições foram realizadas, sendo quatro para cada posição da fonte. No Teatro do Centro Integrado de Cultura as recomendações da norma ISO 3382 foram seguidas e medições foram realizadas com a fonte em três posições diferentes. De qualquer forma, como será visto adiante, os resultados de apenas algumas destas medições foram aproveitadas para comparar com os resultados das simulações realizadas.

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÕES:

DESCRIÇÃO DAS SALAS UTILIZADAS NESTE ESTUDO E TESTES DE CONVERGÊNCIA DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS SIMULADOS PARA AS SALAS

O programa utilizado para realizar simulações neste trabalho foi o RAYNOISE, desenvolvido pela Numerical Integration Technologies N.V. e possui o método dos feixes de raios cônicos e triangulares incorporados. É recomendado o uso de feixes de raios cônicos para ambientes fechados [31]. O critério de abandono de raios é definido pelo próprio usuário, que define o número de reflexões (R) a ser utilizado, assim como o número de raios (N) que, como dito anteriormente (seção 2.3), quanto maior, menor a chance de ocorrerem fenômenos como o estreitamento de raios. O tempo de computação necessário cresce com o aumento de R ou N e, dessa forma, deve-se chegar a uma relação de compromisso na escolha destes dois parâmetros. Uma forma de determinar estes parâmetros é realizar testes de convergência, a serem descritos com detalhes na seção 5.2.

Além da ordem de reflexão (R) e do número de raios (N), outros parâmetros de entrada devem ser definidos pelo usuário, como a temperatura e umidade relativa no ambiente, e os coeficientes de absorção das superfícies internas da sala. As condições do ambiente são simples de se determinar e os coeficientes de absorção para cada tipo de material devem se encontrar dentro de uma determinada faixa. Os valores exatos para os coeficientes de absorção, no entanto, não são conhecidos, em geral. Em primeiro lugar, pela dificuldade de se relacionar o material com a descrição existente na literatura. Por exemplo, um carpete pode ser mais grosso ou mais fino, dependendo do fabricante ou do modelo e na literatura é provável que se encontre dados para carpete, sem

especificação da espessura ou textura, ou ainda especificando se ele é colado sobre cimento, madeira ou outro material. Ainda, dependendo de como um certo material está posicionado na sala, ele pode se comportar de maneira diferente quanto à absorção. Dessa forma, a escolha destes coeficientes requer um certo cuidado.

Na próxima seção as salas utilizadas para este estudo serão descritas, assim como as simplificações adotadas para a construção do modelo geométrico no computador.

5.1 Descrição das salas utilizadas neste estudo

Para a realização do exercício de medição e determinação de parâmetros acústicos através de um algoritmo computacional, duas salas foram utilizadas como objeto de estudo; uma, o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e outra, o teatro do Centro Integrado de Cultura (CIC), localizado na cidade de Florianópolis, Santa Catarina. Esta última, apesar de denominada como um “teatro”, é muito mais utilizada para a realização de eventos musicais, tanto acústicos como com auxílio de sistemas eletro-acústicos e de áudio.

Como dito anteriormente, a intenção deste trabalho não é avaliar a qualidade acústica das salas, mas investigar o uso das ferramentas envolvidas neste processo. Se fosse o caso, a qualidade acústica do Auditório da Engenharia deveria ser avaliada com base em parâmetros diferentes daqueles envolvidos na avaliação da qualidade acústica do Teatro do CIC, visto que os dois ambientes são usados com finalidades diferentes. Mesmo assim, neste trabalho, os parâmetros acústicos investigados são os mesmos. A intenção é realizar o mesmo procedimento, primeiro para uma sala menor e mais simples de ser modelada, e depois para uma sala maior, onde a construção do modelo é mais trabalhosa (assim como a realização das medições).

O Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica se aproxima de uma sala “retangular”, de dimensões principais 5,95 x 12 x 2,70 m (90 assentos), com

pisos e parte das paredes de lajota, e teto e paredes de concreto. Duas janelas grandes na frente e no fundo da sala ficam, em geral, cobertas por cortinas e protegidas por uma grade voltada para o lado interno da sala. O modelo desta sala, construído através do próprio RAYNOISE, é apresentado na Figura 5.1.1.

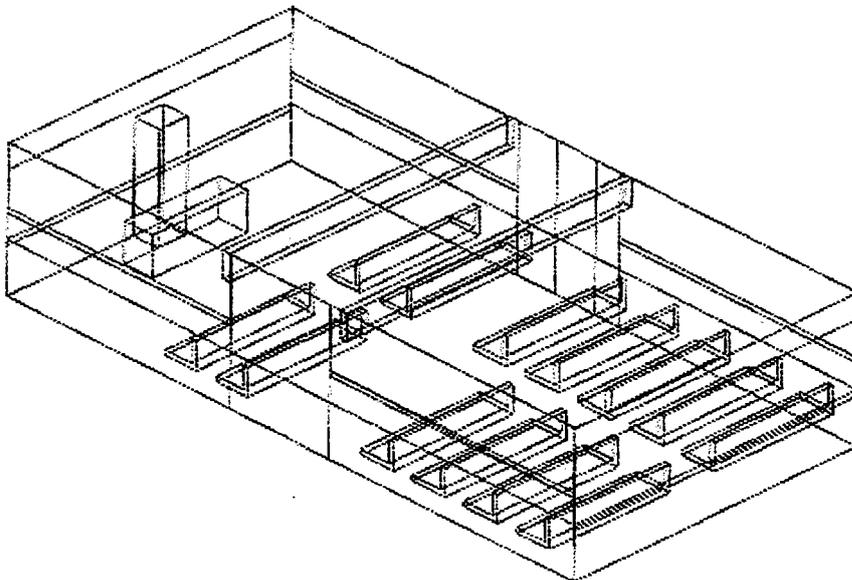


Figura 5.1.1 - Modelo construído através do RAYNOISE, representando o Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

Como pode ser visto, detalhes como a grade sobre as janelas da frente e do fundo da sala não foram desenhados. O efeito desta superfície irregular pode, no entanto, ser simulado atribuindo um certo coeficiente de difusão ao elemento que a representa. A estante e a mesa existentes neste ambiente foram representadas como volumes fechados de madeira. As simplificações mais significativas são relativas à área ocupada pelas poltronas, visto que desenhá-las com detalhes seria muito trabalhoso. As “pernas” das poltronas não foram desenhadas e, na realidade, talvez elas contribuam, em pequena escala, para acrescentar algum efeito de difusão na sala.

A cada elemento do modelo foi atribuído um tipo de material e uma tabela que relaciona o elemento com o tipo de material é apresentada no Apêndice 3.

O Teatro do CIC, com 952 assentos, pode ser descrito como as salas conhecidas como “fan shape”, quanto à sua geometria (ou em forma de leque). Vários detalhes desta sala dificultam a construção de um modelo completamente fiel à realidade. Por exemplo, superfícies curvas não são aceitas nos programas baseados na teoria de raios acústicos. Portanto, superfícies deste tipo devem ser aproximadas através de vários planos. No entanto, no Teatro do CIC, uma certa área das paredes laterais é preenchida com vários cilindros de alumínio, dispostos de forma aparentemente aleatória. Desenhar estes cilindros um a um, aproximados por planos, é uma tarefa praticamente impossível. Foi decidido, neste caso, abrir mão do mesmo recurso utilizado para simular o efeito das grades sobre as janelas do auditório do Departamento de Engenharia Mecânica. O teto do Teatro do CIC é inteiramente revestido por painéis curvos, provavelmente com a mesma finalidade dos cilindros nas paredes laterais, ou seja, distribuir melhor a energia sonora, tornando o campo acústico mais difuso. Como não se teve acesso aos desenhos originais do Teatro, representando os painéis, foi necessário medir a altura de cada fileira de painéis, aproximadamente no ponto mais baixo destes. O desenho foi feito substituindo a metade anterior de um painel, mais a metade posterior do painel seguinte por um plano. Isto é, a curvatura dos painéis não foi representada. Uma certa difusão também pode ser atribuída aos elementos que representam os painéis durante as simulações. O desenho do Teatro do CIC, também construído no RAYNOISE, é apresentado na Figura 5.1.2. A fotografia do interior do Teatro é apresentada na Figura 5.1.3.

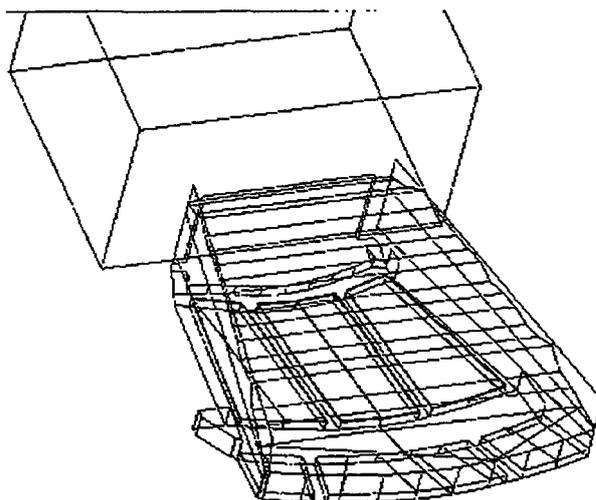


Figura 5.1.2 - Modelo construído através do RAYNOISE, representando o Teatro do CIC.

Quanto às poltronas, é comum, em salas de concerto, representá-las através de volumes uniformes sobre a área por elas ocupadas [1]. Como o volume destas salas, assim como o do Teatro, é grande, comparado ao volume ocupado pelas cadeiras, espera-se que os detalhes tenham pouca influência sobre o resultado final. A caixa de palco também possui inúmeros detalhes que dificultam a construção do modelo.

Da mesma forma que o Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica, os elementos do modelo do Teatro do CIC, e os materiais atribuídos a cada um deles são relacionados no Apêndice 3.

Os conjuntos de coeficientes de absorção adotados para as simulações são apresentados no Apêndice 2.



Figura 5.1.3 - Fotografia do interior do Teatro do CIC.

5.2 Verificação da convergência dos parâmetros acústicos calculados, em função da escolha dos parâmetros de entrada (N e R)

Quando o método dos feixes cônicos de raios é utilizado, erros devido ao “estreitamento de cone” sempre devem ocorrer e para evitar que este erro tenha influência excessiva no resultado final um número de raios suficientemente alto deve ser escolhido. Dependendo do coeficiente de absorção médio da sala, a energia residual da resposta impulsiva pode ser maior ou menor, assim como o número de reflexões que um raio sofre. Dessa forma, o número de reflexões também precisa ser suficientemente alto [29].

Para verificar a ordem de reflexão (R) e o número de raios adequados (N), necessários para a determinação dos parâmetros acústicos de duas salas, através do programa de raios acústicos RAYNOISE, foram feitas várias simulações, primeiro mantendo N fixo e variando R, e depois o inverso. O comportamento de três parâmetros acústicos, para uma determinada posição da fonte e do microfone, foi observado (EDT, Definição e Fator de Clareza) e os resultados destes testes são apresentados nas Figuras 5.2.1 até 5.2.6.

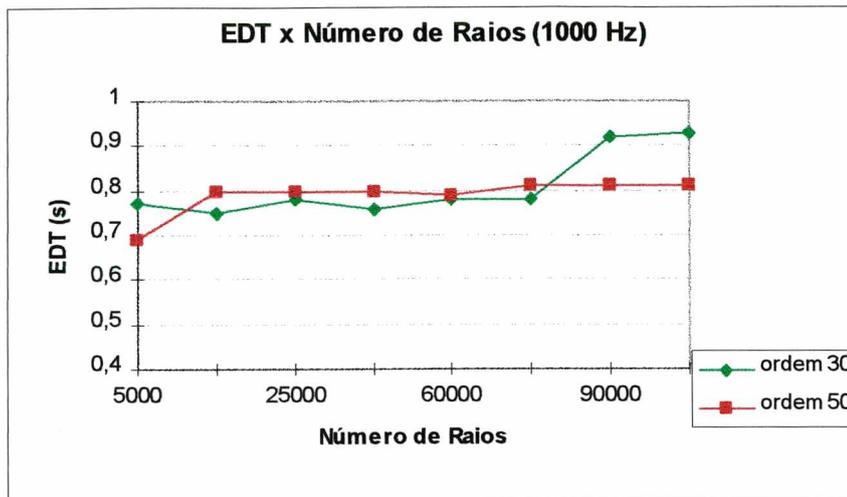


Figura 5.2.1a) - Variação dos resultados de EDT, em função do número de raios, para o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica.

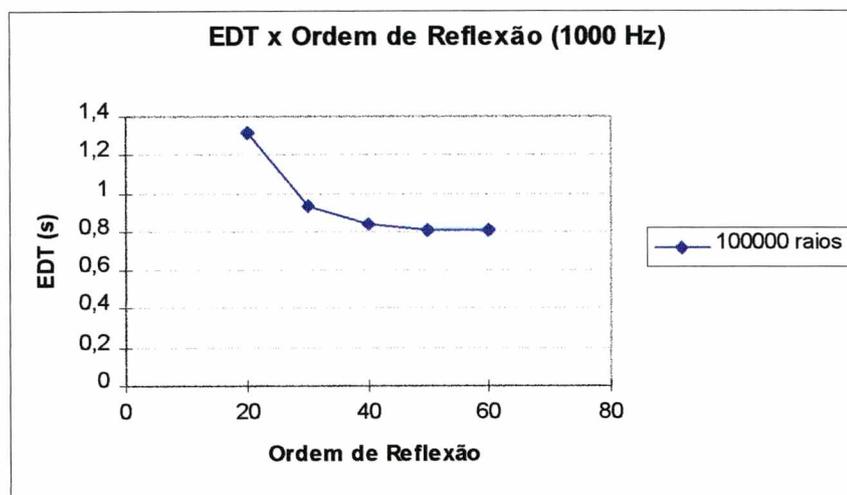


Figura 5.2.1b) - Variação dos resultados de EDT, em função da ordem de reflexão, para o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica.

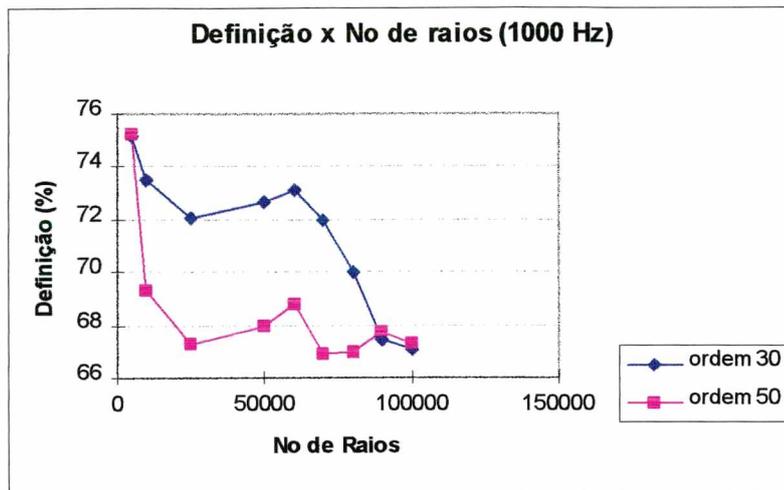


Figura 5.2.2a) - Variação dos resultados de Definição, em função do número de raios, para o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica.

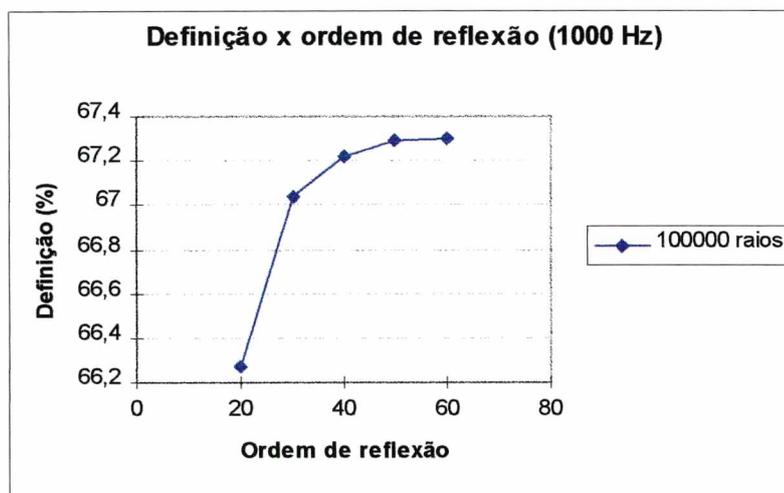


Figura 5.2.2b) - Variação dos resultados de Definição, em função da ordem de reflexão, para o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica.

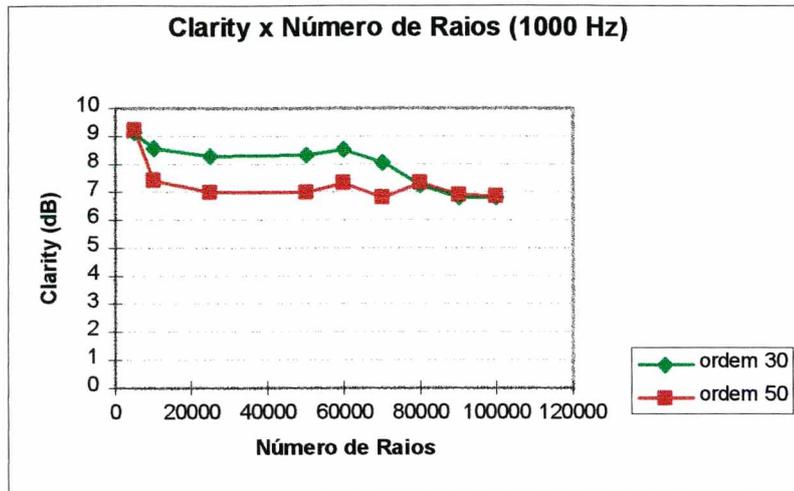


Figura 5.2.3a) - Variação dos resultados de Fator de Clareza (“Clarity”), em função do número de raios, para o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica.

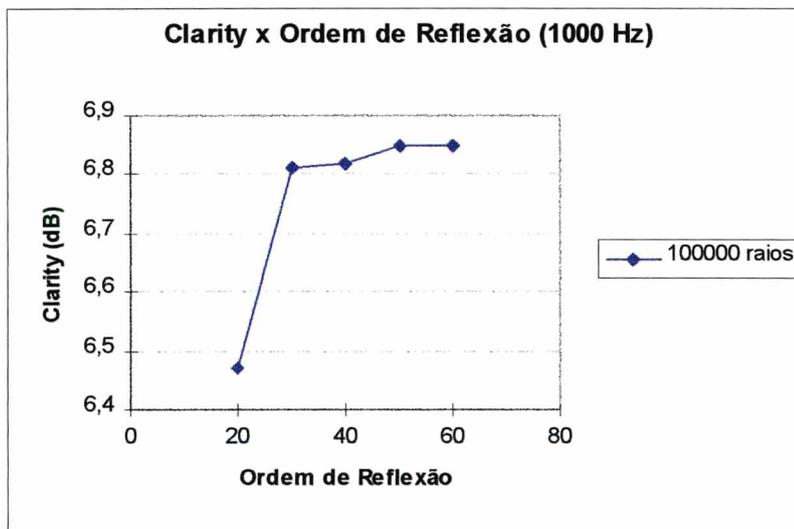


Figura 5.2.3b) - Variação dos resultados de Fator de Clareza (“Clarity”), em função da ordem de reflexão, para o auditório do Departamento de Engenharia Mecânica.

Observando as Figuras 5.2.1b), 5.2.2b) e 5.2.3b), é possível concluir que, para o auditório, um número de reflexões igual ou maior a 50 é suficiente para garantir que os resultados para EDT, Definição e Clarity (Fator de Clareza) calculados tendam sempre para aproximadamente o mesmo valor. Das figuras 5.2.2a) e 5.2.3a), nota-se que os valores calculados para Definição e Fator de Clareza, em função do número de raios, tendem a oscilar dentro de uma certa faixa. A diferença verificada entre o parâmetro definição, calculado com 60000 raios e com 100000 raios na banda de frequência central 1000 Hz, é de 1,5%, enquanto, para clarity, esta diferença é da ordem de 0,5 dB. Para EDT, esta diferença é de 0,02 s (2,4% de diferença, comparado com o resultado obtido com 100000 raios). A diferença verificada para o parâmetro Fator de Clareza (Clarity) não é plenamente satisfatória, já que, segundo certos pesquisadores, 0,5 dB são suficientes para que uma pessoa perceba uma diferença com relação à qualidade do campo acústico [15]. Mesmo assim, como os resultados para os outros parâmetros não convergiram exatamente para o mesmo valor, foi adotado que, para os cálculos dos parâmetros acústicos desta sala uma ordem de reflexão igual a 50 e um número de raios igual a 60000 são suficientes para que os resultados se apresentem dentro de um certo limite de erro.

Para o modelo representando o Teatro do CIC, testes de convergência foram feitos para o número de raios variando de 5000 a 80000 raios e ordem de reflexão de 10 a 70 reflexões. Observando as figuras 5.2.4a), 5.2.5a) e 5.2.6a), pode-se dizer que 40000 raios são suficientes para que os três parâmetros observados variem dentro de um faixa considerada aceitável. Novamente, é possível identificar uma certa oscilação no parâmetro Fator de Clareza (Clarity), à medida que o número de raios é aumentado e a “amplitude” desta oscilação tende a diminuir. Observando as figuras 5.2.4b), 5.2.5b) e 5.2.6b), pode-se dizer que 30 reflexões são suficientes para garantir que os resultados das simulações se encontrem dentro de certos limites.

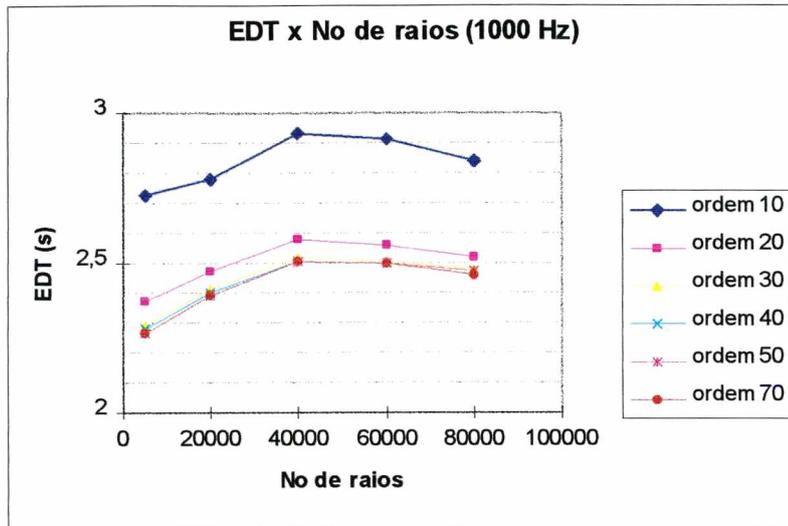


Figura 5.2.4a) - Variação dos resultados de EDT, em função do número de raios, para o Teatro do CIC.

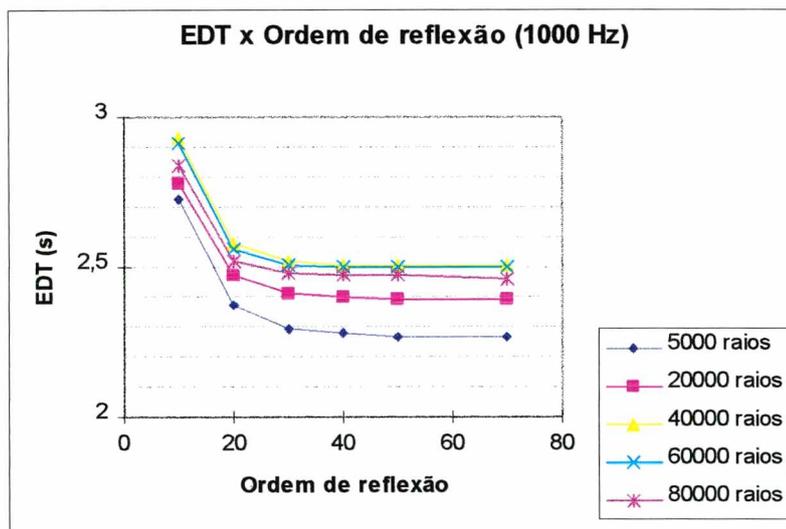


Figura 5.2.4b) - Variação dos resultados de EDT, em função da ordem de reflexão, para o Teatro do CIC.

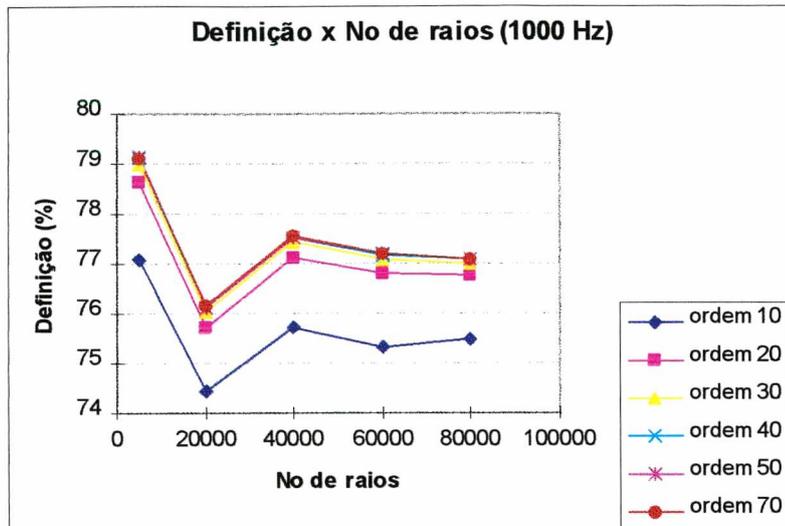


Figura 5.2.5a) - Variação dos resultados de Definição, em função do número de raios, para o Teatro do CIC.

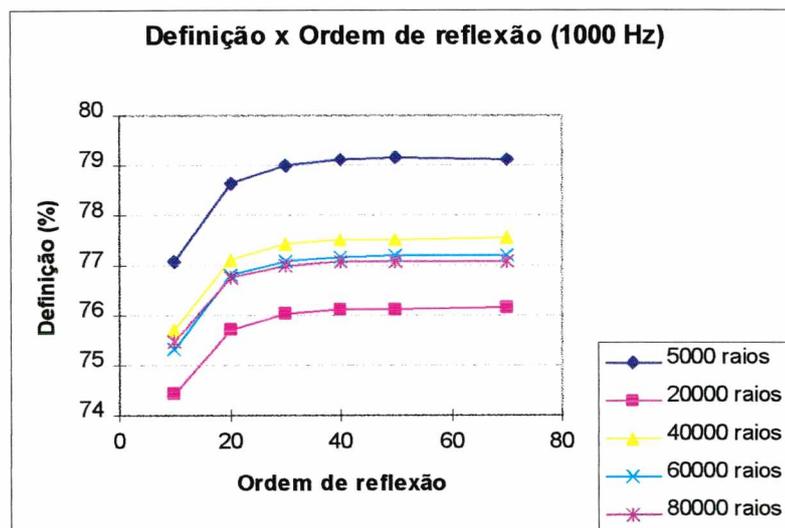


Figura 5.2.5b) - Variação dos resultados de Definição, em função da ordem de reflexão, para o Teatro do CIC.

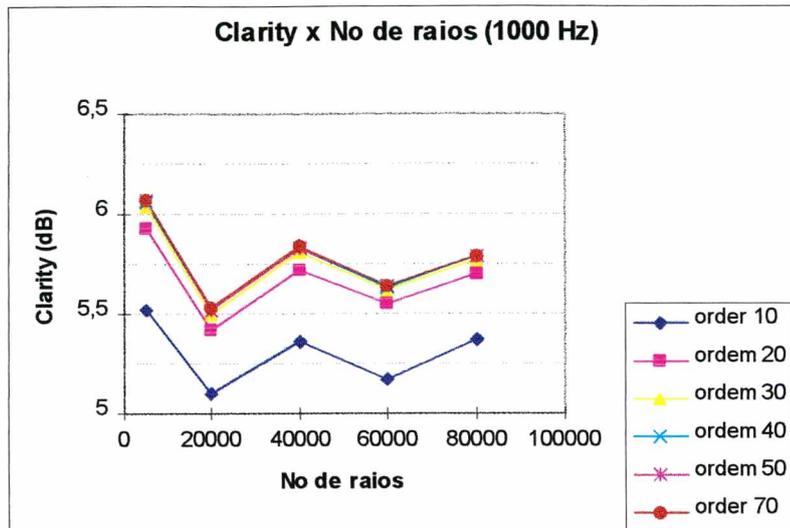


Figura 5.2.6a) - Variação dos resultados de Fator de Clareza (“Clarity”), em função do número de raios, para o Teatro do CIC.

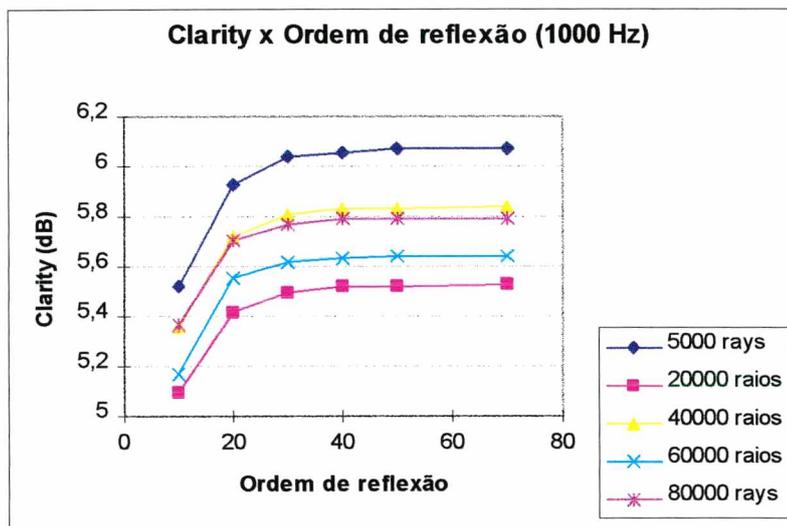


Figura 5.2.6b) - Variação dos resultados de Fator de Clareza (“Clarity”), em função da ordem de reflexão, para o Teatro do CIC.

CAPÍTULO 6

COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS SIMULADOS E MEDIDOS

Depois de verificados os números de raios e a ordem de reflexão suficientemente altos para garantir a convergência dos resultados para cada uma das salas (seção 5.2), algumas simulações foram feitas variando-se os valores dos coeficientes de absorção e considerando ou não reflexões difusas. Os resultados das simulações são comparados com os medidos nos dois ambientes para as frequências centrais das bandas de 1/1 oitava. Posteriormente as diferenças entre os resultados medidos e calculados, para a frequência de 1000 Hz, para várias posições do microfone são analisadas.

A seguir estes resultados são apresentados para o Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, assim como para o Teatro do CIC.

Por conveniência é apresentada aqui uma tabela organizada por Vorlaender [15], a partir dos dados de um outro trabalho, com os limites acima dos quais alguns parâmetros acústicos devem variar para que uma pessoa possa perceber a diferença. Ainda nesta tabela são apresentados os limites de tolerância, adotados por Vorlaender [15], para que os resultados das simulações por programas de raios acústicos sejam considerados aceitáveis.

Tabela 6.1 - Variação necessária de alguns parâmetros acústicos, para que uma pessoa perceba a diferença e limites de tolerância (adotados em [15]) para que os resultados das simulações sejam aceitáveis.

Parâmetro	Limite de percepção subjetiva	Limites de tolerância
Decaimento Inicial (EDT) [s]	5%	10%
Definição [%]	5%	10%
Clarity [dB]	0,5 dB	1 dB
Tempo de Reverberação [s]	5%	10%
“Source Strength” (G) [s]	1 dB	2 dB
Fração Lateral (LF) [%]	5%	10%

6.1 Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica

As posições da fonte e do microfone onde foram realizadas as medições das respostas impulsivas são apresentadas na figura 6.1.1. As posições dos microfones são indicadas pelos números 1, 2, 3 e 4.

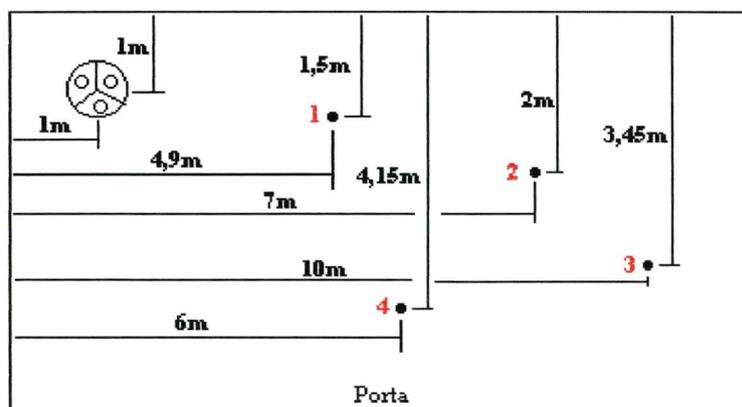


Figura 6.1.1 - Posições da fonte e do microfone onde foram feitas as medições das respostas impulsivas (auditório do Depto. de Engenharia Mecânica).

Os coeficientes de absorção das superfícies internas da sala foram adotados, basicamente, da literatura e seus valores e fontes bibliográficas de referência são apresentados no apêndice 2. Simulações foram feitas considerando apenas reflexões especulares e, posteriormente, atribuindo certos valores de difusão aos elementos do modelo correspondentes às janelas da frente e do fundo da sala. O coeficiente de difusão adotado para estas superfícies foi de 0,5, em todas as bandas de frequência. O mesmo coeficiente de absorção foi adotado para todas as superfícies das poltronas, embora, na realidade, algumas destas superfícies tenham coeficientes diferentes das outras.

Como as relações sinal-ruído das medições se apresentaram abaixo de 10 dB para as bandas de frequências centrais 125 e 250 Hz (na maior parte das medições), as comparações são feitas levando-se em conta as bandas de frequências centrais acima de 500 Hz. Nas figuras a seguir são apresentados os resultados das medições e simulações para o ponto 4, considerando e não considerando reflexões difusas, para os parâmetros: EDT, Definição e Fator de Clareza. Os limites representados nas figuras indicam as diferenças máximas permitidas entre simulações e medições para que os resultados sejam considerados “aceitáveis” (de acordo com a referência [15]).

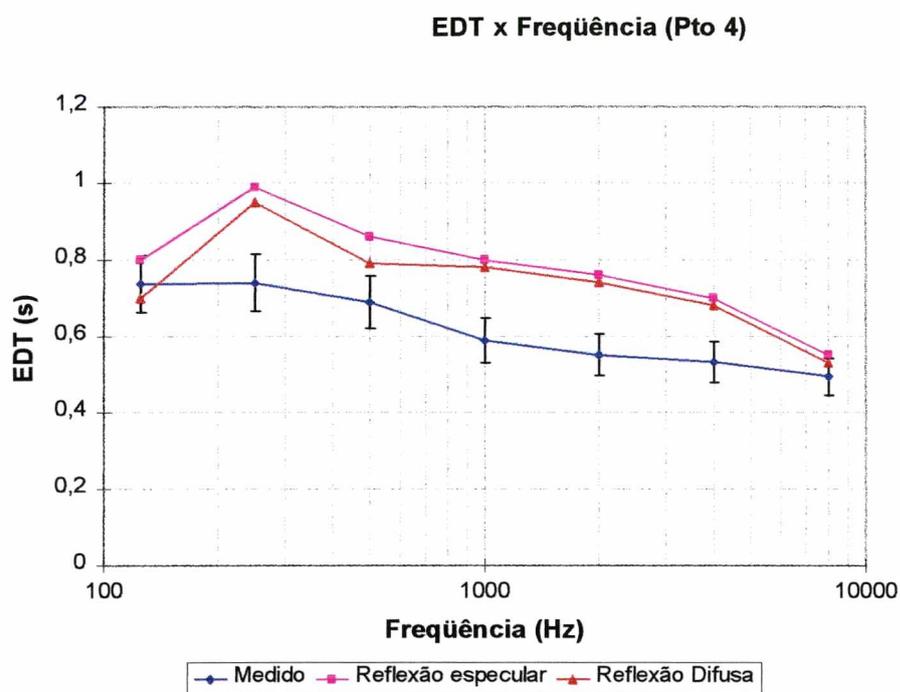


Figura 6.1.2 – EDT: microfone na posição 4, auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

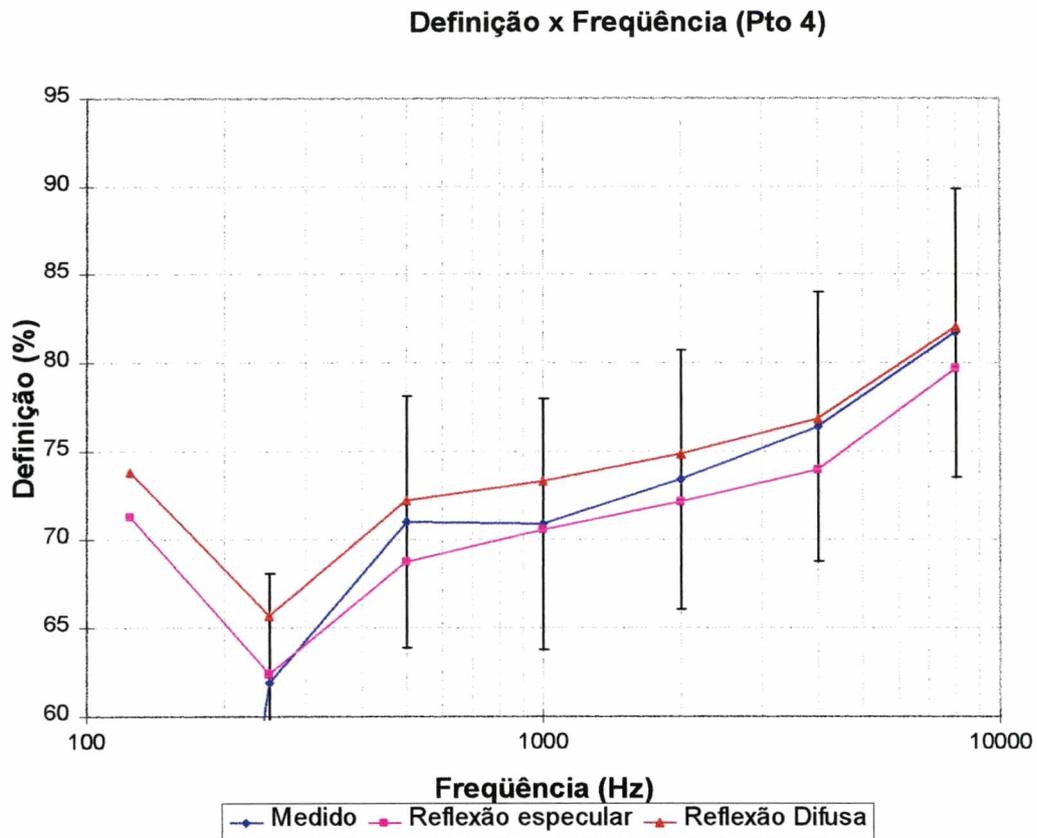


Figura 6.1.3 – Definição: microfone na posição 4, auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

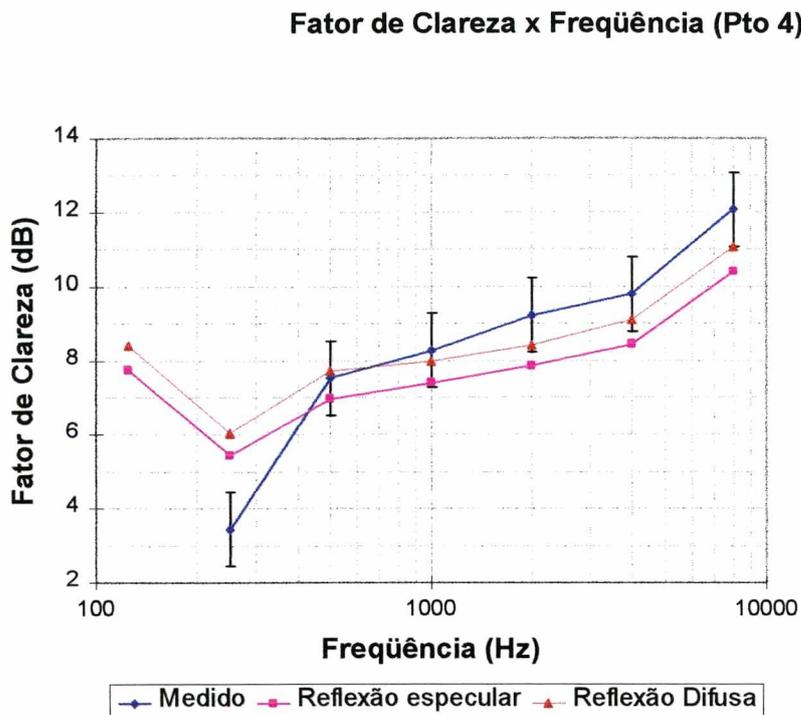


Figura 6.1.4 - Fator de Clareza: microfone na posição 4, auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

As diferenças entre os resultados medidos e simulados para Definição e Fator de Clareza são pequenas e aceitáveis, quando comparados com os limites apresentados na Tabela 6.1, especialmente quando consideradas as reflexões difusas. Vorlaender [15] classifica os resultados com erros de até o dobro dos limites apresentados na Tabela 6.1 como sendo “aproveitáveis” e, deste ponto de vista, pode-se observar que as diferenças entre os resultados medidos e calculados para Definição (considerando as reflexões difusas) são menores do que 5% em todas as bandas de freqüência consideradas. No caso do Fator de Clareza estas diferenças são menores do que estes limites (0,5 dB) para as bandas de freqüência central de 500 e 1000 Hz, e menores (ou ligeiramente maiores) do que 1 dB para as demais bandas de freqüência. Visto que em uma comparação feita entre vários programas de acústica de raios [15] nenhum deles apresentou resultados dentro do limite de 0,5 dB para Fator de Clareza, e apenas dois (de 17) apresentaram resultados dentro do limite de 5% para Definição, os resultados aqui alcançados são satisfatórios, para estes dois parâmetros. É importante observar que mesmo sem considerar reflexões difusas resultados

satisfatórios foram obtidos para o parâmetro Definição. O mesmo não acontece para o Fator de Clareza, onde as diferenças, quando não consideradas reflexões difusas, são em geral, maiores que 1,5 dB.

Quanto a EDT, apenas para a banda de frequência central de 8000 Hz a diferença é de 7,3%. Para as outras bandas diferenças de até 30% são verificadas. No trabalho citado acima [15] nenhum programa obteve resultados dentro do limite de 5% de diferença e boa parte deles não apresentou resultados considerados satisfatórios para EDT, isto é, dentro do limite de erro máximo de 10% com relação às medições. É difícil ter certeza da causa dessas diferenças, pode-se imaginar que coeficientes de absorção subestimados sejam um dos motivos, já que os decaimentos iniciais calculados (EDT) são sempre maiores que os medidos. No entanto, outras simulações foram feitas e, em uma delas, coeficientes de absorção extremamente altos foram atribuídos às superfícies da sala sendo que somente neste caso os resultados de EDT calculados se aproximaram dos medidos. Explicando melhor, foi necessário aumentar exageradamente o coeficiente de absorção médio da sala para que os resultados de EDT calculados se aproximassem dos medidos e, nestes casos, os resultados calculados para os outros parâmetros se distanciaram dos resultados das medições. Um outro recurso foi utilizado para verificar se os coeficientes de absorção usados nas simulações estavam dentro de uma faixa razoável; foi feita uma comparação entre os Tempos de Reverberação calculados pela fórmula de Sabine e aqueles medidos na sala. Estes resultados são apresentados na Tabela 6.1.1.

Tabela 6.1.1 - Tempos de Reverberação medidos e calculados pela fórmula de Sabine, com os mesmos coeficientes de absorção usados nas simulações do Auditório.

f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
TR calculado(s)	0,68	0,80	0,65	0,60	0,57	0,56	0,55
TR medido (s)	1,1	0,94	0,75	0,557	0,523	0,507	0,473

Aparentemente os coeficientes de absorção atribuídos às superfícies internas da sala são razoáveis e o erro verificado nos resultados de EDT calculados são causados por outros problemas. Um fenômeno conhecido, mas não levado em conta na maioria dos programas de raios acústicos, é o da atenuação do nível do sinal, devido ao som incidente de forma quase paralela ao plano das poltronas (“grazing incidence”) e, segundo Vorlaender [15], este efeito tende a afetar, especialmente, o som direto e as primeiras reflexões. Este tipo de fenômeno pode ser uma das causas das diferenças verificadas para EDT calculados e medidos.

Os resultados de EDT, Definição e Fator de Clareza (“Clarity”), medidos e calculados, para a banda de frequência central de 1000 Hz, em função da posição do microfone, são apresentados nas Figuras 6.1.5 até 6.1.7. Reflexões difusas foram consideradas.

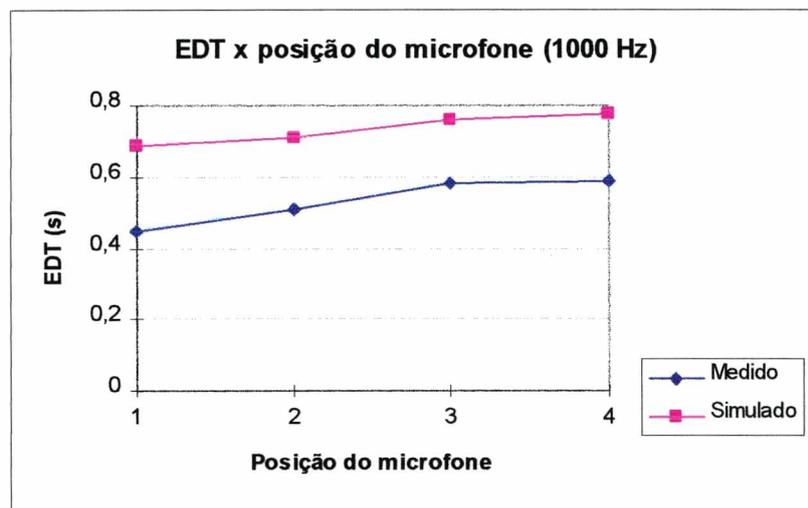


Figura 6.1.5 - EDT, em função da posição do microfone.

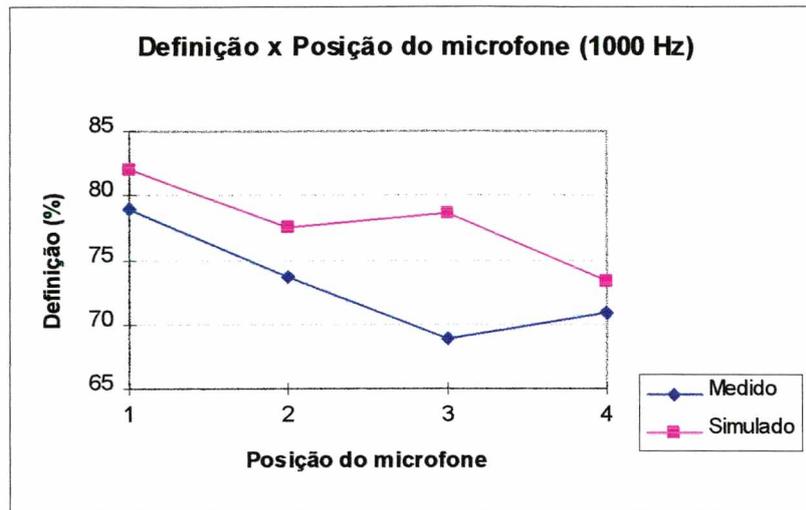


Figura 6.1.6 - Definição, em função da posição do microfone.

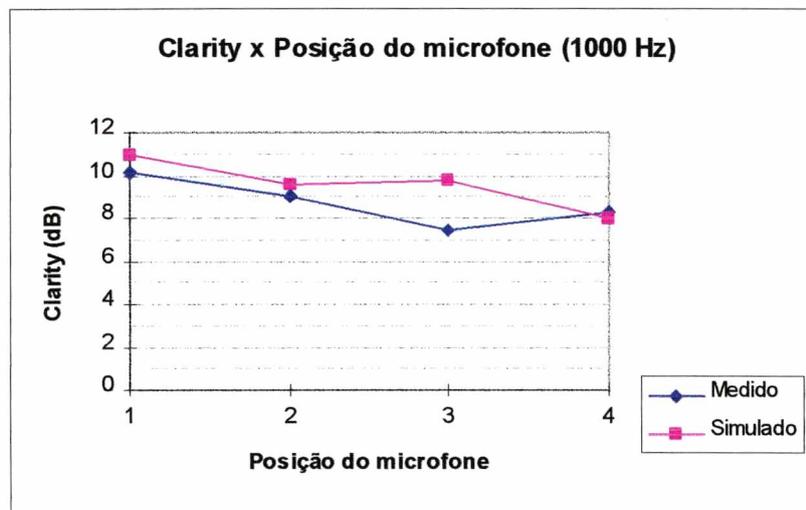


Figura 6.1.7 – Fator de Clareza (“Clarity”), em função da posição do microfone.

As diferenças verificadas entre os parâmetros medidos e calculados apresentam-se aproximadamente iguais, independentemente da posição do microfone, exceto na posição 3, para Definição e Fator de Clareza, onde as diferenças verificadas superam os limites de erro aceitáveis (especialmente para o Fator de Clareza). Vorlaender [15] observa que, à medida que a distância entre a fonte e o microfone aumenta, as diferenças entre os resultados calculados através dos programas e os resultados das medições também tendem a aumentar, e sugere que o efeito de ondas a “grazing incidence” possa ser o responsável por este fato.

Os resultados para Definição e Fator de Clareza, em função da frequência, para outras posições do microfone (posições 1, 2 e 3), são apresentadas nas figuras a seguir.

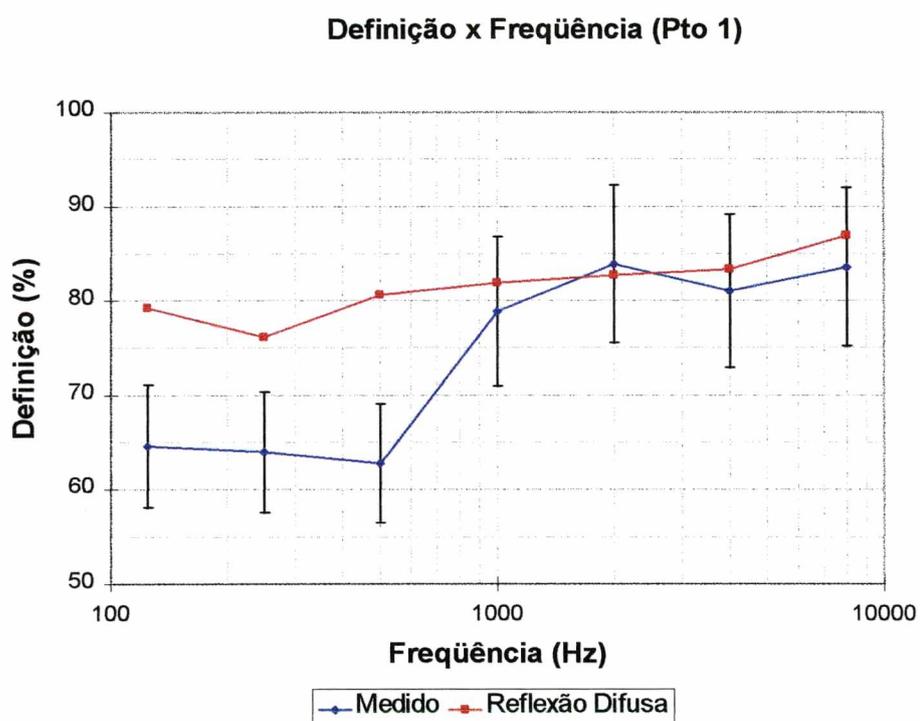


Figura 6.1.8 – Definição: microfone na posição 1, auditório do Depto. de Eng. Mecânica da UFSC.

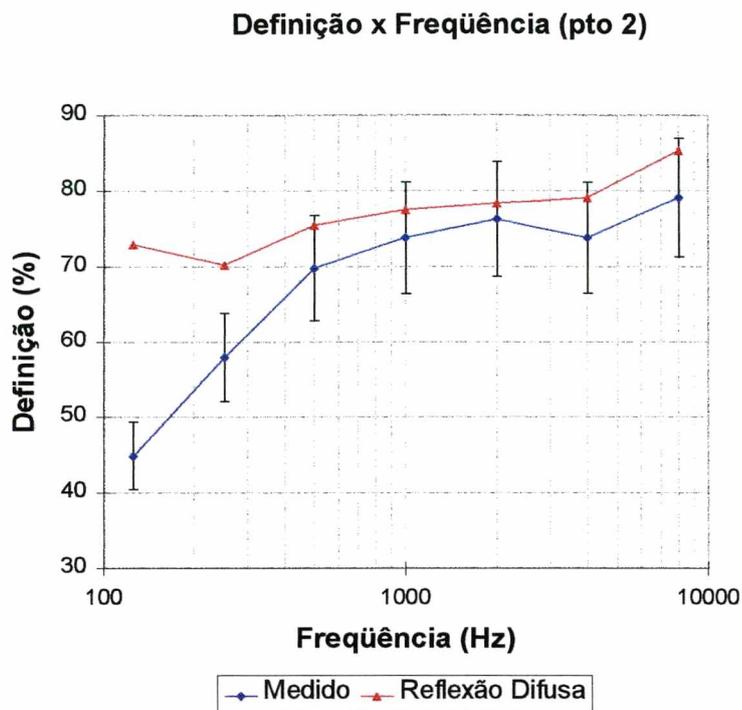


Figura 6.1.9 – Definição: microfone na posição 2, auditório do Depto. de Eng. Mecânica da UFSC.

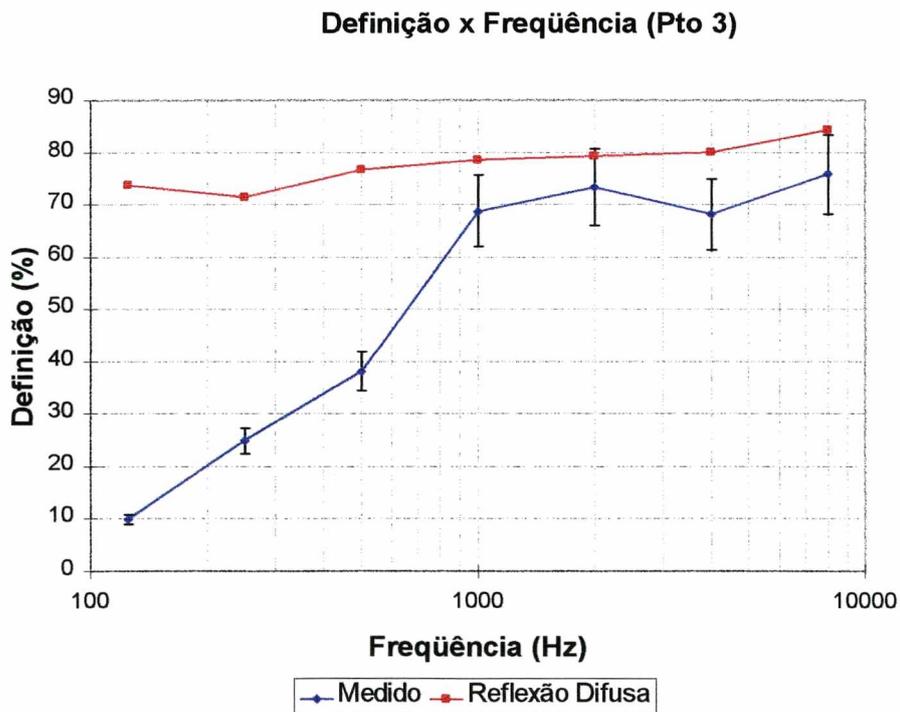


Figura 6.1.10 – Definição: microfone na posição 3, auditório do Depto. de Eng. Mecânica da UFSC.

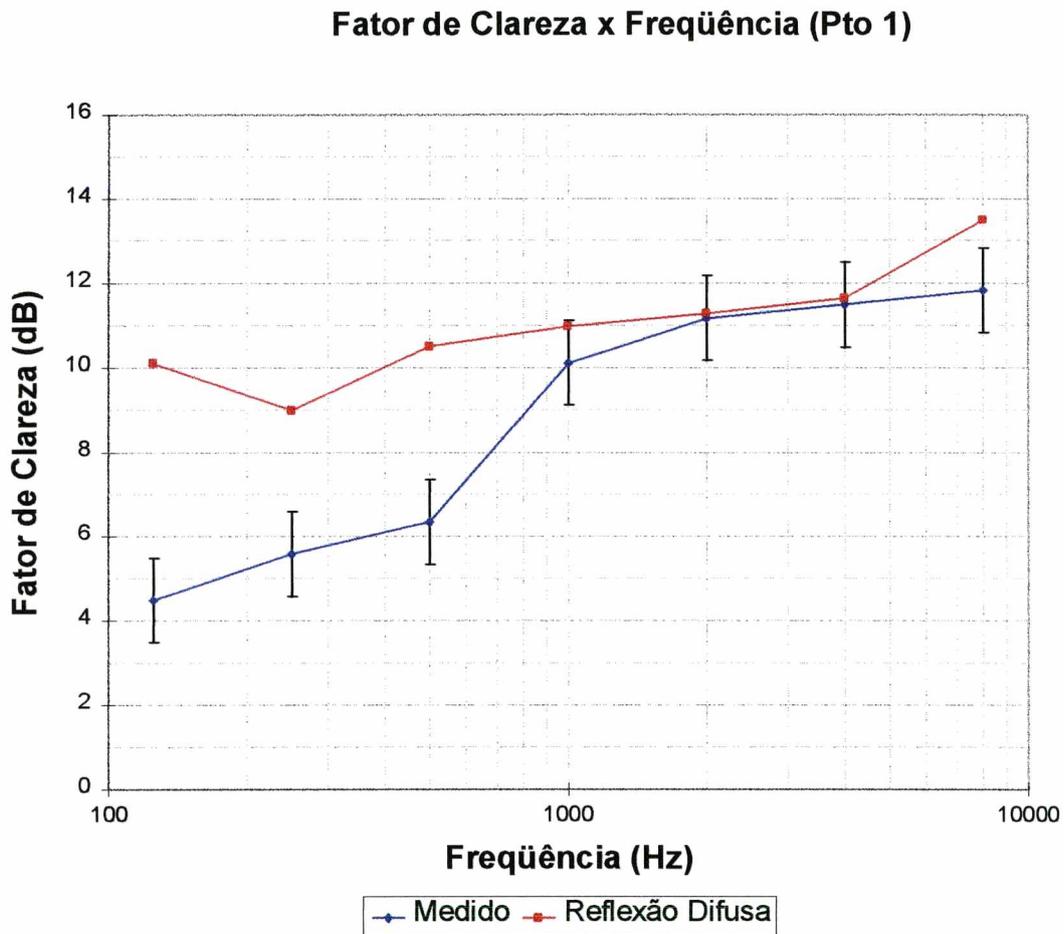


Figura 6.1.11 - Fator de Clareza: microfone nas posição 1, auditório do Depto. de Eng. Mecânica da UFSC.

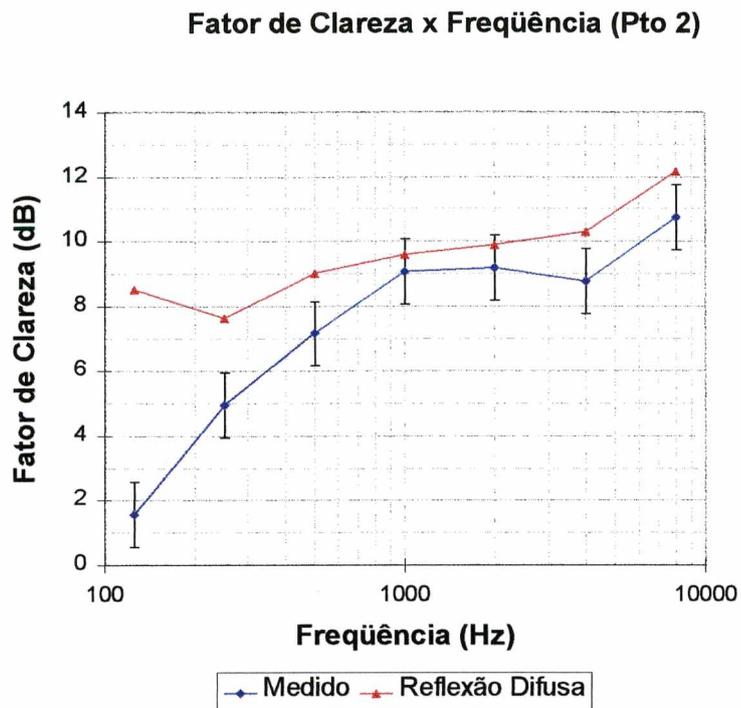


Figura 6.1.12 - Fator de clareza: microfone nas posição 2, auditório do Depto. de Eng. Mecânica da UFSC.

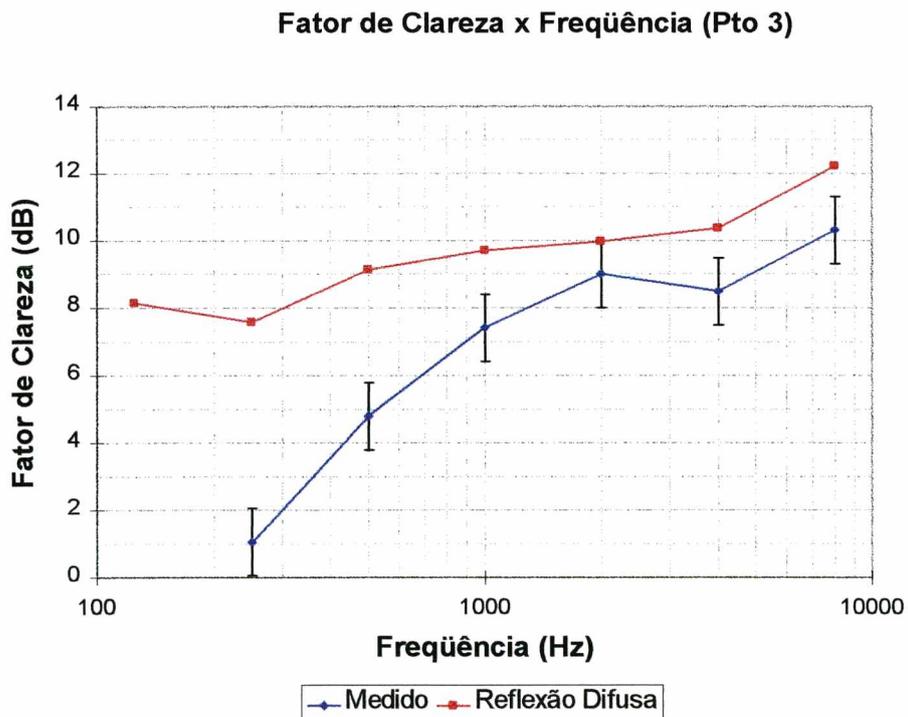


Figura 6.1.13 - Fator de clareza: microfone na posição 3, auditório do Depto. de Eng. Mecânica da UFSC.

Para as posições 1 e 2 do microfone, verifica-se que os resultados das simulações tendem a se aproximar do limite de erro aceitável, para cada parâmetro, apenas para bandas de frequência superiores a 500 Hz (abaixo desta frequência o estudo baseado na teoria de raios tende a não representar exatamente a realidade e as medições também já não são confiáveis). Os resultados das simulações tendem a se afastar daqueles obtidos das medições, à medida em que a distância entre a fonte e o microfone aumenta, conforme observado anteriormente, para 1000 Hz. Os erros demasiadamente altos, verificados para EDT, podem ser causados por uma má representação dos coeficientes de difusão, além do efeito de atenuação de ondas incidindo a “grazing incidence”, como discutido anteriormente.

6.2 Teatro do Centro Integrado de Cultura (CIC)

O mesmo tipo de comparação apresentado na seção anterior foi feito para o Teatro do CIC que, como dito anteriormente, é uma sala bem maior e com muito mais detalhes (que foram simplificados no modelo). A posição da fonte e as posições do microfone, usados para comparar os resultados das medições e das simulações são mostrados na Figura 6.2.1.

As coordenadas das posições da fonte (F) e do microfone (1, 2, 3, 4, 5 e 6), são apresentadas na tabela 6.2.1. Tanto a fonte como os microfones foram posicionados a 1 m do piso, aproximadamente. O eixo z tem como referência o nível do palco ($z = 0$).

Tabela 6.2.1 - Coordenadas das posições da fonte e do microfone utilizadas para a comparação entre resultados das medições e das simulações.

	X	Y	Z
Fonte (F)	23,1	13,8	1
Pto 1 (1)	28	8	0,6
Pto 2 (2)	34	6,8	2,2
Pto 3 (3)	41,2	6,4	4,4
Pto 4 (4)	28,8	14	0,6
Pto 5 (5)	35,1	14	2,2
Pto 6 (6)	42,2	14,2	4,4

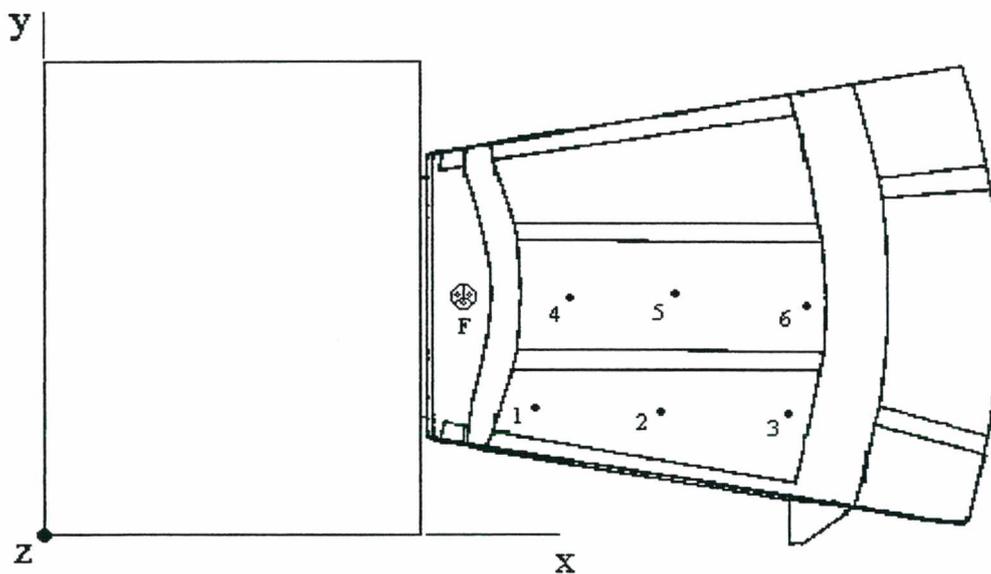


Figura 6.2.1 - Posições da fonte e do microfone usadas para a comparação entre os resultados das medições e das simulações no Teatro do CIC.

Os coeficientes de absorção das superfícies internas da sala foram adotados da literatura, como na seção anterior, e seus valores e fontes bibliográficas de referência são apresentados no apêndice 2. As simulações foram feitas considerando reflexões difusas nas paredes laterais, representando, de forma aproximada, o efeito de espalhamento devido à existência dos tubos. O coeficiente de difusão adotado para estas superfícies foi de 0,7, em todas as bandas de frequência. Como dito anteriormente, as poltronas foram representadas como volumes uniformes (paralelepípedos) sobre a área correspondente àquela ocupada, sem considerar o volume de ar entre o piso e o assento da poltrona. O mesmo coeficiente de absorção foi adotado para toda esta superfície. Nas figuras a seguir são apresentados os resultados de EDT, Fator de Clareza (“Clarity”) e Definição medidos e calculados. Os resultados indicados nas figuras como “simulado 1” e “simulado 2”, se referem a simulações feitas alterando-se apenas o coeficiente de absorção atribuído ao carpete. Os coeficientes de absorção do carpete, correspondentes aos resultados indicados como “simulado 1” são significativamente maiores do que aqueles correspondentes aos resultados indicados como “simulado 2” nas figuras.

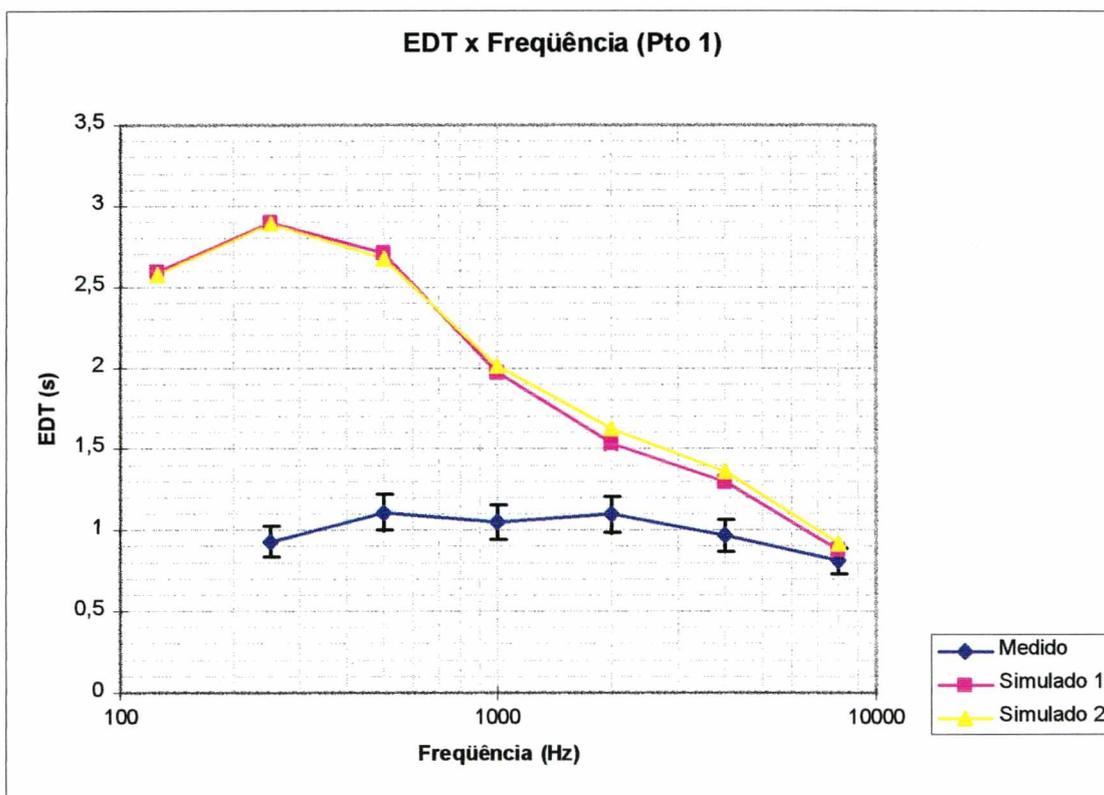


Figura 6.2.2 – EDT: posição 1 do microfone, Teatro do CIC.

O aspecto das curvas comparativas entre resultados simulados e medidos, para EDT, para as demais posições do microfone, são similares, portanto não serão apresentadas aqui. Nas figuras a seguir são apresentados os resultados para Definição e Fator de Clareza, em função da frequência, para seis posições do microfone.

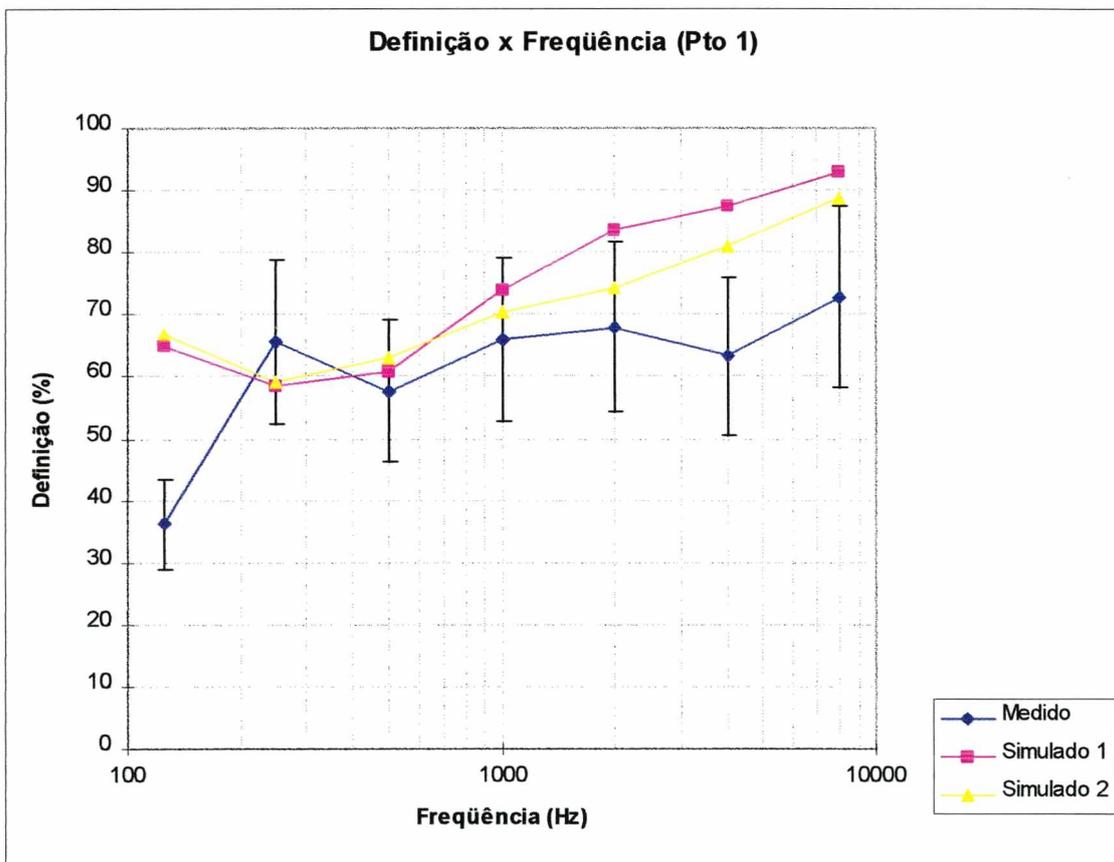


Figura 6.2.3 – Definição: posição 1 do microfone, Teatro do CIC.

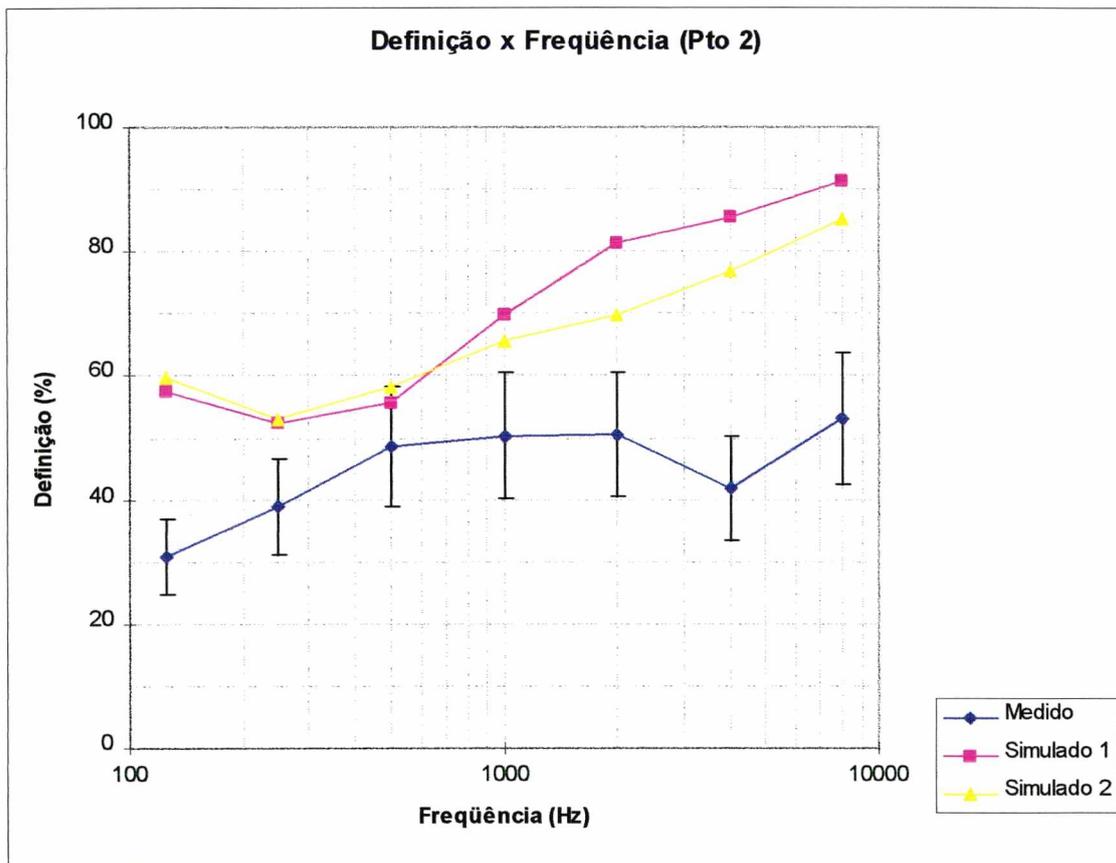


Figura 6.2.4 – Definição: posição 2 do microfone, Teatro do CIC.

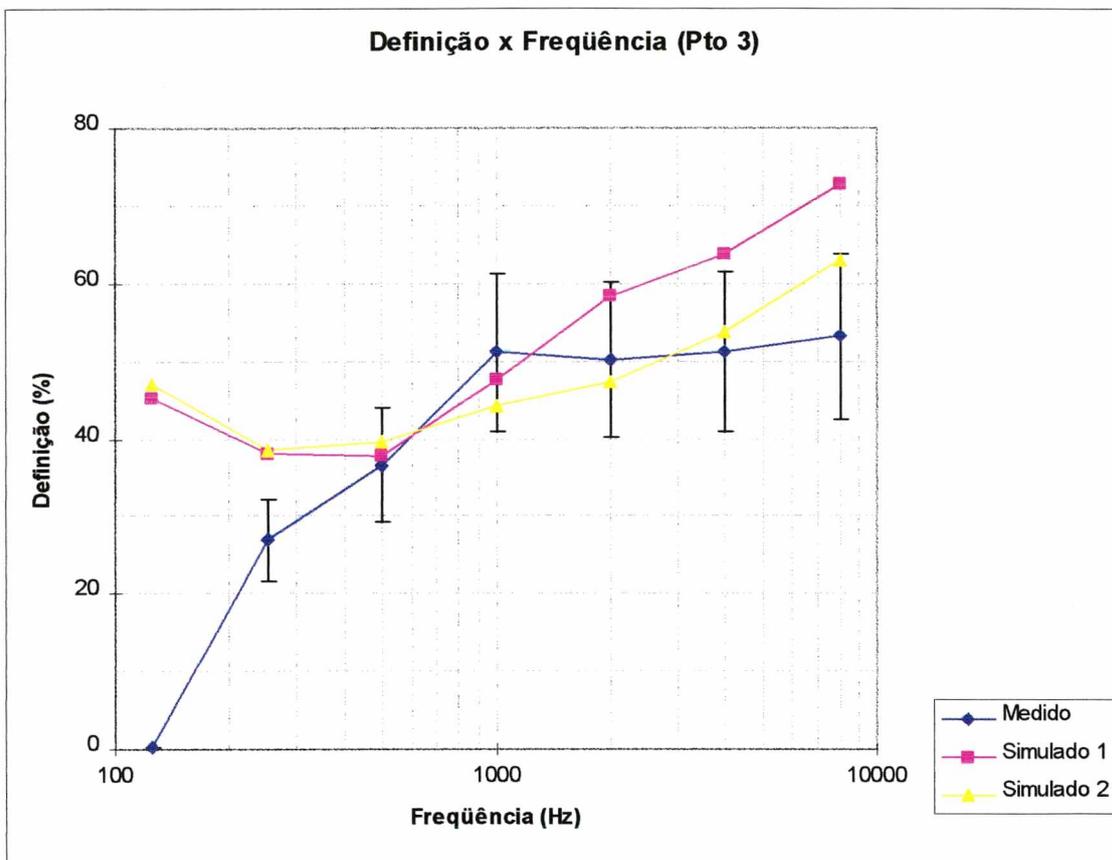


Figura 6.2.5 – Definição: posição 3 do microfone, Teatro do CIC.

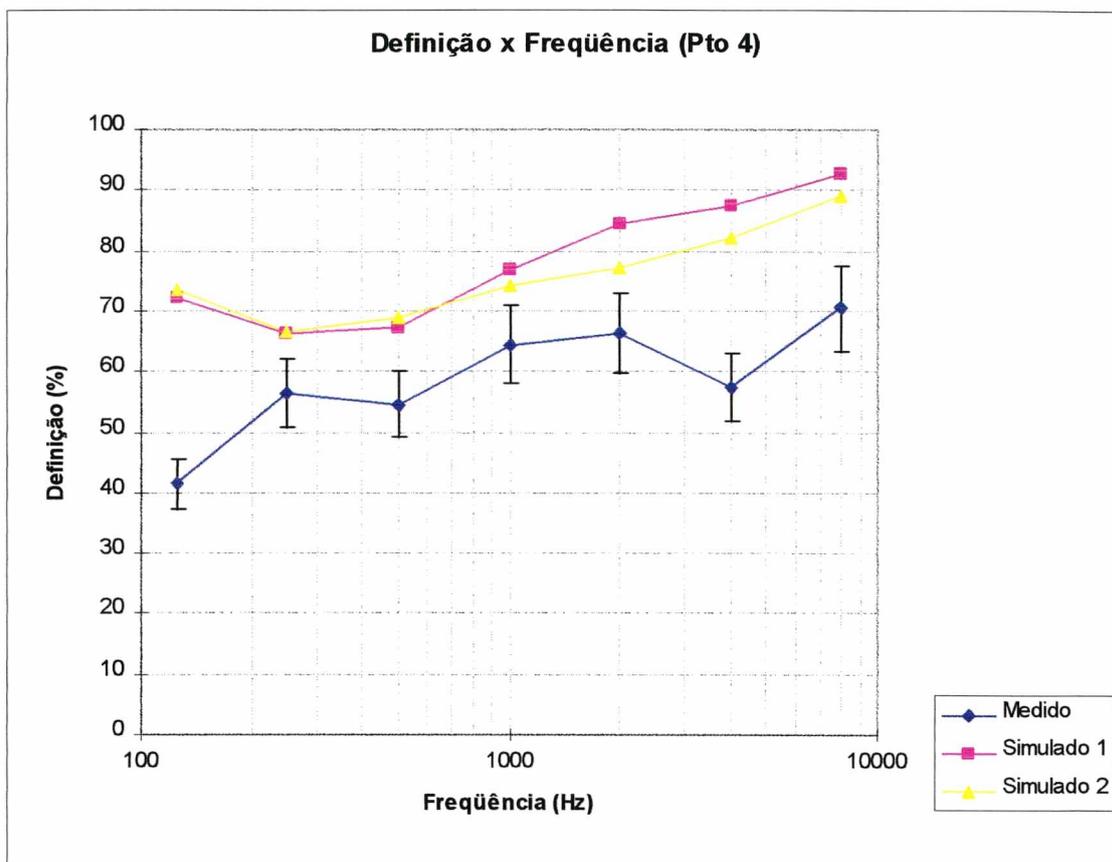


Figura 6.2.6 – Definição: posição 4 do microfone, Teatro do CIC.

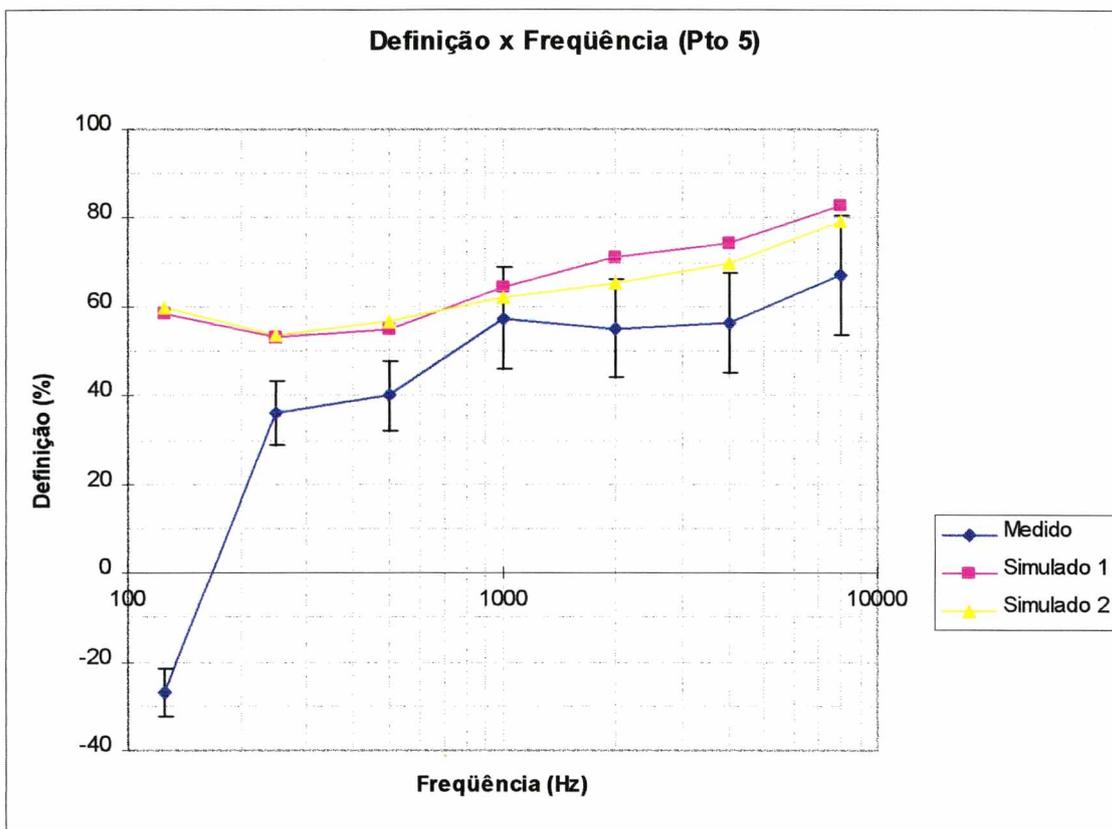


Figura 6.2.7 – Definição: posição 5 do microfone, Teatro do CIC.

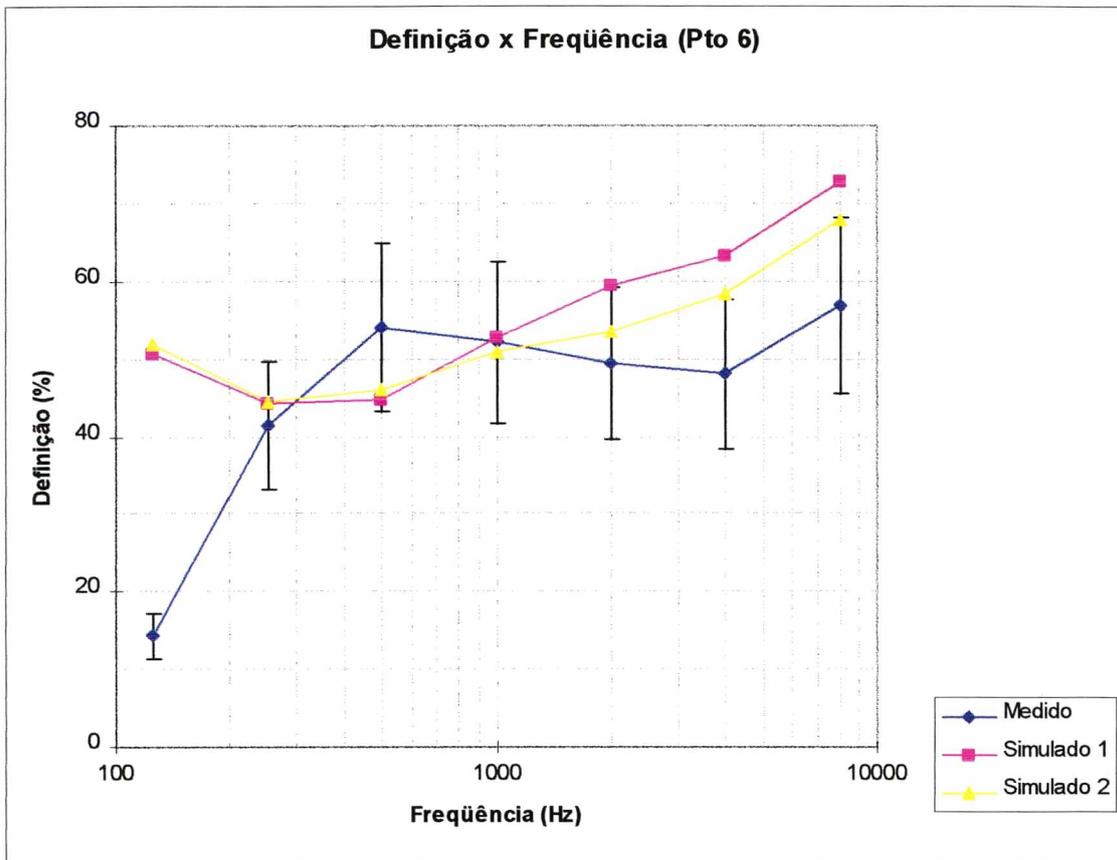


Figura 6.2.8 – Definição: posição 6 do microfone, Teatro do CIC.

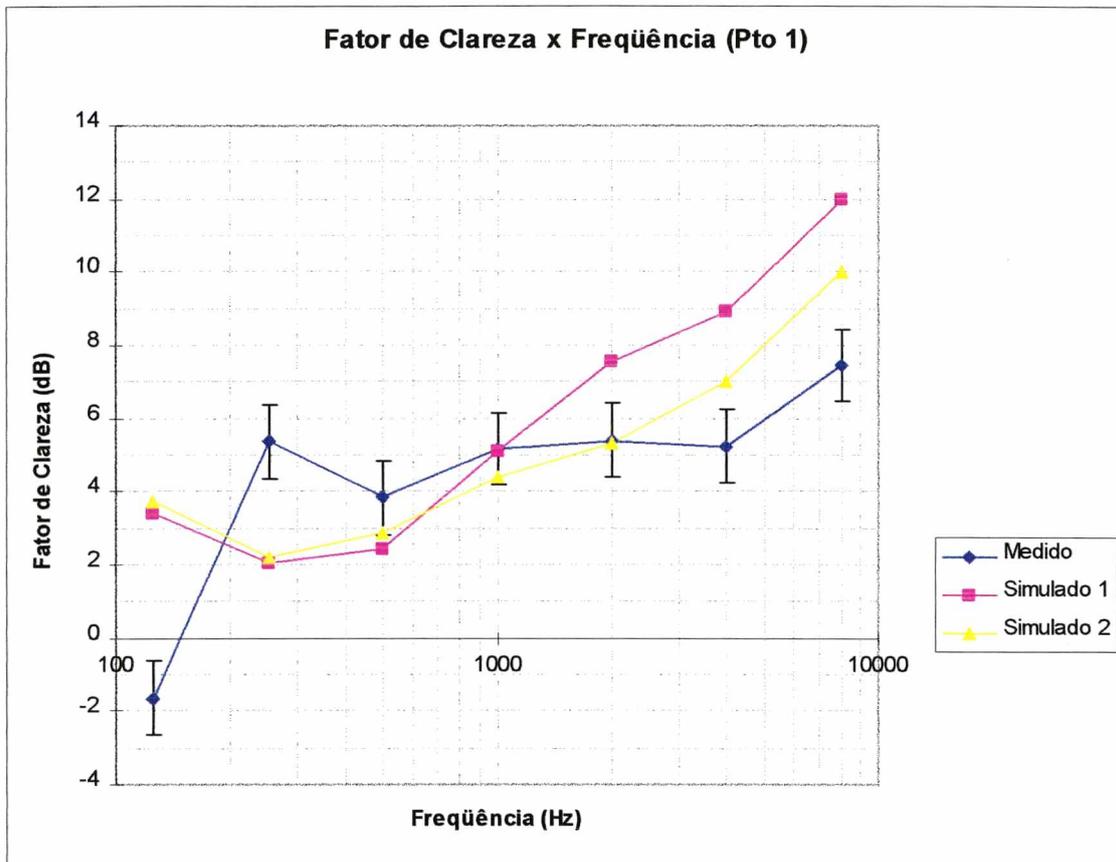


Figura 6.2.9 - Fator de Clareza: posição 1 do microfone, Teatro do CIC.

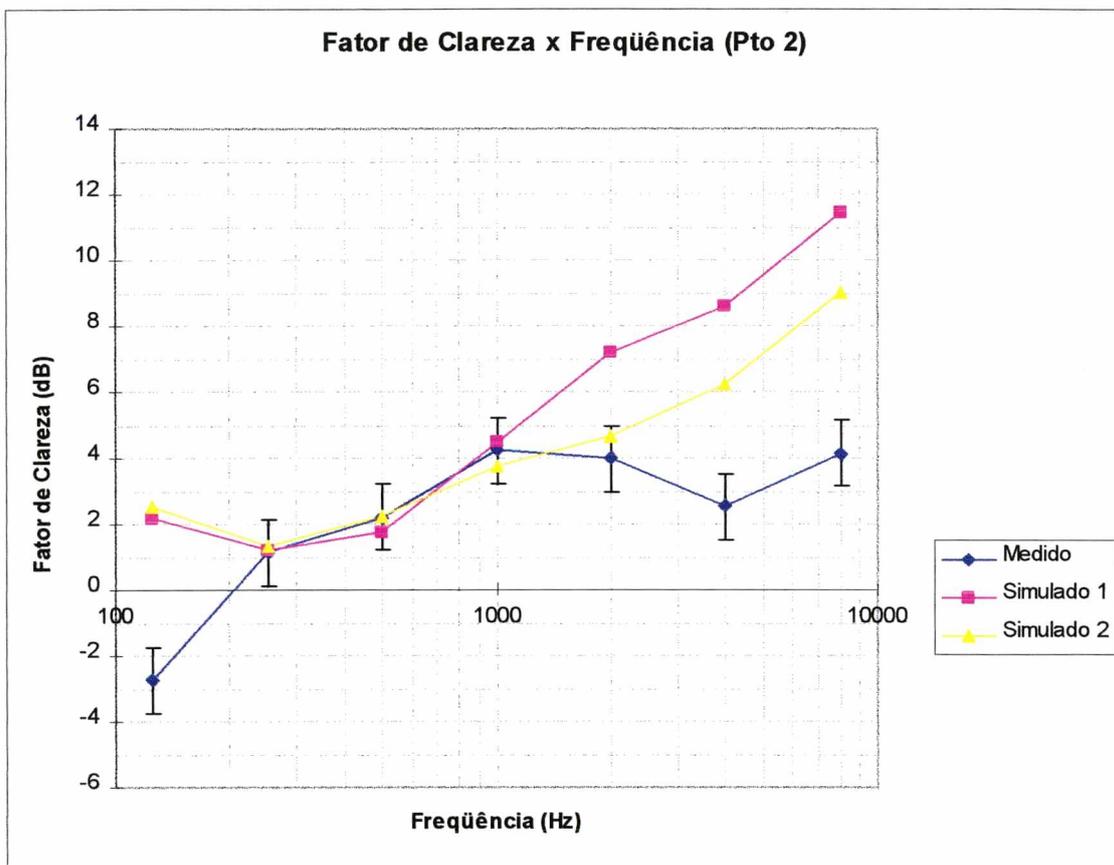


Figura 6.2.10 - Fator de Clareza: posição 2 do microfone, Teatro do CIC.

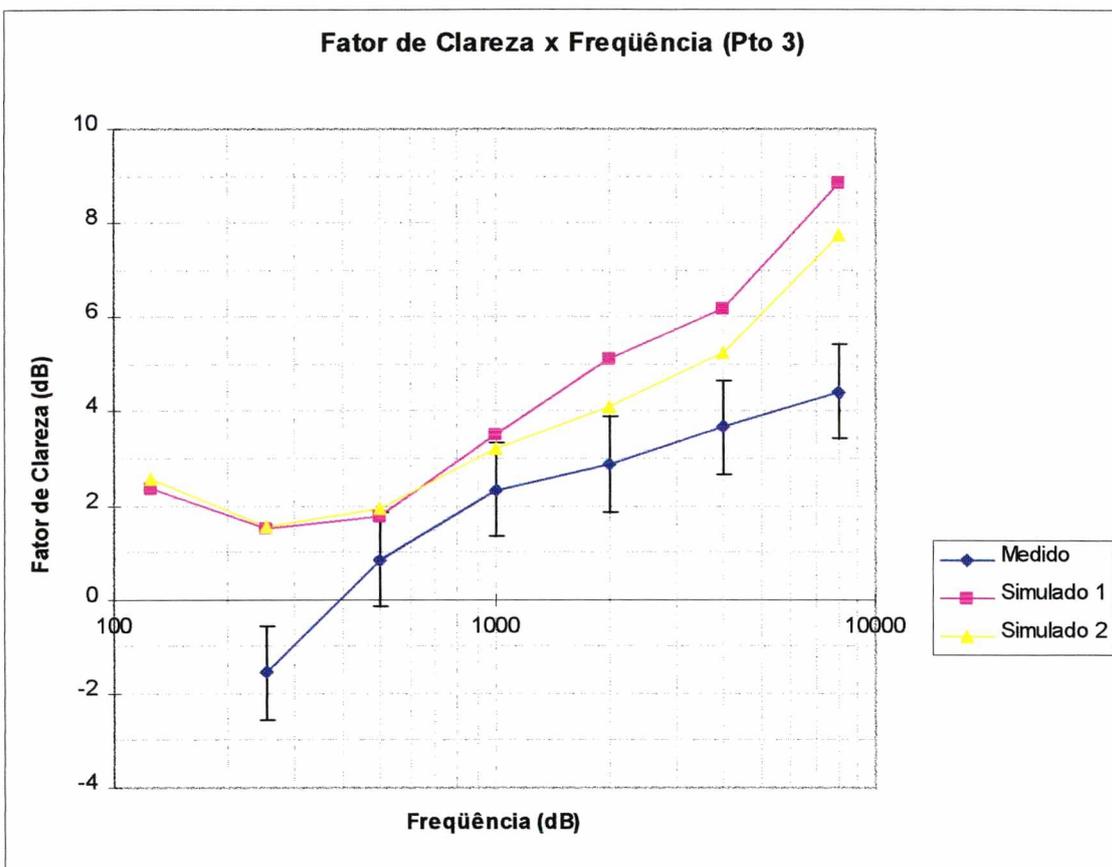


Figura 6.2.11 - Fator de Clareza: posição 3 do microfone, Teatro do CIC.

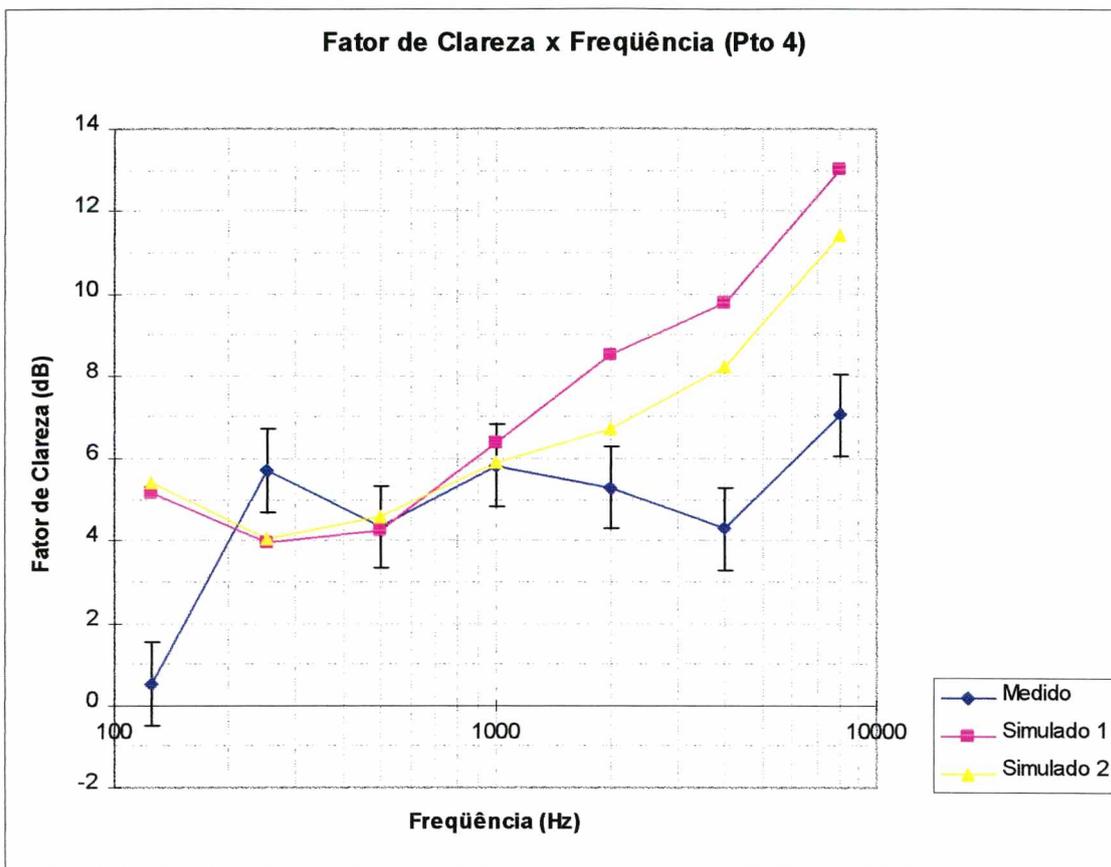


Figura 6.2.12 - Fator de Clareza: posição 4 do microfone, Teatro do CIC.

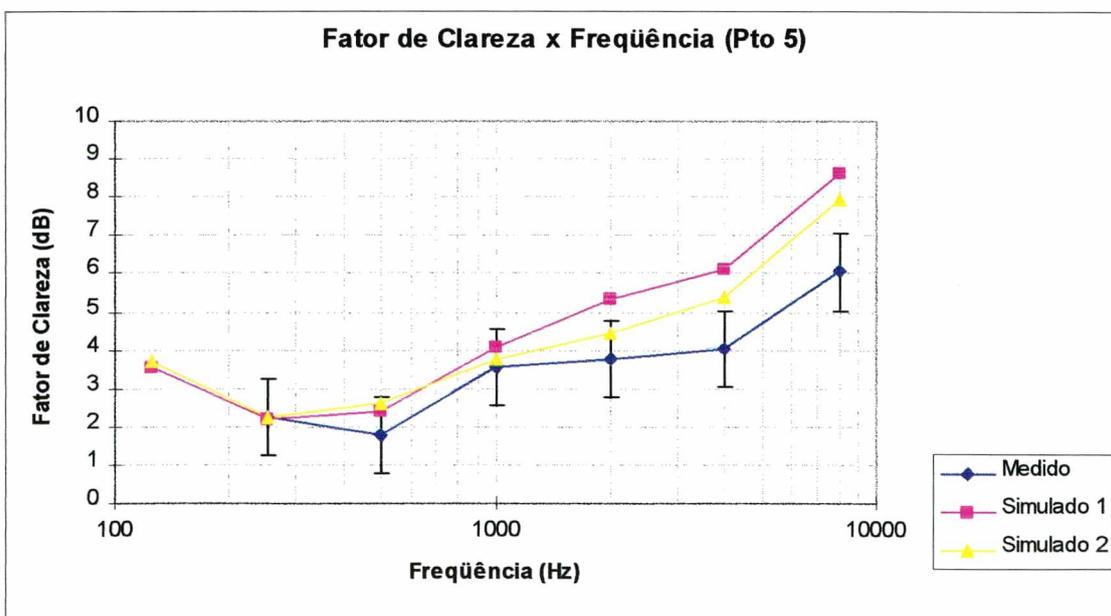


Figura 6.2.13 - Fator de Clareza: posição 5 do microfone, Teatro do CIC.

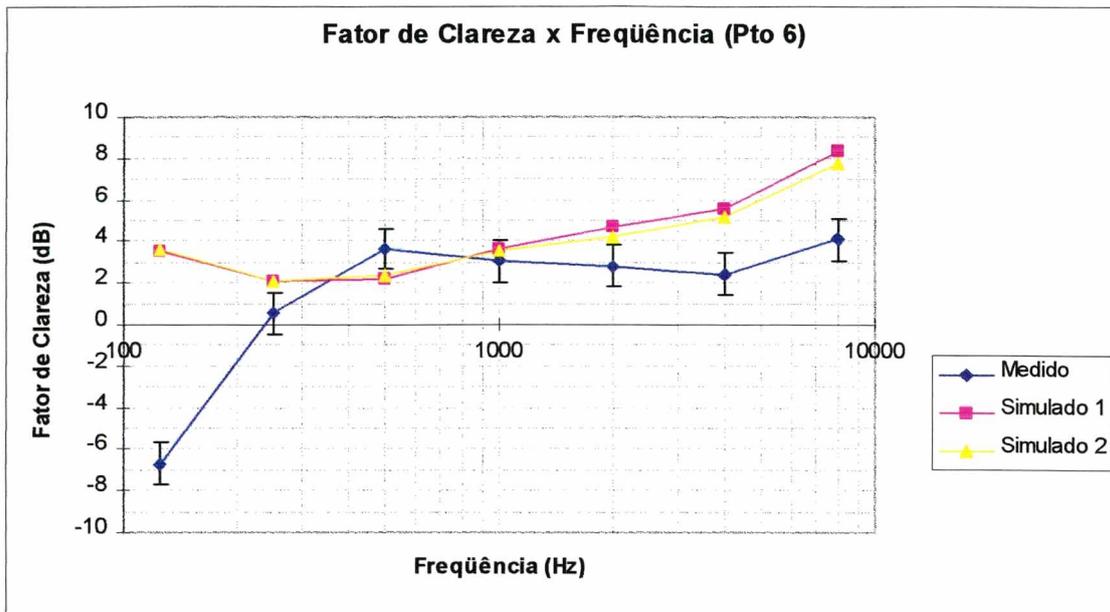


Figura 6.2.14 - Fator de Clareza: posição 6 do microfone, Teatro do CIC.

Por se tratar de um ambiente maior, bem mais detalhado que o auditório estudado na seção anterior, as simulações e a análise dos resultados, para o Teatro do CIC, é muito mais complexa. Um número maior de simulações poderia ser feito, na tentativa de aproximar os resultados das simulações daqueles medidos no local, ou ainda com o objetivo de investigar melhor os efeitos das simplificações adotadas para a construção do modelo. Apenas algumas verificações preliminares foram feitas e algumas observações são apresentadas aqui.

Os resultados das simulações (para Definição e Fator de Clareza) apresentam-se dentro dos limites de erro aceitáveis em alguns pontos investigados, para algumas frequências centrais das bandas de 1/1 oitava. As seguintes observações são feitas:

- 1) o parâmetro Definição simulado nos pontos 1, 3, 5 e 6, se apresenta dentro dos limites de erros aceitáveis para quase todas as bandas de frequência investigadas.
- 2) As diferenças entre os resultados dos Fatores de Clareza, obtidos das simulações e das medições, são aceitáveis para os pontos 1, 2, 3 e 5, especialmente para as bandas de frequência central de 500 Hz a 2000 Hz.

- 3) Os resultados nos pontos 4 e 6 (para o Fator de Clareza) são razoáveis em algumas bandas de frequência, mas, de forma geral, tendem a se apresentar acima dos limites de erro aceitáveis.
- 4) Nas frequências acima de 4000 Hz os resultados das simulações, tanto de Fator de Clareza, quanto de Definição, tendem a se afastar dos valores medidos (mesmo observando que os resultados para Definição se apresentam dentro dos limites aceitáveis).
- 5) Na banda de frequência central de 125 Hz os resultados das simulações são sempre muito diferentes daqueles medidos e para 250 Hz os resultados são vezes aceitáveis, vezes não.
- 6) O coeficiente de absorção do carpete tem pouca influência nos resultados em frequências iguais ou menores que 500 Hz.

As medições realizadas tendem a apresentar uma relação sinal/ruído menor do que o recomendado (10 dB) para frequências da banda de 1/1 oitava de 125 Hz e de 250 Hz, em alguns casos, e vários fatores contribuem para esta deficiência. Aparentemente a caixa acústica utilizada não fornece energia suficiente para excitar o Teatro do CIC de forma adequada em frequências mais baixas, e este fato se torna mais problemático observando que o ruído de fundo tende a ser maior também nesta faixa de frequência.

As diferenças verificadas em frequências acima de 4000 Hz, entre os resultados das simulações e das medições, podem indicar que os coeficientes de absorção ou de difusão atribuídos a diversos tipos de materiais, no modelo da sala, não representam a realidade de forma adequada (para estas frequências). Este fato pode ser objeto de investigação mais aprofundada, assim como o grau de simplificação adotado na construção da geometria do modelo. Não é possível, a partir destes primeiros resultados, verificar a observação feita por Vorlaender, em [15], dando conta de que as diferenças entre os resultados medidos e simulados tendem a aumentar com o aumento da distância entre a fonte e o microfone.

Os resultados para EDT não são, de forma alguma, satisfatórios, assim como observado na simulação do auditório da Engenharia Mecânica. No caso do Teatro do CIC, eles parecem mais distantes dos medidos, a não ser para a banda de frequência central de 8000 Hz. Como visto anteriormente [15], os programas de raios acústicos,

com algumas exceções, tendem a apresentar resultados não satisfatórios para EDT e, segundo Vorlaender [15], um dos motivos seria a ausência dos efeitos de reflexões difusas no algoritmo utilizado. Como visto, a versão do RAYNOISE utilizada neste trabalho considera reflexões difusas e a causa dos erros pode estar relacionada a uma má representação deste fenômeno no modelo utilizado. A difusão foi considerada apenas para as paredes laterais, sobre a área ocupadas pelos cilindros. Segundo Vorlaender, coeficientes de difusão devem sempre ser considerados para todas as superfícies, mesmo que estes sejam aparentemente baixos, isto é, deveriam ter sido considerados para as paredes, painéis, palco e assentos.

Os painéis suspensos podem ser uma fonte de erros, visto que sua geometria foi grosseiramente simplificada para a construção do modelo, e não se tem certeza de que os coeficientes de absorção adotados para estas superfícies sejam adequados. Quando as medições foram realizadas haviam vários objetos no interior da caixa de palco que não foram representados no modelo. Certos coeficientes de absorção foram atribuídos às superfícies deste recinto, na tentativa de representar o coeficiente de absorção médio do local. Ainda assim, parte do erro verificado pode ser atribuído a esta simplificação.

Uma simulação foi feita aumentando os valores dos coeficientes de absorção da parede do fundo da caixa de palco e foi verificado que os valores de EDT simulados se aproximaram bem mais dos medidos, sem que os resultados de Definição e Fator de Clareza se alterassem em muito, com relação às simulações anteriores. Os resultados ainda não foram completamente satisfatórios, mas podem indicar o caminho das alterações necessárias no modelo.

Analisando de uma forma geral os resultados das simulações, percebe-se que estes não podem ser considerados plenamente satisfatórios, ou ainda, nada além de razoáveis. Os erros observados podem ser creditados ao uso não adequado do programa ou uma combinação entre este fato e uma eventual falha do programa com relação aos modelos de absorção e de reflexão. O uso de programas como o RAYNOISE deve ser feito de forma cuidadosa em projetos acústicos e, mesmo que resultados absolutos precisos sejam alcançados através de simulações, estes programas podem guiar decisões e direções a serem tomadas, através de uma análise qualitativa dos resultados.

CAPÍTULO 7

COMENTÁRIOS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

7.1 Comentários e conclusões

A dificuldade para medir respostas impulsivas em baixas frequências torna clara a necessidade de certos ajustes no sistema de medição, para que o potencial da técnica MLS seja mais bem aproveitado. A princípio duas providências podem ser tomadas: 1) trocar a caixa acústica utilizada por outra, com padrões similares quanto à diretividade, com uma melhor resposta em baixas frequências, ou 2) aumentar o ganho do sinal de excitação em baixas frequências, através do equalizador, e atenuar o sinal medido de forma a compensar este ganho, através de outro equalizador ajustado de forma exatamente oposta ao primeiro [32]. Esta última providência pode ser realizada através do uso de filtros de espectro rosa, ao invés de equalizadores, propriamente ditos. Deve-se tomar o cuidado de não aumentar exageradamente o nível do sinal, de forma a introduzir distorções em excesso nos alto-falantes.

Um cuidado que poderia ter sido tomado, ainda com relação ao sistema de medição, seria o de medir as funções de transferência de todos os componentes da cadeia de medição, com a finalidade de ter certeza de que nenhum deles tem muita influência sobre o resultado final da medição da resposta impulsiva de uma sala.

Quando se deseja avaliar a qualidade acústica de uma sala, é importante medir o parâmetro conhecido por IACC (“Inter Aural Cross-correlation Coefficient”) ou, alternativamente, a Fração Lateral. No entanto, para a medição de qualquer destes dois parâmetros, é necessário o uso de equipamentos mais sofisticados. No caso de IACC, deve-se medir a resposta impulsiva binaural, através de uma cabeça artificial (“Dummy Head”). A Fração Lateral é determinada da razão entre a resposta impulsiva medida com um microfone “Figura 8” (“bidirecional”) e aquela medida com o microfone onidirecional. Foi feita uma tentativa de medir a Fração Lateral das salas investigadas,

substituindo o microfone “Figura 8” por dois microfones direcionais, mas os resultados não foram satisfatórios.

Como dito no início, o objetivo deste trabalho não era avaliar a qualidade acústica das salas, mas avaliar a eficiência do uso de um programa de acústica de raios na determinação dos parâmetros acústicos de um ambiente fechado. Uma das conclusões é de que o programa deve ser usado de forma criteriosa. Cuidados devem ser tomados na escolha dos parâmetros de entrada, como o número de raios a ser usado, a ordem de reflexão (como mostram os testes de convergência apresentados na Seção 5.2), o tipo de feixes de raios (cônicos ou piramidais), as condições de temperatura e umidade do ambiente, os coeficientes de absorção e de difusão das superfícies. O modelo da sala investigada deve ser construído com cuidado, escolhendo a melhor forma de fazer as simplificações geométricas necessárias. Na comparação feita por Vorlaender [15], os três programas classificados como “confiáveis”, na época, não exigiam que os modelos das salas fossem extremamente detalhados, mas consideravam os efeitos de reflexões difusas.

As diferenças verificadas com relação aos resultados simulados e medidos de EDT podem indicar que algumas propriedades das superfícies dos modelos não foram bem escolhidas, como coeficientes de absorção e , especialmente, de difusão, ou ainda algum erro do próprio algoritmo ou método utilizado. Para se ter certeza de qual o problema outros casos devem ser estudados, inclusive simulando salas mais simples ainda do que o auditório escolhido para a realização deste trabalho. Deve-se ressaltar o seguinte fato: em comunicação pessoal com Vorlaender foi esclarecido que, tratando de simulações baseadas em raios acústicos, uma sala “retangular” não constitui um exemplo de simplicidade, como no caso discutido na Seção 2.3.3 (Modos acústicos normais em salas retangulares de paredes rígidas). Pelo contrário, salas com superfícies paralelas e com baixa absorção acústica estão entre os casos mais problemáticos com relação à simulação por programas baseados em raios acústicos. Este problema existe porque, na realidade, nenhuma sala é construída com paredes, ou superfícies, de uma maneira geral, exatamente paralelas. No entanto, o paralelismo de superfícies em um modelo construído para a simulação pode levar a energia de certos “raios”, a ser contabilizada pela célula detetora, a somar um valor maior do que o real. Esta particularidade pode explicar, em parte, a falta de resultados plenamente

satisfatórios obtidos da simulação do Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica, já que o modelo foi construído com várias superfícies paralelas.

Também em comunicação pessoal, Vorlaender alertou para a possibilidade da importância de sempre se atribuir um valor qualquer do coeficiente de difusão para todas as superfícies do modelo, mesmo sem a certeza de qual o valor exato deste coeficiente. Como este procedimento não foi adotado no presente trabalho, discrepâncias entre resultados simulados e medidos também podem ser parcialmente explicados por problemas desta natureza.

Quando as medições foram realizadas no Teatro do CIC a caixa de palco poderia ter sido efetivamente fechada, deixando parte do palco e a área ocupada pelas poltronas como uma sala a parte, para diminuir as fontes de incerteza das simulações, com relação à geometria. Para a realização de projetos acústicos de ambientes não construídos, usando programas de raios acústicos, deve-se fazer o mínimo de simplificações geométricas possíveis.

Alguns trabalhos publicados [30] atestam a dificuldade de se modelar a difusão das superfícies, assim como a absorção, em programas de raios acústicos. Como se sabe, a absorção sonora pode depender do tipo de campo acústico ao qual o material está exposto (mais ou menos difuso), da posição do material na sala (se está no canto ou no centro de uma parede) ou ainda do ângulo de incidência do som sobre a superfície. Não se tem notícias de que alguma destas características da absorção possa ser representada por algum método de cálculo baseado em raios acústicos, desenvolvido para o estudo da acústica de ambientes fechados.

Menos estudados ainda são os fenômenos de difusão, ou espalhamento, decorrentes da incidência de ondas sonoras sobre superfícies irregulares. Um certo grau de “difusibilidade” pode ser atribuído a uma superfície, como visto anteriormente, através do coeficiente de difusão, mas este recurso nem sempre representa a realidade e os coeficientes são escolhidos de forma arbitrária. O espalhamento provocado por corpos de determinados perfis têm sido estudados por vários pesquisadores, que têm usado principalmente o método de elementos de contorno e o método das fontes elementares [33]. Os resultados destes estudos, no entanto, ainda não têm sido utilizados de forma prática nos estudos da acústica de ambientes fechados.

Apesar de todos os problemas ainda existentes, com relação ao uso de programas computacionais de raios acústicos, vários pesquisadores e profissionais da área de acústica de salas têm utilizado, com sucesso, este recurso para prever e investigar aspectos relacionados ao controle de ruído, em ambientes abertos ou fechados, e à qualidade acústica de ambientes fechados.

Um artigo interessante recentemente publicado no jornal “The New York Times” [34] testemunha o fato de que os profissionais da área de acústica de salas, depois de anos de descrédito devido a resultados medíocres (anos 60 e 70) quanto à acústica de salas de concerto, têm conseguido recuperar a confiança junto a opinião pública nos Estados Unidos, motivados pelo sucesso alcançado nas reformas ou construções mais recentes. Sem dúvida, boa parte deste sucesso se deve, além da experiência individual de cada profissional, aos avanços das técnicas de medição e previsão das respostas impulsivas das salas, assim como aos estudos realizados na área de psico-acústica.

7.2 Sugestões para futuros trabalhos

Quanto ao sistema de medição, uma sugestão é de que as funções de transferência de cada componente sejam medidas para verificar e, eventualmente, compensar os efeitos introduzidos por estes componentes na medição das respostas impulsivas das salas. Para melhorar a relação sinal/ruído das medições em baixas frequências é sugerido que algumas das providências citadas na seção anterior sejam tomadas.

Como visto, os parâmetros acústicos geralmente utilizados para avaliar a qualidade acústica de um ambiente fechado podem ser obtidos das respostas impulsivas deste ambiente. No entanto, o procedimento para a obtenção destes parâmetros pode ser feito de diversas formas. Lundeby et al. [23], como visto no capítulo 3 (seção 3.5), afirma que diferenças podem existir se a resposta impulsiva for filtrada e depois limitada por janelas temporais, ou se esta for limitada e depois filtrada. Estudos mais aprofundados podem ser feitos, com o objetivo de investigar a importância das diferenças verificadas, dependendo do tipo de procedimento adotado.

Um trabalho de grande importância também, consistiria na investigação mais

aprofundada do fenômeno de espalhamento, com o objetivo de criar um novo tipo de modelo que pudesse ser incorporado aos algoritmos de raios acústicos, diminuindo o grau de incerteza que atualmente é verificado no momento de atribuir valores aos coeficientes de difusão das superfícies (atualmente avaliados pela simples inspeção visual).

O fenômeno da atenuação das ondas sonoras incidentes em ângulos muito grandes (com relação à normal) sobre a área ocupada pelas poltronas, e a incorporação de algum modelo que leve em conta este efeito, em algoritmos de raios acústicos, também é um assunto de preocupação atual.

A aplicação de outros métodos para a previsão das respostas impulsivas em salas tem sido verificadas, principalmente para baixas frequências. Como citado anteriormente, um trabalho publicado por Terai e Kawai [7] descreve o uso do método dos elementos de contorno para a obtenção de respostas impulsivas de uma sala de concerto para frequências até 1000 Hz. Estudos mais extensivos podem ser feitos, com a finalidade de investigar o quanto métodos alternativos podem contribuir para a previsão do campo acústico de salas.

A boa previsão de respostas impulsivas é importante também para técnicas de auralização (seção 2.3.5), uma área promissora, de aplicações diversas, tanto como no desenvolvimento de ferramentas de auxílio durante projetos acústicos de ambientes, como na indústria de áudio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

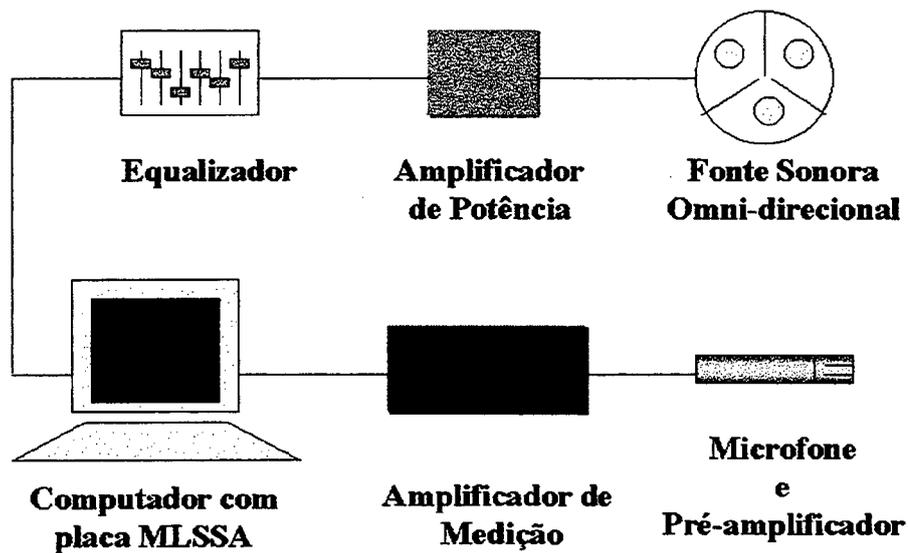
- [1] Beranek, L. L., Concert Hall Acoustics, **Journal of the Acoustical Society of America**, 92(1), July, 1992.
- [2] Kuttruff, M., **Room Acoustics**, Applied Science Publishers, 1979.
- [3] Beranek, L., **Concert and Opera Halls - How They Sound**, Acoustical Society of America, 1996.
- [4] Schroeder, M.R., Progress in Architectural Acoustics and Artificial Reverberation: Concert Hall Acoustics and Number Theory, **Journal of the Audio Engineering Society**, vol.32, No.4, April 1984.
- [5] Demirkale, S.Y. e Budak, A., Acoustical Performance of the Ataturk Cultural Center, **Applied Acoustics**, v. 45, 1995, p.297-319.
- [6] Committee Draft ISO/CD 3382, 1993.
- [7] Terai, T. e Kawai, Y. in **Boundary Element Methods in Acoustics**, editado por Ciskowski, R.D. e Brebbia, C.A., Computational Mechanics Publications, Cap.10, p.193-221, 1991.
- [8] Barron, M. e Marshall, A.H., Spatial Impression Due to Early Lateral Reflections in Concert Halls, **Journal of Sound and Vibration**, v.77, 1981, p.211-232.
- [9] Gade, A.C., Investigations of Musicians' Room Acoustic Conditions in Concert Halls, **Acustica** 69, Part 1: Methods and Laboratory Experiments, p.193-203; Part 2: Field Experiments and Synthesis of Results, p.249-262, 1989.
- [10] Gade, A.C., Prediction of Room Acoustical Parameters, **Journal of the Acoustical Society of America**, 89, 1857(A), 1991.
- [11] Makrinenko, L.I., **Acoustics of Auditoriums in Public Buildings**, Acoustical Society of America, 1993.
- [12] 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**, v. 86(1), Julho, 1989.
- [13] Kuttruff, K.H., Auralization of Impulse Responses Modeled on the basis of Ray-Tracing Results, **Journal of the Audio Engineering Society**, v.41, n.11, novembro, 1993.
- [14] de Souza, Mauricy C. R., **Previsão do Ruído em Salas por Raios Acústicos e Ensaios Experimentais**, Dissertação de Mestrado defendida no Departamento

- de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Março de 1997.
- [15] Vorlaender, M., International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulations, **Proceedings of the 15th ICA**, 689, 1995.
- [16] Schroeder, M.R.; New Method for Measuring Reverberation Time, **Journal of the Acoustical Society of America**, 1965, p.409-412.
- [17] Vanderkooy; Time Delay Spectrometry, **Journal of the Audio Engineering Society**, 1982.
- [18] Schroeder, M.R.; Integrated impulse method measuring sound decay without using impulses, **Journal of the Acoustical Society of America** 66(2), aug.1979, p.497-500.
- [19] Chu, W.T.; Comparison of reverberation measurements using Schroeder's impulse method and decay curve averaging method, **Journal of the Acoustical Society of America**, may 1978, p.1444-1450.
- [20] Borish, J. and Angell, J.B.; An efficient algorithm for measuring the impulse response using pseudorandom noise, **Journal of the Audio Engineering Society**, v.31, n.7, 1983, July/August.
- [21] Chu, W.T.; Impulse response and reverberation-decay measurements made by using a periodic pseudorandom sequence, **Applied Acoustics**, v.29 (1990), p.193-205.
- [22] Rife, D.D. and Vanderkooy, J.; Transfer Function measurement with Maximum-Length Sequences, **Journal of the Audio Engineering Society**, v.37, n.6, 1989, June.
- [23] Lundeby, A.; Vigran, T.E.; Bietz, H., and Vorlaender, M.; Uncertainties of measurements in room acoustics, **ACUSTICA**, v.81, 1995, p.344-355.
- [24] Vanderkooy, J.; Aspects of MLS measuring systems, **Journal of the Audio Engineering Society**, v.42, n.4, 1994 April, p.219-231.
- [25] Vorlaender, M.; Impulse response of headphones on ear simulators, **ACUSTICA**, v.76 (1992), p.66-72.
- [26] Bradley, J.S.; Optimizing the decay range in room acoustics measurements using Maximum-Length Sequence techniques, **Journal of the Audio Engineering Society**, v.44, n.4, 1996 April, p.266-273.

-
- [27] Griesinger, D.; Beyond MLS - Occupied hall measurement with FFT techniques, **101st Audio Engineering Society Convention 1996**, November 8-11, Los Angeles, California.
- [28] Gerges, S. N. Y., **Ruído, Fundamentos e Controle**, Centro Brasileiro de Segurança e Saúde Industrial, 1992.
- [29] Meng, X. W., De Borger, G., Overmeire, M. V., Numerical Simulation of the Acoustical Behaviour of Rooms using RAYNOISE, **Proceedings of the Euro-Noise'95 conference**, Centre Technique des Industries Mecaniques, 1995.
- [30] Vermeir, G., Mees, P., Evaluation of Room Acoustical Predictions using Ray-tracing, **Proceedings of the Euro-Noise'95 conference**, Centre Technique des Industries Mecaniques, 1995.
- [31] **RAYNOISE Manual**, Numerical Integration Technologies N. V., 1993.
- [32] **MLSSA Reference Manual**, DRA Laboratories, 1997.
- [33] Araújo, A. A., Dissertação de Mestrado a ser defendida no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, em Março de 1998.
- [34] Oestreich, J. R., A Maligned Art (Science? Sorcery?) Gains New Respect, **The New York Times**, Sunday, November 9, 1997.

APÊNDICE 1**Detalhes do equipamento utilizado**

A seguir é descrito o equipamento utilizado no sistema de medição.



- Computador:

processador 586, 160 MHz, memória RAM: 16 Mbytes;

- Placa e programa comercial MLSSA (DRA Laboratories), versão 10.0A, contendo conversor A/D de 12 bits e filtro anti-"aliasing", com frequência de corte ajustável entre 1000 Hz a 40000 Hz;

- Amplificador de medição: marca Brüel & Kjaer, tipo 2636;

- Microfone de incidência aleatória: marca Brüel & Kjaer, tipo 4166;

- Pré-amplificador: marca Brüel & Kjaer, tipo 2645;

- Equalizador: marca Nashville, modelo NA-1200;

- Amplificador de potência: Marca Brüel & Kjaer, tipo 2706;

- Fonte sonora: caixa acústica especial (omni-direcional), com 12 alto-falantes, marca Brüel & Kjaer, tipo 4241

APÊNDICE 2

Coeficientes de absorção adotados nas simulações

Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC

f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Cortina Fina ^[3]	0,04	0,08	0,11	0,25	0,3	0,3	0,3
Lajota	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1	0,12	0,12
Concreto ^[1]	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08
Madeira ^[2]	0,28	0,22	0,19	0,13	0,08	0,06	0,08
Vidro ^[1]	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Porta Eucatex	0,28	0,22	0,19	0,13	0,08	0,06	0,08
Poltrona ^[2]	0,56	0,64	0,7	0,72	0,68	0,62	0,6
Carpete ^[4]	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37	0,37

Tabela A2.1 - Coeficientes de absorção utilizados para as simulações do auditório do Depto. de Engenharia Mecânica da UFSC.

Fontes de Referência:

- [1] Gerges, S. N. Y., **Ruído, Fundamentos e Controle**, Centro Brasileiro de Segurança e Saúde Industrial, 1992.
- [2] Beranek, L. L., Hidaka, T., Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces, Apresentado no 133º encontro da Acoustical Society of America, State College, Pennsylvania, Junho de 1997, **Journal of the Acoustical Society of America**, 101, 3134, 1997.
- [3] Morse, P. M., **Vibration and Sound**, Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, 1991.
- [4] Beranek, L. L., **Acoustics**, Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, 1993.

Teatro do Centro Integrado de Cultura

f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Lona lisa sobre madeira ^[1]	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Madeira ^[1]	0,1	0,11	0,1	0,08	0,08	0,11	0,11
Carpete ^[1]	0,02	0,06	0,14	0,37	0,6	0,65	0,65
Concreto pintado ^[2]	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08
Paredes laterais da caixa de palco	0,02	0,06	0,14	0,37	0,6	0,65	0,65
Parede do fundo da caixa de palco	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08
Teto da caixa de palco	0,28	0,2	0,1	0,1	0,08	0,08	0,08
Painéis refletores	0,42	0,21	0,1	0,08	0,06	0,06	0,06
Poltronas ^[1]	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55	0,55
Porta ^[1]	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05	0,05
Tubos laterais (alumínio)	0,3	0,2	0,1	0,06	0,06	0,06	0,05

Tabela A2.2 - Coeficientes de absorção utilizados para as simulações do Teatro do CIC.

Fontes de Referência:

[1] Beranek, L., **Concert and Opera Halls - How They Sound**, Acoustical Society of America, 1996.

[2] Gerges, S. N. Y., **Ruído, Fundamentos e Controle**, Centro Brasileiro de Segurança e Saúde Industrial, 1992.

Observações:

- (1) as simulações cujos resultados foram apresentados como "Simulado 1", foram realizadas com os dados apresentados na tabela II. Aquelas cujos resultados foram apresentados como "Simulado 2" foram realizadas com os coeficientes de absorção para o carpete, como apresentado na Tabela I, para o auditório do Depto. de Engenharia Mecânica da UFSC.
- (2) Os coeficientes de absorção apresentados nas tabelas, sem indicação de referência foram estimados pelo autor, por vezes associando coeficientes de absorção, encontrados na bibliografia, de outros materiais similares. Os coeficientes

de absorção da porta eucatex, apresentados na tabela I, são os mesmos da madeira, apresenta da mesma tabela.

- (3) Os coeficientes de absorção associados às paredes da caixa de palco do Teatro do CIC, não representam exatamente o material de revestimento destas superfícies, mas devem representar o coeficiente de absorção médio de todos os objetos existentes neste recinto.

APÊNDICE 3

**RELAÇÃO ENTRE OS ELEMENTOS DOS MODELOS E O TIPO DE MATERIAL
ASSOCIADO À SUPERFÍCIE EM QUESTÃO**

Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC

Elemento	Descrição	Material
1	Janela	vidro, cortina e grade
2	Parede	lajota
3	Parede	concreto
4	Janela	vidro, cortina e grade
5	Parede	lajota
6	Parede	concreto
7	Parede	concreto
8	Parede	madeira
9	Parede	lajota
10	Janela	vidro e cortina
11	Parede	concreto
12	Janela	vidro e cortina
13	Parede	concreto
14	Parede	madeira
15	Parede	lajota
16	Parede	concreto
17	Parede	madeira
18	Parede	lajota
19	Porta	eucatex
20	Parede	concreto
21	Parede	madeira
22	Parede	lajota
23	Viga	concreto
24	Viga	concreto
25	Viga	concreto
26	Viga	concreto
27	Viga	concreto
28	Viga	concreto
29	Piso	lajota
30	Teto	concreto
31 ao 121	Poltrona	
122	Piso	carpete
123	Piso	carpete

Tabela A3.1 - Tipos de superfície e material associados a cada elemento do modelo do Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

Teatro do CIC

Elemento	Descrição	Material
1	Piso do palco	Lona lisa sobre madeira
2	Piso do palco (frente)	Lona lisa sobre madeira
3	Corredor baixo	carpete
4	Piso da platéia	carpete
5	Piso da platéia	carpete
6	Piso da platéia	carpete
7	Corredor alto	carpete
8	Corredor alto	carpete
9	Piso da platéia (fundo)	carpete
10	Piso da platéia (fundo)	carpete
11	Parede direita	carpete
12	Piso da platéia (fundo)	carpete
13	Parede esquerda	carpete
14	-	-
15	Parede do fundo	carpete
16	Parede do fundo	carpete
17	Parede do fundo	carpete
18	Parede do fundo	carpete
19	Parede do fundo	carpete
20	Parede do fundo	carpete
21	Parede do fundo	carpete
22	Parede do fundo	carpete
23	Parede do fundo	carpete
24	Parede do fundo	carpete
25	Cubículo da porta	carpete
26	Cubículo da porta	carpete
27	Cubículo da porta	carpete
28	Cubículo da porta	carpete
29	Cubículo da porta	carpete
30	Cubículo da porta	carpete
31	Teto do cubículo	carpete
32	Parede do palco	carpete
33	Parede do palco	carpete
34	Parede do palco	carpete
35	Parede do palco	carpete
36	Parede do palco	carpete
37	Parede do palco	carpete
38	Parede do palco	carpete
39	Parede do palco	carpete
40	Parede da rampa do palco	carpete
41	Rampa do palco	carpete
42	Parede da rampa do palco	carpete
43	Rampa do palco	carpete
44	Lateral do palco	carpete
45	Lateral do palco	carpete
46	Batente do palco	carpete

47	Batente do palco	carpete
48	Batente do palco (cima)	carpete
49	Caixa do palco (parede da frente)	Ver obs. (3), no apêndice II
50	Caixa do palco (parede lateral)	Ver obs. (3), no apêndice II
51	Caixa do palco (parede lateral)	Ver obs. (3), no apêndice II
52	Caixa do palco (parede do fundo)	Ver obs. (3), no apêndice II
53	Teto da caixa do palco	Ver obs. (3), no apêndice II
54 a 73	Painéis	revestimento de fórmica
74 a 116	Poltrona	
117	Porta	madeira
118	Porta	madeira
119	Tubos laterais	alumínio
120	Parede lateral (em cima dos tubos)	carpete
121	Tubos laterais	alumínio
122	Parede lateral (em cima dos tubos)	carpete

Tabela A3.2 - Tipos de superfície e material associados a cada elemento do modelo do Teatro do CIC.

APÊNDICE 4

EQUAÇÕES PARA ALGUNS PARÂMETROS ACÚSTICOS

Definição (D)

$$D = \frac{\int_0^{0,08} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \times 100 (\%) \quad (\text{A4.1})$$

onde $p(t)$ é a resposta impulsiva (com relação à pressão sonora).

Fator de Clareza (“Clarity”)

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{0,08} p^2(t) dt}{\int_{0,08}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{A4.2})$$

Fração Lateral (LF)

$$LF = \frac{\int_{0,005}^{0,08} p_8^2(t) dt}{\int_0^{0,08} p^2(t) dt} \quad (\text{A4.3})$$

onde $p_8(t)$ é a resposta impulsiva medida com um microfone “figura 8”.

“Interaural Cross-Correlation Coefficient” (IACC)

A diferença entre o som percebido pelo ouvido esquerdo e aquele percebido pelo ouvido direito, devido a uma fonte sonora no palco, pode ser quantificada pela Função de Correlação Cruzada Inter-aural (IACF):

$$\text{IACF}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t)p_R(t + \tau)dt}{\left(\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t)dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t)dt\right)^{1/2}} \quad (\text{A4.4})$$

onde $p_L(t)$ e $p_R(t)$, são as respostas impulsivas medidas no ouvido esquerdo e direito, respectivamente. O valor máximo que esta função pode assumir é 1. Atribui-se o tempo $t=0$ ao instante em que som direto proveniente da fonte chega ao receptor. A integração de $t_1=0$ até t_2 corresponde à energia inicial da resposta impulsiva. Este intervalo de tempo corresponde, em geral, a 80 ms. Como o tempo necessário para o som ir de um ouvido a outro de uma pessoa é de 1 ms, varia-se τ de -1 a 1 ms. O valor máximo assumido por IACF, variando-se τ como descrito, é denominado "Interaural Cross-correlation Coefficient" (IACC):

$$\text{IACC} = |\text{IACF}(\tau)| \max \quad \text{para } -1 < \tau < +1 \quad (\text{A4.5})$$