

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO E ANÁLISE DA ACÚSTICA DE AMBIENTES SUBMETIDOS A
SISTEMAS DE ÁUDIO

Por

Leonardo Zanetti Rocha

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, abril de 2004.

ESTUDO E ANÁLISE DA ACÚSTICA DE AMBIENTES SUBMETIDOS A
SISTEMAS DE ÁUDIO

Por:

Leonardo Zanetti Rocha

Engenheiro Eletricista

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Eng. Alberto Tamagna

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Arq. Flávio Maya Simões

Prof. Dr. Eng. Herbert Martins Gomes

Prof. Dr. Eng. Adalberto Shuck Júnior

Prof. Dr. Jun Sergio Ono Fonseca

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 16 abril de 2004.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho e em especial:

Aos meus pais, Hermes e Edite, pelo apoio incondicional, pelo carinho, pela confiança e pela dedicação sem limites.

Às minhas irmãs, Luciana e Lauren, pela força e paciência nas horas difíceis;

Aos meus familiares, pelo pensamento positivo e desejo de boa sorte;

Aos meus amigos, André, Paulo, João, Artigas, Simone e Letícia pelo estímulo constante, pela inspiração, pelo aprendizado e pelo convívio que proporcionaram momentos inesquecíveis ao longo destes anos;

Ao meu orientador, amigo, e professor Alberto Tamagna pela oportunidade da realização deste trabalho;

Aos meus colegas e amigos do Gmap, Rubén, Sávio, Carlos Eduardo, Thiago, Rafael, Carla, Jonh, Carlos, Hervandil, Gustavo e demais, pelo companheirismo e ao prof. Ignácio Iturrioz pelo estímulo e aprendizado.

Aos funcionários da UFRGS, Margarida e Rui, pela ajuda e excelência no desempenho de suas funções;

E, por fim, À CAPES pelo investimento a min oferecido.

RESUMO

O crescente aprimoramento tecnológico ocorrido nos últimos anos principalmente nas áreas de eletrônica analógica e digital, proporcionou um grande desenvolvimento dos equipamentos destinados à captação, registro e reprodução sonora - componentes dos sistemas de áudio – tornando-os muito mais sofisticados e complexos. Por sua vez, estes sistemas de áudio encontram-se cada vez mais presentes em diversos tipos de ambientes tais como teatros, casa de shows e auditórios, cumprindo um papel fundamental na programação do recinto.

Entretanto, o projeto acústico destes ambientes, em sua grande maioria, não tem levado em consideração as características do sistema de áudio a ser instalado, resultando em prejuízo do desempenho acústico do ambiente e conseqüente insatisfação dos usuários. Somado a este fato, tem-se dado pouca atenção aos parâmetros de qualidade acústica de ambientes destinados à reprodução musical, inicialmente desenvolvidas por Beranek, 1962, abrindo-se mão, portanto, de ótimas ferramentas de análise que poderiam servir para melhorar o desempenho acústico destes ambientes.

Como conseqüência destes resultados, vem crescendo a idéia entre os profissionais da área de acústica e de áudio que o ideal é otimizar o sistema de som com o ambiente para que os melhores resultados sejam alcançados. É neste cenário que o presente trabalho se propõe a discutir as questões acústicas juntamente com as questões de áudio com o objetivo de apresentar os principais conceitos, técnicas e procedimentos referentes ao projeto e análise da acústica de ambientes e de sistemas de áudio.

Para tanto, foi realizada uma revisão bibliográfica que apresenta os parâmetros objetivos de qualidade acústica ambiental juntamente com um método de avaliação da qualidade acústica de salas, proposta por Arau, 1999. Também apresenta os principais conceitos que norteiam o projeto de sistemas de áudio, mostrando os principais equipamentos envolvidos e suas características técnicas.

Ainda foi realizado um estudo sobre as diversas técnicas de medição de resposta impulsiva com as quais os sistemas, tanto acústico quanto de áudio, podem ser caracterizados chegando a conclusão que a técnica de varredura logarítmica de seno é aquela que mais se adapta às medições acústicas por apresentar melhor relação sinal/ruído e imunidade à distorções inerentes aos transdutores eletromecânicos utilizados nestes tipo de medição.

Para concretizar os conceitos apresentados no trabalho é realizada uma análise do sistema som-ambiente do Salão de Atos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Como resultado desta análise conclui-se que a amplificação eletrônica, apesar de ser adequada para atender às necessidades da aplicação, tem sua capacidade limitada pelas caixas acústicas. Estas por sua vez, em conjunto com as características do ambiente, são capazes de proporcionar boa inteligibilidade de voz na área de cobertura. Também conclui-se que o ambiente de Salão de Atos possui absorção excessiva em médias-altas frequências e baixa audibilidade nas posições mais distantes do palco. Ainda, é mostrado que, devido ao posicionamento das caixas acústicas no palco, existem regiões na área da platéia que são atingidas pelo efeito de eco.

ABSTRACT

The technological improvement of the last years, mainly in the areas of analogical and digital electronics has provided a great development of the equipment designed to the sound captation, recording and reproduction – components of audio systems - becoming much more sophisticated and complex. In addition, these audio systems became common in different kinds of environments such as theaters, show houses and auditories, playing an important hule in the planning of the place.

However, the acoustic projects of these environments, in the majority, have not considered the characteristics of the audio system to be used, resulting in decrease of acoustic performance and, as a consequence, dissatisfaction among the users. Besides, little attention has been given to the acoustic quality parameters, initially developed by Beraneck, 1962, for places destined to musical reproduction, which are great analysis tools that could help on improving the acoustic performance of these environments.

As consequence of these results, professionals related to the acoustic and audio are getting in a common sense that the solution could be optimizing the sound system with the environment to achieve the best results. It is in this scene that this work propose to discuss the acoustic topics together with audio topics, having aiming to present the main concepts, techniques and procedures to the project and analysis of the acoustics of environments and audio systems.

A bibliographical revision presents the quantitative parameters of ambient acoustic quality and a method for the evaluation of the acoustic quality of rooms, proposed by Arau, 1999. It also presents the main concepts that guide the project of audio systems, showing the main equipment involved and its technical characteristics.

It is also presented a research on the several techniques of measurement of impulsive response by which the systems, even acoustic or audio, can be characterized – leading to the conclusion that the log sine swept technique shows the best performance to the acoustic measurements for presenting the best signal/noise relation and immunity to the inherent distortions found in the electromechanical transducers used for this kind of measurement.

An analysis of the sound system of the auditory of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), called Salão de Atos, is made to verify the concepts presented in this

project,. As result of this analysis, it can be conclude that the electronic amplification, despite of being capable of taking care of to the necessities of the room, has its ability limited by the speakers. Those, in turn, together with the characteristics of the environment, are capable of providing good intelligibility of speech in the covered area. It could also be conclude that the environment of Salão de Atos possesses extreme absorption in mid high- frequencies and low audibility in the most distant positions of the stage. It is also shown that, due to the positioning of the speakers, there are regions in the auditorium that are reached by an echo effect.

ÍNDICE

1.	Introdução.....	1
1.1	Revisão Histórica	1
1.2	Motivação do trabalho	4
1.3	Objetivos	5
2.	Teoria acústica.....	7
2.1	Introdução	7
2.2	O Som – Definições	7
2.3	Tipos de ondas sonoras	8
2.3.1	Onda Plana	8
2.3.2	Onda Esférica	9
2.3.3	Onda Estacionária	10
2.3.4	Onda produzida por um pistão circular rígido	11
2.4	Relação de Diretividade (Q).....	14
2.5	Ângulo de Cobertura	16
2.6	Onda produzida a partir de múltiplas fontes	16
2.7	Propagação sonora	17
2.8	Propagação sonora em campo livre	17
2.9	Propagação sonora em campo difuso (ambientes fechados).....	18
2.10	Modos de vibração numa sala retangular.....	20
2.11	Psicoacústica	23
2.12	Percepção sonora.....	23
2.13	Reflexões sonoras em ambientes fechados	24
3.	Acústica arquitetônica.....	27
3.1	Introdução	27
3.2	Termos descritores de percepção acústica	27
3.3	Atributos Acústico e Parâmetros Objetivos.....	30
3.3.1	Tempo de reverberação – T60.....	30
3.3.2	Tempo de decaimento inicial – EDT.....	35
3.3.3	Calidez - BR.....	36

3.3.4	Brilho – I_b	37
3.3.5	Clareza (clareza) – C80 e C50.....	37
3.3.6	Audibilidade – G.....	38
3.3.7	Espaciosidade – LF_E , $IACC_{E4}$	40
3.3.8	Envolvimento – $IACC_{L3}$, SDI.....	42
3.3.9	Intimidade – ITDG.....	43
3.3.10	Tempo Central – T_c	44
3.3.11	Definição – D50.....	44
3.3.12	Inteligibilidade – L&B, U50 e STI.....	45
3.4	Predição da qualidade acústica subjetiva.....	47
4.	Sistemas de Áudio.....	52
4.1	Introdução.....	52
4.2	Sistemas de Sonorização.....	53
4.3	Equipamentos de som.....	54
4.4	Microfones.....	55
4.4.1	Impedância.....	56
4.4.2	Resposta em Frequência.....	57
4.4.3	Sensibilidade.....	58
4.4.4	Ruído Térmico e Relação Sinal/Ruído.....	58
4.5	Amplificador de Potência.....	59
4.5.1	Potência de saída.....	61
4.5.2	Distorção Harmônica Total (THD).....	61
4.5.3	Distorção por Intermodulação (IMD).....	62
4.5.4	Relação Sinal/Ruído (S/R).....	63
4.5.5	Slew Rate (SR).....	63
4.5.6	Fator de Amortecimento (FA).....	63
4.6	Alto-falantes e Caixas de Som.....	64
4.6.1	Impedância Nominal.....	67
4.6.2	Máxima Potência Admissível.....	67
4.6.3	Sensibilidade.....	68
4.6.4	Ângulo de Cobertura.....	68
4.7	Consoles (<i>Mixers</i>).....	68

4.8	Processadores de sinal (periféricos).....	69
4.9	Projeto de sistemas de sonorização.....	70
4.10	Cobertura Sônica.....	71
4.10.1	Fonte única (<i>Cluster Central</i>).....	71
4.10.2	Fonte múltipla	73
4.10.3	Falantes Distribuídos (<i>Overhead</i>)	74
4.10.4	Pew Back.....	75
4.10.5	Fonte Única Dividida.....	76
4.10.6	Estereofonia	78
4.11	Nível Adequado	79
4.12	Inteligibilidade	81
4.13	Evitar Microfonia	82
4.14	Resposta em Frequência.....	85
5.	Técnicas de medição de resposta impulsiva.....	86
5.1	Introdução	86
5.2	Técnica de Impulso	89
5.3	Técnica TDS – Time Delay Spectrometry.....	91
5.4	Técnica MLS.....	93
5.5	Técnica IRS.....	97
5.6	Técnica TSP – <i>Time Stretched Pulse</i>	97
5.7	Técnica de varredura de seno - <i>SineSweep Technique</i>	101
6.	Análise eletroacústica do Salão de Atos da UFRGS.....	107
6.1	Introdução	107
6.2	Descrição do ambiente	108
6.3	Sistema de áudio instalado	108
6.4	Equipamentos de medida	109
6.5	Programas utilizados.....	110
6.6	Concepção e procedimento de medição	110
6.7	Calibragem do Sistema	112
6.8	Análise do Console	115
6.8.1	Taxa de amostragem de gravação - um breve comentário.....	119
6.9	Análise do amplificador	120

6.10	Análise do cabeamento	125
6.11	Análise das caixas acústicas.....	125
6.12	Análise acústica do Ambiente.....	131
6.13	Análise do Setor 1.....	133
6.14	Análise do Setor 2.....	138
6.15	Análise do Setor 11	141
6.16	Análise dos parâmetros de qualidade acústica do ambiente	143
6.16.1	Fator de força (G).....	143
6.16.2	Tempo de decaimento inicial (EDT).....	144
6.16.3	Tempo de reverberação (T60).....	146
6.16.4	Fator de Baixo (BR).....	147
6.16.5	Clareza e Definição (C50, C80 e D50).....	148
6.16.6	Tempo central (<i>center time</i>) (Tc).....	151
6.17	Ruído Ambiente	153
6.18	Comparação – MLS X Sinesweep	153
6.19	Comparação dos parâmetros acústicos – Salão de Atos X outros auditórios	156
6.20	Fator de Mérito do Salão de Atos da UFRGS	159
7.	Análise dos resultados.....	160
7.1	Console.....	160
7.2	Amplificador	160
7.3	Cabeamento.....	163
7.4	Caixas Acústicas	163
7.5	Resposta em frequência do ambiente.....	164
7.6	Análise dos resultados dos parâmetros de qualidade acústica	165
8.	Considerações Finais	171
8.1	Conclusões	171
8.2	Sugestões para desenvolvimentos futuros	172
9.	Referências Bibliográficas	173
	APÊNDICE A	177
	APÊNDICE B	179
	APÊNDICE C	182
	APÊNDICE D.....	184

D.1 Setor 1	184
D.2 Setor 2	185
D.3 Setor 3	186
D.4 Setor 4	187
D.5 Setor 5	188
D.6 Setor 6	189
D.7 Setor 7	190
D.8 Setor 8	191
D.9 Setor 9	192
D.10 Setor 10	193
D.11 Setor 11	194
APÊNDICE E.....	195
APÊNDICE F.....	201

LISTA DE SÍMBOLOS

$\overline{p^2}$	Valor eficaz da pressão sonora	[Pa]
$\overline{p^2}_{\theta, \phi}$	Valor eficaz da pressão sonora num ponto em torno de uma fonte sonora qualquer	[Pa]
a	Amplitude de deslocamento de uma partícula	[m]
A	Tensão máxima	[V]
ALCONS%	Índice percentual de Perda de Articulação consonantal	[ad.]
At	Área de absorção total do ambiente	[m ²]
aten(D2)	Atenuação sonora na distância D2	[dB]
aten(r)	Atenuação sonora na distância r	[dB]
c	Velocidade do som no meio	[m/s]
C50	Parâmetro de claridade	[dB]
C80	Parâmetro de claridade	[dB]
C ₈₀	Valor do parâmetro relativo a Claridade medido no ambiente	[dB]
CAC	Pressão sonora do campo acústico	[Pa]
D ₀	Maior distância entre um ouvinte e o orador	[m]
D ₁	Distância entre o microfone e o alto-falante	[m]
D ₂	Distância entre a fonte e a posição mais afastada da área de cobertura	[m]
D50	Parâmetro de Definição	[ad.]
D ₅₀	valor do parâmetro relativo a Definição medido no ambiente	[ad.]
d _c	Distância crítica	[m]
DI	Índice de diretividade	[graus]
d _i	Coefficiente de difusão sonora da i-ésima superfície interna de um recinto	[ad.]
D _s	Distância entre o orador e o microfone	[m]
DUT	Dispositivo sob teste	
EAD	Distância acústica equivalente	[m]
EDT _{mid}	tempo de decaimento inicial (EDT) medido em médias frequências	[s]
EDT _{vz}	tempo de decaimento inicial sem audiência	[s]
EPR	Potência elétrica necessária	[W]
EPR _{TOTAL}	Potência elétrica total necessária	[W]
f	Frequência	[Hz]
F ₀	Valor da frequência do primeiro ponto nulo de um sinal sob efeito de filtragem pente	[Hz]
FA	Fator de amortecimento	[ad.]
f _g	Frequência de ressonância (caso unidimensional)	[Hz]
f _{g,h,i}	Frequência de ressonância (caso tridimensional)	[Hz]
F _N	Espaçamento de frequência entre os subseqüentes pontos nulos de um sinal sob efeito de filtragem pente	[Hz]
f _s	Frequência de amostragem de um sinal	[Hz]
FSM	Margem para estabilidade de Realimentação	[dB]
f _{xx} (t)	Função de auto-correlação	
f _{xy} (t)	Função de correlação cruzada entre x(t) e y(t)	
G	Fator de Força	[dB]

g, h, i	Números inteiros	[ad.]
G_m	Fator de Força médio medido no ambiente	[dB]
H(f)	Função de resposta em frequência	
H(n)	Atraso de tempo para uma frequência n de um sinal TSP	
H(p)	Transformada de Laplace de h()	
h(t)	Resposta impulsiva do sistema	
h(τ)	Função de ponderação (função de resposta impulsiva unitária)	
h'[n]	Resposta impulsiva periódica	
I	Intensidade sonora	[W/m ²]
IACC	Coeficiente de correlação interaural	[ad.]
IACC _{E4}	Parâmetro de Espaciosidade	[ad.]
IACC _{L3}	Parâmetro de Envolvimento	[ad.]
IACF	Função de correlação cruzada interaural	
I _B	Índice de Brilho medido no ambiente	[ad.]
I _c	Índice de Calidez medido no ambiente	[ad.]
IMD	Distorção por intermodulação	[ad.]
ITDG	Intervalo de tempo de atraso inicial	[s]
I _{θ, ϕ}	Intensidade sonora num ponto em torno de uma fonte sonora qualquer	[W/m ²]
j	Unidade imaginária	[-1 ^{1/2}]
k	Número de onda	[m ⁻¹]
L	Distância unidimensional	[m]
L&B	Parâmetro de Locner e Burguer	[dB]
LF _E	Parâmetro de Espaciosidade	[ad.]
LFX	Largura de faixa da resposta em frequência nominal do microfone	[Hz]
L _{MLS}	Comprimento da seqüência MLS	
ln	Logarítmo natural	
log	Logarítmo de base 10	
LTI	Sistema linear invariante no tempo	
L _x , L _y , L _z	Dimensões de comprimento, largura e altura	[m]
M	Fator multiplicativo de dc	[ad.]
m	Constante de atenuação do meio	[m ⁻¹]
M _{brilho}	fator de mérito relativo ao Brilho	[ad.]
M _{calidez-música}	fator de mérito relativo à Calidez quando o programa é música	[ad.]
M _{calidez-teatro}	fator de mérito relativo à Calidez quando o programa é teatro	[ad.]
M _{claridade-concerto}	fator de mérito relativo à Claridade quando o programa é concerto	[ad.]
M _{claridade-ópera}	fator de mérito relativo à Claridade quando o programa é ópera	[ad.]
M _{claridade-teatro}	fator de mérito relativo à Claridade quando o programa é teatro	[ad.]
M _{def-concerto}	fator de mérito relativo à Definição quando o programa é concerto	[ad.]
M _{def-ópera}	fator de mérito relativo à Definição quando o programa é ópera	[ad.]
M _{def-teatro}	fator de mérito relativo à Definição quando o programa é teatro	[ad.]
M _{EDT-concerto}	fator de mérito relativo ao EDT quando o programa é concerto	[ad.]
M _{EDT-ópera}	fator de mérito relativo ao EDT quando o programa é ópera	[ad.]
M _{EDT-teatro}	fator de mérito relativo ao EDT quando o programa é teatro	[ad.]
M _G	fator de mérito relativo à Audibilidade	[ad.]

M_{GLOBAL}	fator de mérito global	[ad.]
M_i	fator de mérito do i -ésimo parâmetro	[ad.]
M_{int}	fator de mérito relativo ao parâmetro ITDG	[ad.]
M_{T60mid}	fator de mérito relativo ao parâmetro T60	[ad.]
MTF	Função de transferência de modulação	
N	Fator multiplicativo de dc	[ad.]
NAG	Ganho acústico necessário	[dB]
NOM	Número de microfones simultaneamente abertos	[ad.]
NPD	Nível de programa desejado	[dB]
NPS	Nível de pressão sonora	[dB]
NPS(EAD)	Nível de pressão sonora na distância EAD	[dB]
NPS(r)	Nível de pressão sonora na distância r	[dB]
NPS(r_{ref})	Nível de pressão sonora na distância r_{ref}	[dB]
NPS _A	Nível de pressão sonora sem influência de reflexões sonoras	[dB]
NPS _a	Nível de pressão sonora oriunda apenas das reflexões laterais	[dB]
NPS _{axial}	Nível de pressão sonora num ponto do eixo principal	[dB]
NPS _R	Nível de pressão sonora com influência de reflexões sonoras	[dB]
NRA	Nível médio de ruído ambiente	[dB]
NWS	Nível de Potência sonora	[dB]
NWS _D	Nível de potência sonora produzida pelas fontes de irradiam som direto para um ouvite	[dB]
NWS _R	Nível de potência sonora produzido pelas fontes de contribuem para a formação do campo reverberante	[dB]
p	Pressão sonora	[Pa]
p(t)	Variação temporal da pressão sonora RMS num dado ponto do ambiente	[Pa]
PAG	Ganho acústico potencial	[dB]
P _{F8}	Pressão sonora RMS captada por um microfone com o padrão polar em “figura 8”	[Pa]
P _{L,R}	Pressão sonora RMS nos sensores esquerdo (L) e direito (R) de um microfone do tipo dummy head.	[Pa]
PS(r)	Propagação sonora na distância r	[dB]
Q	Fator de diretividade	[ad.]
Q ₁	Fator de diretividade de apenas uma fonte sonora	[ad.]
Q _{axial}	Fator de diretividade em relação ao eixo principal	[ad.]
Q _{DISPONÍVEL}	Relação de diretividade do alto-falante escolhido para cobrir adequadamente sua área de abrangência	[ad.]
Q _{MIN}	Relação de diretividade mínima para se alcançar um determinado grau de inteligibilidade tal que ALCONS = 15%	[ad.]
Q _n	Fator de diretividade adicional devido ao empilhamento de fontes	[ad.]
r	Distância radial	[m]
R/S	Relação ruído/sinal	[dB]
r _a	Raio de uma fonte esférica	[m]
r _A	Distância de 10m entre fonte e receptor	[m]
r _{ref}	Distância de referência (geralmente 1m)	[m]
r _s	Raio de uma esfera vibrante geradora de uma onda esférica	[m]
S	Área de uma superfície	[m ²]

S/R	Relação sinal/ruído	[dB]
SAG	Ganho mínimo suficiente para reconstruir em D0 as condições de audição na distância EAD	[dB]
S_{axial}	Sensibilidade axial do cluster	[dB]
SDI	Índice de difusão sonora	[ad.]
s_i	Área da i -ésima superfície interna de um recinto	[m ²]
S_{np}	Nível de Potência	[dBm/10Pa]
SR	Slew rate	[V/ μ s]
STI	Índice de transmissão da fala	[ad.]
S_v	Sensibilidade do microfone	[dB/volt/Pa]
t	tempo	[s]
T60	Tempo de reverberação	[s]
$T_{60_{125,250,500,1K,2K,4K}}$	Tempo de reverberação nas bandas de frequência de 125, 250, 500, 1K, 2K e 4KHz	[s]
$T_{60_{mid}}$	tempo de reverberação medido em médias frequências	[s]
$T_{60_{opt}}$	tempo de reverberação ótimo	[s]
T_c	Tempo central	[s]
THD	Distorção harmônica total	[ad.]
TN	Ruído térmico do microfone	[dB/V]
T_{oc}	tempo de reverberação com audiência	[s]
TPM	Margem de picos e transientes	[dB]
u	rapidez	[m/s]
U	Velocidade volumétrica da fonte	[m ³ /s]
U_0	Amplitude da velocidade superficial	[m/s]
U50	Parâmetro de Inteligibilidade	[dB]
u_s	velocidade radial de uma partícula na superfície de uma fonte (velocidade superficial)	[m/s]
V	Volume	[m ³]
V_0	Tensão de saída do amplificador sem carga conectada	[V]
V_1	Tensão de saída da fundamental	[V]
VCA	Tensão de circuito aberto na saída do microfone	[V]
V_i	Tensão de saída do i -ésimo harmônico do sinal	[V]
V_L	Tensão de saída do amplificador com carga conectada	[V]
V_{RMS}	Tensão quadrática média do sinal de saída	[V]
w	Frequência angular	[rd/s]
W	Potência sonora	[W]
x	Distancia	[m]
x(t)	Função qualquer dependente do tempo	
x[n]	Valores de uma seqüência IRS	
y(t)	Função qualquer dependente do tempo	
Z	Impedância do microfone	[Ω]
ZC	Impedância nominal da carga	[Ω]
ZL	Impedância de saída do amplificador	[Ω]
α	Coefficiente de absorção de Sabine	[m ²]
α_m	Coefficiente de absorção médio de Sabine	[m ²]
α_p	Coefficiente de absorção médio de Sabine da superfície mais absorvente sobre a qual incide os sons diretos	[m ²]

ε	Densidade de energia sonora estacionária	[Ws/ m ³]
$\varepsilon(t)$	Densidade de energia sonora estacionária num tempo t	[Ws/ m ³]
ε_0	Densidade de energia sonora estacionária no início do processo de decaimento	[Ws/ m ³]
ε_d	Densidade de energia sonora estacionária do campo direto	[Ws/ m ³]
ε_r	Densidade de energia sonora estacionária do campo reverberante	[Ws/ m ³]
ϕ	Ângulo perpendicular a superfície de uma fonte sonora no sentido vertical	
λ	Comprimento de onda	[m]
π	Número Pi	3,1415..
θ	Ângulo perpendicular a superfície de uma fonte sonora no sentido horizontal	[graus]
θ_1	Ângulo limite da do lobo principal	[graus]
θ_2	Ângulo limite do lobo secundário	[graus]
ρ	Densidade específica do meio	[Kg/m ³]
τ	tempo	[s]

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – (A)Uma vista instantânea das regiões de compressão e rarefação do ar. (B)Variação da pressão numa onda sonora. Fonte: Everest, 2001.	8
Figura 2.2 – Gráfico da amplitude da pressão na região de campo próximo (near field) produzida por um pistão rígido montado num baffle infinito. Fonte: Borwick, 1994.	12
Figura 2.3 – Gráfico da função de diretividade no campo afastado (far field) para um pistão rígido montado num baffle infinito. Fonte: Borwick, 1994.	13
Figura 2.4 – Gráfico dos padrões de diretividade para diferentes frequências de um pistão circular rígido montado num baffle infinito. Fonte: Borwick, 1994.	14
Figura 2.5 – Tipos de diretividade de uma fonte sonora de acordo com seu lugar de instalação. Fonte: Arau, 1999.	15
Figura 2.6 – Gráfico da propagação sonora em campo livre e difuso. D_c é a Distância Crítica. Fonte: Cysne, 2000.	20
Figura 2.7 – Gráfico que relaciona o tempo de atraso entre dois sons diretos e o nível de cada um deles com o efeito audível resultante. Fonte: Everest, 2001.	26
Figura 3.1 - Curva de decaimento com taxas de inclinação diferentes. Fonte: Everest, 2001.	33
Figura 3.2 - Variação do coeficiente α em função do atraso da reflexão em relação ao som direto. Fonte: Barron, 1993.	46
Figura 4.1 – Padrão polar de um microfone supercardióide. Fonte: Shure, Microphone technique for music – Sound Reinforcement.	56
Figura 4.2 – Esquemático do tipo de saída de microfone (a)balanceada e (b) desbalanceada. Fonte: Shure, Microphone technique for music – Sound Reinforcement.	57
Figura 4.3 – Corte esquemático de um alto-falante. Fonte: Cysne, 2000.	65
Figura 4.4 – Diagrama simplificado de uma console estéreo de 3 canais. Fonte: Cysne, 2000.	69
Figura 4.5 – Tipos de processadores de sinais. Fonte: Cysne, 2000.	70
Figura 4.6 – Exemplo de utilização de Fonte Única (cluster central). Fonte: Cysne, 2000.	72
Figura 4.7 – Exemplo de utilização de Fonte Múltipla. Fonte: Cysne, 2000.	74
Figura 4.8 – Variantes do padrão quadrado. (a) extremidade com extremidade e (b) sobreposição de centro a centro. Fonte: Cysne, 2000.	74
Figura 4.9 – Exemplo de utilização de Pew Back. Fonte: Cysne, 2000.	75

Figura 4.10 – Efeito Comb Filter. Fonte: Everest, 2001.	77
Figura 4.11 – Exemplo de Fonte Única com indicação das distâncias envolvidas no cálculo dos ganhos acústicos. Fonte: Cysne, 2000.	84
Figura 5.1 – Esquema em blocos da entrada e saída de um sistema.	86
Figura 5.2 – Função complexa que descreve um pulso no domínio frequência. (a) é a parte real e (b) parte imaginária (igual a zero).Fonte: Aoshima, 1981.	90
Figura 5.3 - Parte real da transformada inversa de Fourier da função dado pela Figura (2). A parte imaginária é constante com valor zero. Fonte: Aoshima, 1981.	91
Figura 5.4 - Pulso gerado a partir da conexão da primeira e da última parte do gráfico da Figura 5.3.Fonte: Aoshima, 1981	91
Figura 5.5 – Diagrama em blocos de um analisador TDS. Fonte: Muller, 2002.	92
Figura 5.6 – Diagrama em blocos que representa uma relação recursiva geradora de uma seqüência MLS. Fonte: Gomes, 1998.....	94
Figura 5.7 – Gráfico da resposta em frequência de uma sinal MLS.	95
Figura 5.8 – Sonograma de sinal MLS.....	95
Figura 5.9 - Parte real, simétrica, da função complexa dada pela equação (102).Fonte: Aoshima,1981.....	98
Figura 5.10 - Parte imaginária, anti-simétrica, da função complexa dada pela equação (102).Fonte: Aoshima, 1981.	99
Figura 5.11 – Função no tempo que representa o sinal TSP.	99
Figura 5.12 – Diagrama de blocos considerando os efeitos de ruído e de não-linearidades inerentes ao sistema. Fonte: Archambeau et. al., 2002	102
Figura 5.13 – Gráfico da resposta em frequência de um sinal de varredura logarítmica de seno.	105
Figura 5.14 – Sonograma de um sinal de varredura logarítmica de seno.	106
Figura 6.1 – Diagrama em blocos do sistema eletroacústico existente no Salão de Atos da UFRGS.	112
Figura 6.2 – Curva de resposta em frequência da placa de áudio com sua entrada ligada à saída através de umcabo P10/P10 de 3m.	113
Figura 6.3 – Curva de resposta em frequência da placa de áudio com o Direct Box conectado entre a sua entrada e sua saída. A entrada conecta o DI através de um cabo P10estéreo/XRL e a saída conecta o DI através de um cabo P10/P10.....	113

Figura 6.4 - Resposta em frequência do sistema composto pela placa de áudio mais 8 cabos XLR/XLR de 5m cada e mais o Direct Box.....	114
Figura 6.5 - Curvas de calibragem para os experimentos que utilizam a (acima) placa de áudio + cabos (40m) + DI e a (abaixo) placa + cabo (3m) + DI.	115
Figura 6.6 - Esquemático da montagem do sistema de medição para a análise da console.....	116
Figura 6.7 - Gráfico do sinal de excitação (acima) em função do tempo e (abaixo) o sonograma.. ..	116
Figura 6.8 - Gráfico da resposta da console (acima) em função do tempo e (abaixo) o sonograma.	117
Figura 6.9 - Gráfico da amplitude relativa versus frequência dos sinais de excitação (varredura) e resposta (console).	118
Figura 6.10 - Gráfico da resposta em frequência (ganho) da console.	118
Figura 6.11 - Esquemático da montagem do sistema de medição para a análise da console.....	120
Figura 6.12 - Resposta em frequência do amplificador sem calibração (a) e com calibração (b).	121
Figura 6.13 - Gráfico da resposta em frequência do amplificador submetido a um sinal de 1KHz para a verificação da taxa de distorção harmônica (THD).	122
Figura 6.14 - Gráfico da resposta impulsiva em função do tempo. Detalhe para os primeiro e segundo harmônicos que surgem, respectivamente, 0,9s e 1,42s antes da resposta impulsiva sem distorção.	123
Figura 6.15 – Sonograma da resposta impulsiva do amplificador.	124
Figura 6.16 - Gráfico da FFT da resposta do amplificador quando submetido a um sinal de 7KHz e 60Hz, mixados numa proporção de 4:1 para avaliação da distorção por intermodulação(IMD).....	124
Figura 6.17 - Gráfico da resposta em frequência dos cabos que levam o sinal de áudio da cabine de som (house mix) até o palco do Salão de Atos.	125
Figura 6.18 – Esquemático da captação do sinal de áudio para a análise das caixas acústicas (cluster).	126
Figura 6.19 - Gráfico, em função do tempo, da resposta impulsiva adquirida na montagem da Figura 6.18. Em vermelho, a parte do sinal referente ao som direto e, em azul, às demais reflexões.	126

Figura 6.20 - Esquemático da montagem do sistema de medição para a análise do conjunto de caixas acústicas.....	127
Figura 6.21 - Gráfico da resposta em frequência do cluster esquerdo (L).....	127
Figura 6.22 – Sonograma da resposta do cluster esquerdo (L).	128
Figura 6.23 – Gráfico da resposta em frequência do cluster direito (R).	129
Figura 6.24 - Diagramas de cobertura horizontal para as frequências de 125Hz a 1KHz. α_c é o ângulo de cobertura e Q a relação de diretividade.	130
Figura 6.25 - Diagramas de cobertura horizontal para as frequências de 2KHz a 16KHz. α_c é o ângulo de cobertura e Q a relação de diretividade.	131
Figura 6.26 – Planta baixa do Salão de Atos da UFRGS. Platéia dividida em setores.	132
Figura 6.27 – Esquemático da montagem do sistema de medição para a análise acústica em cada posição (setor).	132
Figura 6.28 - Gráfico da resposta em frequência medida no setor 1 (cadeira 37E). L, R e ST indicam o cluster esquerdo, direito e ambos emitindo o sinal de excitação, respectivamente.	134
Figura 6.29 – Ganho acústico do setor 1 (cadeira 37E).	135
Figura 6.30 - Gráfico da resposta impulsiva medida no setor 1, em função do tempo, para as configurações (a) L, R e (b) ST.	135
Figura 6.31 – Curvas de decaimento da resposta impulsiva para as bandas de 1/10 de oitava. Em vermelho, a curva quadrática da resposta impulsiva e em azul, a curva de tendência de decaimento.....	138
Figura 6.32 - Gráfico da resposta em frequência medida no setor 2 (cadeira 01E). L, R e ST indicam o cluster esquerdo, direito e ambos emitindo o sinal de excitação, respectivamente.	138
Figura 6.33 – Ganho acústico do setor 2 (cadeira 01E).	139
Figura 6.34 - Gráfico da resposta impulsiva medida no setor 2, em função do tempo, para as configurações (a) L, R e (b) ST.	140
Figura 6.35 - Gráfico da resposta em frequência medida no setor 11 (cadeira 56U). L, R e ST indicam o cluster esquerdo, direito e ambos emitindo o sinal de excitação, respectivamente.	141
Figura 6.36 – Ganho acústico do setor 11 (cadeira 56U).....	141

Figura 6.37 - Gráfico da resposta impulsiva medida no setor 11, em função do tempo, para as configurações (a) L, R e (b) ST.	142
Figura 6.38 - Gráfico do parâmetro G em função das posições para as configurações L e R. ...	143
Figura 6.39 - Gráfico de G em função da frequência em alguns setores do auditório com referência ao conjunto R.	144
Figura 6.40 - Gráfico do EDT, em função dos setores, para as baixas, médias e altas frequências, com referência ao conjunto L.	145
Figura 6.41 - Gráfico do EDT, em função dos setores, para as baixas, médias e altas frequências, com referência ao conjunto R.	145
Figura 6.42 - Gráfico do T60, em função dos setores, para as baixas, médias e altas frequências, com referência aos conjunto L e R.	146
Figura 6.43 - Gráfico do fator de baixo (BR) em função das posições.	148
Figura 6.44 - Gráfico do C50 em função das posições, com referência a configuração ST.	149
Figura 6.45 - Gráfico do C80 em função das posições, com referência a configuração ST.	149
Figura 6.46 - Gráfico do D50 em função das posições, com referência a configuração ST.	150
Figura 6.47 - Gráfico do C50 em função da frequência, com referência a configuração ST, em alguns setores do auditório.	150
Figura 6.48 - Gráfico do C80 em função da frequência, com referência a configuração ST, em alguns setores do auditório.	151
Figura 6.49 - Gráfico do D50 em função da frequência, com referência a configuração ST, em alguns setores do auditório.	151
Figura 6.50 - Gráfico do Center Time em função das posições, com referência a configuração ST.	152
Figura 6.51 - Gráfico do Center Time em função da frequência, com referência a configuração ST.	152
Figura 6.52 - Gráfico comparativo da relação Sinal/Ruído em função dos setores, entre as técnicas de varredura logarítmica de seno e MLS.	154
Figura 6.53 - Gráfico comparativo da relação sinal/ruído em função da frequência, entre as técnicas de varredura logarítmica de seno e MLS.	155
Figura 6.54 - Gráfico da diferença percentual, em função da frequência, dos parâmetros medidos com a MLS em relação aos parâmetros medidos com a varredura logarítmica de seno.	156

Figura 7.1 – Gráfico do atraso versus a diferença de nível de dois sons diretos, aproximado pelas equações y_1 e y_2 , baseado no gráfico da Figura 2.7.	167
Figura 7.2 – Mapeamento do efeito de eco no Salão de Atos da UFRGS, considerando a disposição atual das caixas, ambas operando com mesmo nível de pressão sonora.	168
Figura 7.3 – Mapeamento do efeito de eco no ambiente com os clusters aproximados em 2m (esquerda) e 2,5m (direita) em relação a disposição original.	169
Figura 7.4 – Mapeamento de efeito de eco com os clusters na posição original. (esquerda) o nível do cluster L é 2,0 dB maior que o nível do cluster R e na (direita) é 6,0 dB maior.	169
Figura 7.5 – Mapeamento do efeito de eco. (esquerda) cluster L está disposto 1m para trás e o cluster R 1m para frente em relação a posição original.(direita) o cluster L é posicionado 2m a frente com aumento de nível de 2,0 dB.	169
Figura A 1 – Planta baixa do Salão de Atos da UFRGS com indicação das distâncias das posições de medida (setores), parlatório (quadrado azul) e assento mais distante (circulo azul). Fonte: Arquivo, UFRGS.	178
Figura A 2 – Corte AA. Fonte: Arquivo, UFRGS	178
Figura B 1 – Controles do painel frontal da Console. Fonte: Yamaha, Manual da Console.	179
Figura B 2 – Especificações gerais da console. Fonte: Yamaha, Manual da Console.	180
Figura B 3 – Especificações de entrada e saída da console. Fonte: Yamaha, Manual da console	181
Figura C 1 – Funções dos painéis frontal e traseiro do amplificador. Fonte: Staner Manual do amplificador.	182
Figura C 2 – Especificações técnicas do amplificador. Fonte: Staner, Manual do amplificador.	183
Figura E 1 – Relação entre $AL_{CONS}\%$, o tempo de reverberação, T60, e a relação sinal/ruído, S/R. Fonte: Cysne, 2000.	196
Figura E 2 – Respostas de frequência naturais de instrumentos musicais e vozes humanas. Fonte: Cysne, 2000.	197

Figura E 3 – Tempo de Reverberação ótimo de acordo com o volume do ambiente. Fonte: Norma, 1998	198
Figura E 4 – Foto da platéia alta do Salão de Atos da UFRGS com detalhe ao equipamento de medida a frente e a cabine de som (<i>house mix</i>) ao fundo.	199
Figura E 5 – Foto tirada do palco do Salão de Atos da UFRGS, com detalhe do cluster esquerdo e platéia baixa mostrando os difusores acústicos instalados nas paredes.....	199
Figura E 6 – Foto tirada na cabine de som (<i>house mix</i>) mostrando os equipamentos de áudio a frente e o palco ao fundo.	200

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores de tempo de reverberação ótimos para salas de múltiplo uso. Fonte: Barron,1993	33
Tabela 4.1 – Padrões polares dos microfones. Fonte: Cysne, 2000	56
Tabela 4.2 – Características das classes de amplificadores. Fonte: Valle, 2003.....	60
Tabela 4.3 – Valores típicos de THD. Fonte: Valle, 2003.	62
Tabela 4.4 – Características principais dos alto-falantes de acordo com o tipo. Fonte: Cysne, 2000	65
Tabela 4.5 – Características principais das caixas acústicas de acordo com o tipo. Fonte:Cysne, 2000	66
Tabela 4.6 – Valores de nível de pressão sonora de acordo com o estilo musical. Fonte: Martins, 2002.	79
Tabela 6.1 – Relação entre as posições de medida (setores) e a numeração das cadeiras.	133
Tabela 6.2 – Amplitude e tempo em que ocorrem as primeiras reflexões no setor 11.	140
Tabela 6.3 - Tabela comparativa entre os parâmetros acústicos medidos em diversas salas no mundo e faixa de valores ótimos. Fonte: Barron, 1993, Creder, 1996 e Gomes, 1998.....	156
Tabela 6.4 - Fatores de mérito e Fator de Mérito Global para o Salão de Atos da UFRGS.	159
Tabela D 1 – Parâmetros de qualidade acústica. Setor 1, cluster esquerdo.	184
Tabela D 2 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 1, cluster direito.	184
Tabela D 3 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 1, ambos clusters.	184
Tabela D 4 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 2, cluster esquerdo.	185
Tabela D 5 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 2, cluster direito.	185
Tabela D 6 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 2, ambos clusters.	185
Tabela D 7 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 3, cluster esquerdo.	186
Tabela D 8 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 3, cluster direito.	186
Tabela D 9 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 3, ambos clusters.	186
Tabela D 10 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 4, cluster esquerdo.	187
Tabela D 11 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 4, cluster direito.	187
Tabela D 12 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 4,ambos clusters.	187

Tabela D 13 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 5, cluster esquerdo.	188
Tabela D 14 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 5, cluster direito.	188
Tabela D 15 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 5, ambos clusters.	188
Tabela D 16 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 6, cluster esquerdo.	189
Tabela D 17 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 6, cluster direito.	189
Tabela D 18 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 6, ambos clusters.	189
Tabela D 19 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 7, cluster esquerdo.	190
Tabela D 20 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 7, cluster direito.	190
Tabela D 21 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 7, ambos clusters.	190
Tabela D 22 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 8, cluster esquerdo.	191
Tabela D 23 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 8, cluster direito.	191
Tabela D 24 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 8, ambos clusters.	191
Tabela D 25 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 9, cluster esquerdo.	192
Tabela D 26 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 9, cluster direito.	192
Tabela D 27 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 9, ambos cluster s.	192
Tabela D 28 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 10, cluster esquerdo.	193
Tabela D 29 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 10, cluster direito.	193
Tabela D 30 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 10, ambos clusters.	193
Tabela D 31 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 11, cluster esquerdo.	194
Tabela D 32 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 11, cluster direito.	194
Tabela D 33 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 11, ambos clusters.	194
Tabela E 1 – Nível sonoro alcançado em determinadas atividades.Fonte: Cysne, 2000.	195
Tabela E 2 – Tempo de exposição máximo a um determinado nível sonoro.Fonte: Cysne, 2000.	195
Tabela E 3 – Valores do coeficiente de absorção, α , para alguns materiais.Fonte: Cysne, 2000.	196
Tabela E 4 – Correspondência entre STI / RASTI e %ALcons. Fonte: Isbert, 1998.	196

1. Introdução

1.1 Revisão Histórica

“A vida é cheia de sons e nós queremos ouvir aqueles agradáveis e vitais; enquanto que os desagradáveis e perigosos, queremos evitar”.

Esta afirmativa feita por Robert Bruce Lindsay na introdução do livro “The theory of sound” [Rayleigh, 1945], antecipando uma ciência que posteriormente iria se desenvolver como sendo a acústica, resume os objetivos dos trabalhos que vêm sendo realizados atualmente em diversas áreas desta ciência, hoje entendida como sendo a parte da Física que estuda as vibrações e ondas mecânicas nos meios materiais [Nepomuceno, 1968], dentre elas a acústica arquitetônica que envolve controle de ruído e conforto ambiental, a psicoacústica que procura entender como nós percebemos os sons que nos rodeiam e como estes influenciam o nosso bem estar e a acústica das comunicações onde se desenvolvem projetos de sistemas que possam captar, armazenar, reproduzir e transmitir um determinado evento sonoro.

Muito antes de qualquer investigação científica a respeito do som, a produção de sons musicais já era há muito conhecida. Neste tempo a acústica, assim como a maioria das ciências, estava ligada a idéias filosóficas por vezes até mística. O filósofo chinês Fohi (30 AC) ligou a altura dos sons aos cinco elementos fundamentais: Terra, Ar, Fogo, Água e Vento. Tem-se notícia de que tanto os hindus primitivos quanto os antigos árabes já tinham uma maneira de dividir os tons de uma oitava, criando sua própria escala musical.

Ainda na antiguidade, já se especulava que o som tivesse o mesmo comportamento ondulatório que era observado nas ondas geradas na água. A noção de uma fonte gerando um distúrbio oscilatório que se propaga num meio era enfatizada por alguns pensadores da época. Aristóteles (384-322 A.C.) já tinha uma idéia bastante consistente de que o som viajava “empurrando” o ar e que “permanecia inalterado em qualidade tão longe quanto fosse a força da fonte que o gerou” [Rayleigh, 1945].

Credita-se ao filósofo Grego Pythagoras, no século sexto A.C., os primeiros estudos dos sons musicais. Pythagoras comparou duas cordas esticadas, presas nas pontas e de tamanhos diferentes, observou que a menor delas emitia um som de tom mais alto que a de maior

comprimento e concluiu que se a corda menor tivesse a metade do tamanho da maior, o tom produzido seria de uma oitava acima.

Essa noção de altura sonora, entretanto, só foi associada à frequência de vibração da corda alguns séculos depois com Mersenne (1588-1648) no seu trabalho “*Harmonicaum Libri*”, editado em 1636, no qual, pela primeira vez, determina a frequência de vibração de um corda, e com Galileu, em 1638, no seu “*Mathematical Discourses Concerning Two New Sciences*”, através de suas observações com pêndulos. Nessa época, os pesquisadores baseavam-se pura e simplesmente na sua audição como instrumento de medida do evento sonoro.

Após Galileu, muitos outros contribuíram, direta ou indiretamente, para o estudo do som: Sauveur (1653-1716) - que sugeriu pela primeira vez o nome de *acústica* para o estudo do som, os matemáticos Taylor (1685-1731), D’Alembert (1717-1783) e Euler (1707-1783) - pelos seus estudos que resultaram na conhecida equação do movimento, Bernoulli (1700-1782) - que “descobriu” o princípio da superposição e Fourier (1768-1830), com a sua famosa expansão senoidal que até hoje é utilizada em acústica.

Em 1802, temos a publicação de “*Die Akustik*” de E.F.F. Chlandi, um grande experimentador e que neste trabalho analisou em detalhe as vibrações em placas, resultado de anos de experimentos por ele realizados. Mais tarde, em 1850, Kirchoff (1824-1887) nos fornece uma teoria mais acurada em relação às placas vibrantes.

No início do século XIX, temos a descoberta da eletricidade e as teorias de Maxwell, Faraday, Hertz e outros, sendo iniciada a teoria da elasticidade com Navier, Cauchy, Clausius, Stokes, que começaram a dar forma ao estudo da acústica.

Reunindo esses conhecimentos e seus mais de 450 trabalhos publicados na área, temos em 1877 o livro “*The Theory of Sound*”, do inglês Lord Rayleigh (1842-1919). Seu trabalho é considerado um marco no estudo da acústica e reúne as bases científicas desta ciência.

Após o trabalho de Rayleigh, a acústica ficou adormecida por alguns anos ressurgindo no início do século XX devido ao progresso das comunicações. Graças aos avanços feitos na área da eletrônica, já era possível criar instrumentos que medissem os eventos sonoros com alguma confiança.

Ainda em meados do século XIX, é realizado um experimento de comunicação telefônica elaborado por Reiss (1861), executado perante a sociedade de Física de Frankfurt sobre o rio Mênio e, alguns anos depois, em 1876, A.G.Bell (1847-1922) acrescenta significativas melhoras aos transdutores utilizados naquele experimento, tornando-os economicamente viáveis, iniciando

a era da telefonia. Paralelamente, têm-se os trabalhos de Siemens e seus colaboradores que deram origem ao alto-falante “magnético”, evoluindo para o alto-falante “dinâmico” com o trabalho de Rice e Kellog (1924), da General Electric, no qual o seu princípio de funcionamento permanece até hoje inalterado.

Temos também o advento da gravação e reprodução sonora, iniciado com o fonógrafo de Édson (1877) e posteriormente com a gravação de discos com Berliner (1887), que conseguiu reproduzir as gravações em grande escala fazendo cópias em discos de borracha de vulcanite dura a partir dos originais de zinco. Mais tarde, os trabalhos de Braunmehl e Weber (1940) dariam origem a gravação e reprodução em fita magnética, ainda hoje utilizada. Temos ainda, em 1927, o Photofone, sistema de gravação ótico que foi largamente utilizado no cinema e que resolveu os problemas de sincronização entre som e imagem no antigo sistema de reprodução sonoro com disco.

Paralelamente às evoluções no campo da acústica das comunicações, a acústica arquitetônica também recebe um grande salto vindo principalmente das teorias e experimentos realizados nas universidades de Harvard, no Massachusetts Institute of Technology, e de alguns centros de pesquisa da Europa, principalmente da Alemanha. O prof. de física de Harvard, Wallace C. Sabine (1868-1919), foi um dos grandes expoentes dessa área e é considerado o fundador da acústica arquitetônica. Iniciou seus estudos na área de acústica em 1895, investigando as condições acústicas dos prédios daquela universidade e posteriormente tornou-se um consultor acústico renomado, tendo como um dos seus principais trabalhos o projeto acústico do “New Boston Music Hall”, considerado até hoje uma das melhores salas de concertos do mundo.

Devido ao progresso feito na área das comunicações e seu interesse comercial somados aos conhecimentos adquiridos por Sabine, o estudo da psicoacústica passa a ser de grande importância para o desenvolvimento da telefonia. Trabalhando no Bell Telephone Laboratories, Harvey Fletcher e sua equipe já conseguem quantizar os conceitos de *loudness* (sensação subjetiva de intensidade sonora) e mascaramento acústico e determinar vários outros fatores que governam uma boa comunicação.

Outro campo da acústica, a chamada acústica ultra-sônica, também passa ser palco das atenções. Com o advento da I Guerra Mundial, o interesse militar em detectar submarinos inicia uma série de trabalhos nesta área. Em poucos anos, há um grande desenvolvimento da acústica ultra-sônica que se apresenta como a melhor alternativa para a solução do problema. No final da

II Guerra, os alemães já possuíam um sistema completo que indicava com bastante precisão o objeto procurado.

Desde então, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos em todas as áreas da acústica e cada vez mais o estudo do som tem se tornado uma ciência interdisciplinar. Há alguns anos que o ultra-som é utilizado, por exemplo, na geração de imagens, como terapia na reconstituição muscular, na detecção de trincas e fraturas em sólidos e até mesmo como um transdutor alternativo para geração de som, o “alto-falante ultra-sônico” [Pompei, 1999].

Em meados do século XX, a revolução digital chega também no campo da acústica e mais uma vez seus horizontes são ampliados. Sistemas de medição acústica microprocessados, gravação sonora em mídia digital, sistemas de som envolventes (*sourround*), simulação de projetos acústicos por computador, processadores digitais de efeitos, sintetizadores e instrumentos musicais virtuais, transmissão digital de música (*digital broadcasting*) e uma gama de outros aperfeiçoamentos, acompanhados da evolução constante do estudo, das técnicas e dos materiais, fazem com que o “som que ouvimos hoje” seja cada vez mais agradável aos nossos “s”, e aqueles desagradáveis, muito menos perigosos.

1.2 Motivação do trabalho

A motivação para a elaboração deste trabalho surge a partir dos trabalhos apresentados no 6º Congresso Nacional da *Audio Engineering Society*, seção Brasil, realizada em São Paulo em junho de 2002. Neste congresso discutiram-se os vários aspectos que envolvem a engenharia de áudio, com trabalhos voltados à questão da qualidade acústica de ambientes, das técnicas de medição acústica, dos sistemas de captação e reprodução de áudio, dos *softwares* de simulação acústica, dentre outros. Em particular, os trabalhos apresentados por Renato Cipriano a respeito da acústica para ambientes de análise crítica de áudio [Cipriano, 2002], José Nepomuceno a respeito da qualidade acústica de salas de concerto e de Sam Berkow sobre *softwares* de análise em tempo real, serviram como motivação inicial para elaboração do presente trabalho.

Algumas das questões levantadas pelos autores que apresentaram trabalhos sobre o projeto acústico em ambientes submetidos à sistemas de áudio foram:

- A parte de otimização do sistema de som é negligenciada;
- O ideal é otimizar o sistema de som com o ambiente.

Como resultado destas afirmações, surgiu a idéia de elaborar um trabalho que tratasse não somente das questões acústicas de forma isolada e nem somente sobre os sistemas de áudio mas um trabalho que unisse esses dois aspectos que, quando aplicados em situações reais, estão intrinsecamente relacionados.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo apresentar os principais conceitos, técnicas e procedimentos referentes ao projeto e análise de acústica de ambientes e de sistemas de áudio, com o propósito de orientar o projetista na elaboração e dimensionamento dos espaços submetidos a sistemas de sonorização, mostrando a relação intrínseca entre estas duas áreas.

Também é objetivo deste trabalho, como forma de concretizar os conceitos nele discutidos, a realização de uma análise eletroacústica no Salão de Atos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que avalia as características acústicas do ambiente e do sistema de áudio instalado, sugerindo, dentro do possível, outras possibilidades de configuração do sistema som-ambiente a partir dos resultados obtidos.

A revisão bibliográfica do presente trabalho inicia com o capítulo 1 abordando o conceito de som sob os aspectos físico e subjetivo, apresentando os principais conceitos e formulações matemáticas que estão diretamente relacionados com as questões da propagação sonora e da acústica de salas. No final deste capítulo, é discutido o conceito de som sob o aspecto subjetivo, apresentando os principais conceitos da psicoacústica e as formas como o sistema auditivo percebe o som.

Já no capítulo dois, os conceitos da física acústica e da psicoacústica presentes no capítulo anterior servem de base teórica para introduzir o assunto referente à avaliação da qualidade acústica de ambientes. Neste capítulo são apresentados os termos descritores de percepção acústica propostos por Beranek, 1962, e os parâmetros objetivos de qualidade acústica ambiental. Por fim, é apresentado um método de avaliação da qualidade acústica de salas, proposta por Arau, 1999.

Os sistemas de áudio são objeto de estudo do terceiro capítulo. Nele, são apresentados os diversos tipos de sistemas de áudio [Cysne, 2000] e os principais equipamentos que os compõem, com ênfase dada às especificações técnicas destes equipamentos. Também é iniciado o

assunto sobre o projeto de sistemas de áudio, apresentando seus principais objetivos e os cálculos necessários para o seu dimensionamento.

O quarto capítulo versa sobre as diferentes técnicas de medição de resposta impulsiva utilizadas na análise de sistemas. Nele, são apresentadas as características, as formulações, as vantagens e desvantagens de cada uma das principais técnicas conhecidas e atualmente utilizadas como, por exemplo, a técnica de varredura logarítmica de seno, proposta por Farina, 2000.

Os últimos capítulos tratam da análise e avaliação eletroacústica do Salão de Atos da UFRGS citada anteriormente, apresentando, inicialmente, a motivação da sua escolha, a descrição do ambiente e do sistema de áudio instalado e terminando com a análise dos resultados obtidos e as conclusões que dela podem ser tiradas.

2. Teoria acústica

2.1 Introdução

Este capítulo aborda o conceito de som sob seus aspectos físico e subjetivo, focalizando aqueles assuntos de interesse deste trabalho. Primeiramente, são apresentados os conceitos físicos e as definições matemáticas que envolvem a geração e propagação sonora. A seguir, explora-se o conceito subjetivo do som e as formas como o percebemos.

2.2 O Som – Definições

O som pode ser definido como uma alteração de pressão que se propaga através de um meio elástico capaz de impressionar o sistema auditivo. Ele é produzido quando este meio é posto em movimento através de uma perturbação, podendo ser originada de um corpo em vibração, como por exemplo, o corpo de um violino ou o diafragma de um alto-falante. Esta vibração é transmitida ao meio que o cerca, produzindo um movimento nas moléculas do entorno, causando alternadamente compressão e rarefação, acompanhando o movimento do corpo. Porém, as moléculas do meio não se deslocam para além de um ponto de equilíbrio, onde permanecem quando não há movimento; apenas oscilam para um lado e para outro em torno deste ponto, transmitindo às moléculas vizinhas as flutuações de pressão que ocorrem entre a zona comprimida e uma zona rarefeita. A velocidade com que estas moléculas executam este movimento é chamada de velocidade das partículas e é tão maior quanto mais intenso for o som.

Além desta definição física, o som também é entendido como a sensação produzida pelo do sistema auditivo, resultante daquelas alterações de pressão descritas acima. Sistema auditivo entende-se não somente as orelhas mas toda a complexa cadeia que recebe e transmite esta sensação até o cérebro, resultando na percepção do som. Valadares, 2002, conceitua a audição humana como a capacidade de identificar padrões definidos e com conteúdo informativo nos sons que atingem a orelha externa e o seu processamento específico para poder ser integrado nos níveis superiores cognitivos.

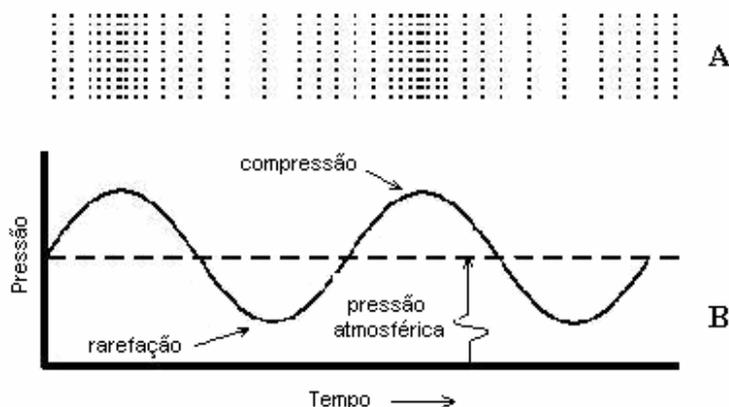


Figura 2.1 – (A) Uma vista instantânea das regiões de compressão e rarefação do ar. (B) Variação da pressão numa onda sonora. Fonte: Everest, 2001.

2.3 Tipos de ondas sonoras

2.3.1 Onda Plana

A Figura 2.1 é um exemplo típico da propagação de uma onda sonora plana, unidimensional e progressiva. Considera-se onda plana aquela cuja amplitude tem o mesmo valor em todos os pontos de um plano qualquer perpendicular à direção de propagação e progressiva, aquela que transfere energia na mesma direção de propagação.

Considerando que não exista interferência de outros objetos ou mudança no meio de propagação, podemos escrever uma equação que relacione a pressão sonora em função do tempo a uma determinada distância da fonte [Olson, 1967]:

$$p(x,t) = akc^2 r \text{ sen } k(ct - x) \quad (1)$$

sendo $p(x,t)$ a pressão, [N/m²];

x a distância de um ponto de observação ao longo do eixo, a partir do ponto $x = 0$, [m]

t o tempo, [s]

a a amplitude do deslocamento da partícula, [m];

k o número de onda ($k = 2\pi/\lambda = \omega/c$), [m⁻¹];

c a velocidade do som no meio, [m/s].

r a densidade específica do meio, [Kg/m³]

Pode-se notar a partir desta expressão que o valor de pico de pressão permanece o mesmo, independente da distância em que o valor da pressão é tomado.

A equação da velocidade das partículas numa onda plana é dada a seguir.

$$u(t, x) = akc \operatorname{sen} k(ct - x) \quad (2)$$

sendo $u(t, x)$ a velocidade das partículas numa onda plana, [m/s].

Comparando as duas equações, pode-se observar que a velocidade das partículas e a pressão estão em fase [Olson, 1967].

2.3.2 Onda Esférica

A onda esférica é aquela produzida por uma fonte que irradia energia uniformemente em todas as direções. Tomando uma superfície esférica a uma determinada distância radial da fonte, o valor da amplitude sonora será o mesmo em qualquer ponto desta superfície. Considerando que a onda esférica é produzida por uma esfera vibrante de raio igual a r_s , pode-se escrever uma equação para a pressão conforme abaixo [Borwick, 1994]

$$p(t, r) = \frac{u_s r_s k r_s^2}{r} \operatorname{sen} k(ct - r) \quad (3)$$

e

$$u_s = U_0 \cos \omega t \quad (4)$$

sendo $p(t, r)$ a pressão dependente do tempo e da distância radial da fonte, [N/m²];

r a distância radial da fonte, [m];

ω a frequência angular [rd/s];

u_s a velocidade radial num ponto da superfície, ou, velocidade superficial (na esfera), [m/s];

U_0 a amplitude da velocidade superficial (na esfera), [m/s].

r_s o raio da esfera vibrante, [m]

Considerando uma fonte esférica pequena com um raio suficientemente pequeno de tal forma que na frequência de operação $kr_s \ll 1$, pode-se dizer que $u_s = U_0$ e definir uma nova equação para a pressão como sendo [Olson, 1967]:

$$p(t, r) = \frac{U r c k}{4 p r} \text{sen } k(ct - r) \quad (5)$$

sendo U a “força” da fonte esférica, isto é, a taxa máxima de emissão de fluido da fonte, também conhecida como *source volume velocity* (velocidade volumétrica da fonte) definida pelo produto da superfície esférica pela velocidade da superfície, [m³/s], dada pela seguinte equação [Borwick, 1994]:

$$U = 4 p_s^2 \cdot U_0 \quad (6)$$

Pode-se, também, definir uma equação para a velocidade de uma partícula para uma onda esférica, como segue abaixo [Olson, 1967]:

$$u(t, r) = \frac{-U k}{4 p r} \left[\frac{1}{k r} \cos k(ct - r) - \text{sen } k(ct - r) \right] \quad (7)$$

Observa-se pelas equações acima que a amplitude da pressão decresce inversamente proporcional a distância da fonte. Também se pode observar que a rapidez da partícula, u , e a pressão, p , não estão em fase, a não ser para grandes distâncias quando a onda esférica se torna uma onda plana.

2.3.3 Onda Estacionária

Uma onda estacionária é produzida pela interferência de duas ou mais ondas sonoras que originam um arranjo de pressões máximas e mínimas que é estável no tempo. Tomando um sistema simples, composto por duas ondas viajando em direções opostas, pode-se escrever uma equação para pressão e outra para a velocidade da partícula [Olson, 1997]:

$$p(t, x) = 2akc^2 \mathbf{r} [\text{sen}(kct) \cos(kx)] \quad (8)$$

e

$$u(t, x) = 2akc \left[\text{sen} \left(kct - \frac{\mathbf{P}}{2} \right) \cos \left(kx - \frac{\mathbf{P}}{2} \right) \right] \quad (9)$$

Aqui, nota-se que os máximos de pressão e de velocidade estão separados por um quarto de onda, ou seja, a fase difere de 90° no tempo.

2.3.4 Onda produzida por um pistão circular rígido

De particular interesse no estudo da propagação do som gerada por alto-falantes, pode-se escrever uma equação que descreva a propagação da onda sonora gerada por um pistão circular rígido, de raio qualquer, vibrando em fase na sua superfície e montado num *baffle* (abafador sonoro) infinito. Esta associação pode ser feita pois os diafragmas dos alto-falantes são geralmente circulares, apesar de que para altas frequências este diafragma não se move como um corpo rígido e a amplitude, e às vezes a fase, variam ao longo da superfície. Fazendo estas simplificações, é possível chegar a uma equação da pressão para um ponto qualquer no eixo perpendicular à superfície circular do pistão de raio r_a , distanciado de um valor r a partir do centro desta superfície, conforme a equação (10) [Borwick, 1994].

$$p(r) = jrc |u_s| 2 \text{sen} \left(\frac{k}{2} \left[(r^2 + r_a^2)^{1/2} - r \right] \right) \cdot e^{j \left(\omega t - \frac{k}{2} \left[(r^2 + r_a^2)^{1/2} + r \right] \right)} \quad (10)$$

sendo r_a o raio da superfície circular do pistão, [m]

r a distância a partir do centro da superfície circular, [m]

A parte real de p é a pressão no ponto r . Pode-se observar que o termo senoidal tende a zero quando r tende a infinito e que para outros valores de r isto também acontece. Em geral, a amplitude da pressão se comporta segundo a lei do inverso dos quadrados, isto é, decresce ao quadrado com a distância, porém não obedece a este comportamento para regiões próximas à superfície circular, região esta chamada de campo próximo (*near field*). O máximo da amplitude da pressão é dado por $2pcU_0$ e os zeros ocorrem cada vez que o raio do pistão r_a excede um

comprimento de onda λ , isto é, ocorrerá um zero para $r_a \geq \lambda$, dois zeros para $r_a \geq 2\lambda$ e assim por diante. Por exemplo, para um pistão com raio de 150mm, vibrando em 3Khz, um zero ocorrerá a 42mm do pistão e um máximo a 169mm. Para pistões de raios pequenos, um zero ocorre somente numa frequência muito alta e, então, bem próximo ao pistão. Então, para um alto-falante típico, o *near field* é praticamente local e tem pouca influência no campo sonoro de um ouvinte típico ou até mesmo para a posição de medida, geralmente localizadas num campo sonoro distante (*far field*) [Borwick, 1994].

De acordo com Nepomuceno, 1968, campo distante é o campo sonoro onde “a radiação recebida de cada ponto do emissor (fonte) atinge o receptor sob um ângulo praticamente constante.”

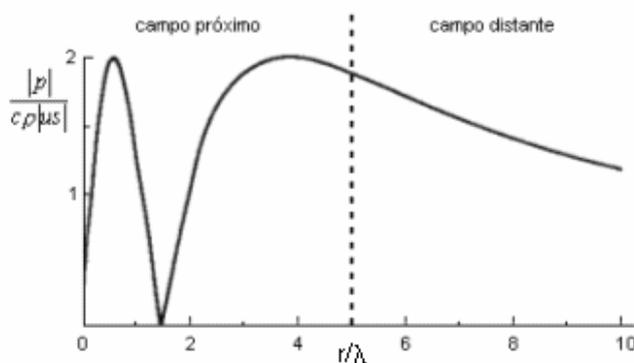


Figura 2.2 – Gráfico da amplitude da pressão na região de campo próximo (*near field*) produzida por um pistão rígido montado num baffle infinito. Fonte: Borwick, 1994.

Considerando agora distâncias $r \gg r_a$, observadas de um ângulo \mathbf{q} qualquer em relação ao eixo perpendicular à superfície, pode-se escrever um equação mais geral para a pressão [Borwick, 1994].

$$p(r, \mathbf{q}) = \frac{j\mathbf{r}w}{2pr} \cdot |U| \cdot e^{j(\omega t - kr)} \cdot \left[\frac{2J_1(kr_a \sin \mathbf{q})}{kr_a \sin \mathbf{q}} \right] \quad (11)$$

sendo U a velocidade volumétrica da fonte, [m^3/s];

$J_1(kr_a \sin \mathbf{q})$ uma função de Bessel de primeira ordem.

O fator entre colchetes é conhecido como fator de diretividade e é representado pela letra Q . A figura abaixo traça o gráfico da diretividade em função do ângulo de observação. Pode-se observar que $Q = 0$ quando $kr_a \sin \theta = 3.83$, 7.02 , 10.15 , etc. Traçando um gráfico polar,

verifica-se o surgimento de lobos de pressão ao longo da variação angular. O ângulo $\theta_1 = \arcsen(0.61\lambda/r_a)$ marca a extremidade angular do lobo principal enquanto que os ângulos θ_1 e $\theta_2 = \arcsen(1.12\lambda/r_a)$ marcam as extremidades do primeiro lóbulo lateral e assim por diante. Geralmente a pressão acústica dos lobos laterais são bem menores que seu lóbulo antecessor.

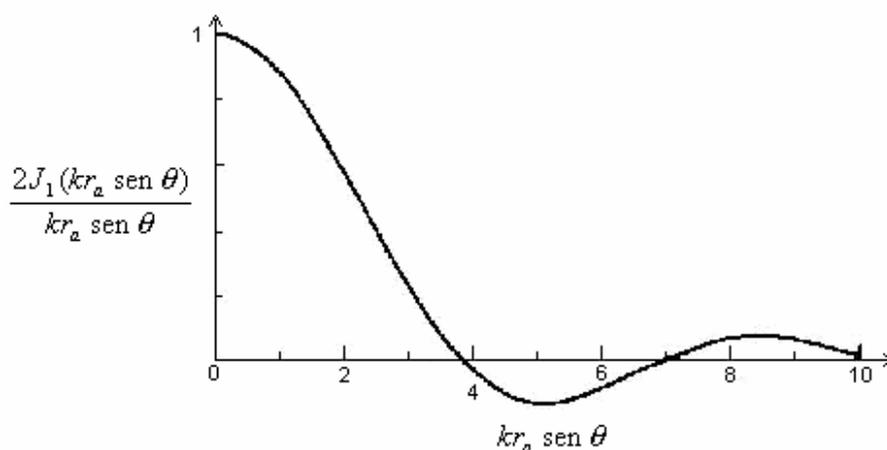


Figura 2.3 – Gráfico da função de diretividade no campo distante (far field) para um pistão rígido montado num baffle infinito. Fonte: Borwick, 1994

Pode-se observar que, quando o raio do pistão é muito maior que o comprimento de onda, isto é, $kr_a \gg 1$, o padrão de radiação terá vários lobos laterais e o tamanho do lobo principal será pequeno. Em contrapartida, para valores de $kr_a \leq 3.83$ não existirá valores reais para \mathbf{q} e somente o lobo principal se fará presente. Em outras palavras, para baixas frequências, este pistão se comporta como uma fonte esférica simples, quando montada num *baffle* infinito.

Na construção de caixa acústicas, não se deseja que o alto-falante responda com diferentes padrões polares para diferentes frequências. Então o que se faz é construir um alto-falante específico para as altas frequências, o chamado *tweeter*, que é bem menor que os alto-falantes de frequências graves, criando assim um padrão menos direcional para as altas frequências [Borwick, 1994].

Também, do ponto de vista da construção de caixas acústicas, é particularmente útil saber em qual ângulo e frequência o nível de pressão sonora será de -6db em relação ao eixo do alto-falante. Isto ocorre quando $kr_a \sin \mathbf{q} = 2.2$ então, por exemplo, para um pistão de raio igual a 150mm, a 45° do eixo perpendicular, o nível de pressão sonora será de -6db para uma frequência de 1136Hz.

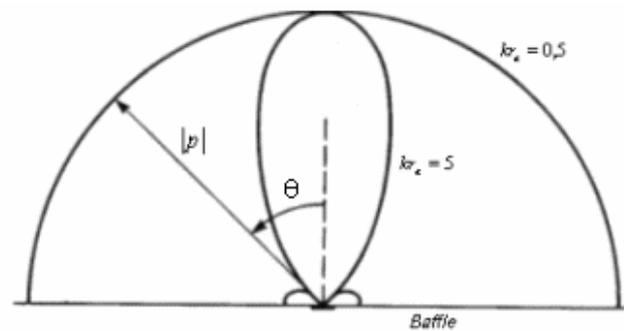


Figura 2.4 – Gráfico dos padrões de diretividade para diferentes frequências de um pistão circular rígido montado num baffle infinito. Fonte: Borwick, 1994.

2.4 Relação de Diretividade (Q)

Num sistema onde o som é produzido por um fonte sonora qualquer disposta num local qualquer, o padrão de diretividade pode assumir uma forma bastante complexa. Assim, o fator de diretividade Q para uma fonte de potência W pode ser definido como a relação entre o valor eficaz da pressão sonora em um ponto situado na periferia de uma esfera de raio r_a , determinado pelas coordenadas angulares θ e ϕ , e o valor eficaz da pressão sonora ($\overline{p^2}$), a uma mesma distância, de uma fonte pontual de mesma potência [Arau, 1999].

$$Q = \frac{\overline{p_{q,f}^2}}{\overline{p^2}} = \frac{\overline{I_{q,f}}}{I} \quad (12)$$

Muitas vezes, ao invés do Q , utiliza-se o chamado *índice de diretividade*, $DI_{\theta,\phi}$, definido pela equação [Arau, 1999]:

$$DI = 10 \log(Q) \quad (13)$$

A Figura 2.5 mostra alguns exemplos de como a diretividade de uma fonte pode ser alterada de acordo com a sua posição espacial. Nestes casos, as reflexões das paredes próximas alteram o padrão de diretividade da fonte.

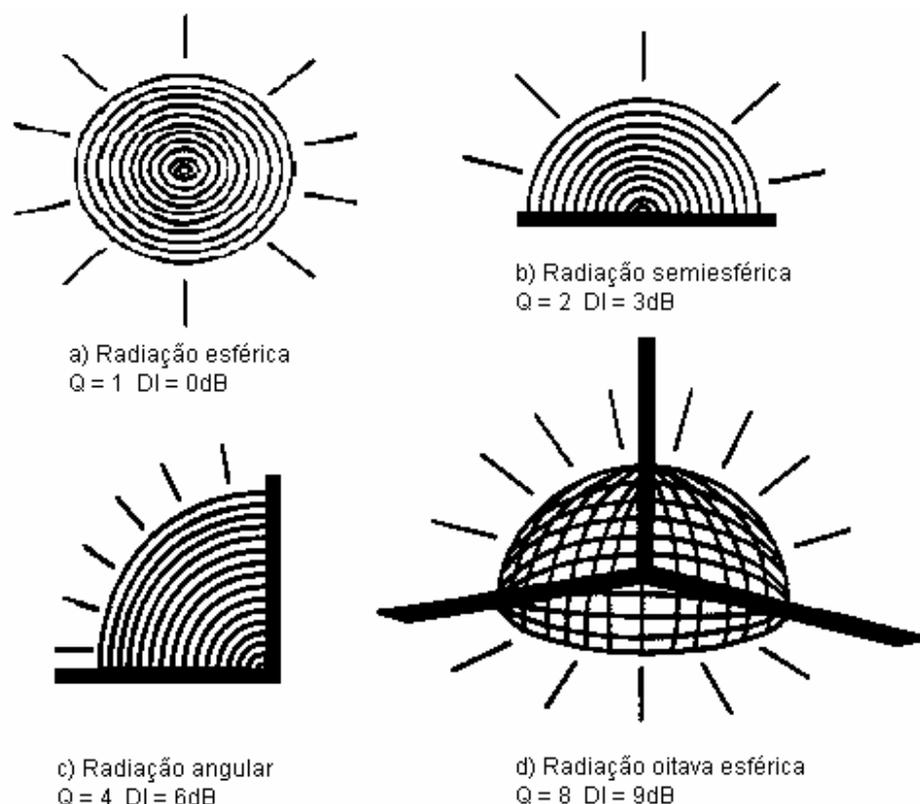


Figura 2.5 – Tipos de diretividade de uma fonte sonora de acordo com seu lugar de instalação. Fonte: Arau, 1999.

Na prática, em se tratando de caixas acústicas, deseja-se saber a relação de diretividade em relação ao eixo principal, isto é, o eixo que apresenta um nível de pressão sonora mais elevado em relação aos outros. O Q_{axial} , como é chamado, é então definido como a relação entre o valor da pressão sonora num ponto do eixo principal, NPS_{axial} , situado a uma distância r da fonte, e a média dos valores de pressão sonora, NPS , aferidos em outros pontos distantes de r da fonte. Estes pontos devem ser escolhidos criteriosamente, de modo que cada um deles represente uma área de superfície esférica igual a de todos os demais pontos [Cysne, 2000].

$$Q_{axial} = 10^{\frac{NPS_{axial} - \overline{NPS}}{10}} \quad (14)$$

2.5 Ângulo de Cobertura

O ângulo de cobertura é aquele que determina um setor circular formado pelo centro acústico do projetor de som no eixo central, e pelos pontos laterais onde o nível de pressão sonora cai 6dB.

Geralmente é medido alimentando a fonte sonora com 0dBW, posicionando o sonômetro 1m ou mais da fonte. A partir daí, move-se o medidor para esquerda e/ou direita, em ângulos de 5°, anotando os valores de pressão sonora em cada ponto. A partir destes resultados, traça-se um gráfico em diagrama polar e determina-se o ângulo de cobertura da fonte.

2.6 Onda produzida a partir de múltiplas fontes

Considerando ainda o pistão circular rígido do item 2.3.4, porém agora montado em várias unidades empilhadas (line array), separadas entre si por uma distância d , pode-se determinar uma equação para a pressão num ponto qualquer. Considera-se para tanto que o observador está distante da fonte, isto é, no campo distante, então, a contribuição de cada fonte (pistão) para a pressão total difere somente por termo da fase. A diferença de fase entre duas fontes adjacentes é $kd \sin \mathbf{f}$, onde ϕ é medido num plano normal ao plano onde as fontes estão montadas passando por entre os seus centros. O somatório de N fontes resulta na pressão no ponto (r, θ, ϕ) , dada pelas seguintes equações:

$$p(r, \mathbf{q}, \mathbf{f}) = \frac{j\mathbf{r}w}{2\mathbf{p}} nU \cdot e^{(j(\omega t - kr))} \cdot \left[\frac{2J_1(kr_a \sin \mathbf{q})}{kr_a \sin \mathbf{q}} \right] \cdot \left[\frac{\sin(nk(d/2) \sin \mathbf{f})}{n \sin(nk(d/2) \sin \mathbf{f})} \right] \quad (15)$$

$$p(r, \mathbf{q}, \mathbf{f}) = \frac{j\mathbf{r}w}{2\mathbf{p}} nU \cdot e^{(j(\omega t - kr))} \cdot Q_1 \cdot Q_n \quad (16)$$

Na equação (16), Q_1 é a diretividade com apenas uma fonte sonora, [ad.] e Q_n é a diretividade adicional devido ao empilhamento das fontes, [ad.]. Este acréscimo na diretividade ocorre somente no plano que contém o *line array*, isto é, o plano vertical, enquanto que nos demais planos a diretividade resultante da pilha é igual ao de seus componentes [Cysne, 2000].

Para uma fonte simples, o ângulo e a frequência onde o nível de pressão sonora é de -6db é dado por $kr_a \text{ sen}\mathbf{q} = 2.2$, como visto anteriormente. No caso do empilhamento, este valor passa a ser dado por $k(d/2) \text{ sen}\mathbf{f} = 2/n$, ou seja, no plano normal ao empilhamento, a diretividade do *line array* é aumentado por um fator de aproximadamente $\pi(d/2r_a)$, se comparado com um pistão simples. No caso de $n > 4$ ou 5 , o fator Q_n é quem comanda e Q_l pode ser ignorado, caso contrário, deve-se levar em consideração os dois fatores de diretividade.

2.7 Propagação sonora

A propagação sonora, $PS(r)$, pode ser definida como sendo a diferença do nível de pressão sonora, $NPS(r)$, de uma fonte pontual fixa, omnidirecional (emissão sonora em todas as direções) e de emissão estacionária, e o seu nível de potência sonora, NWS , ambos dados em dB, em função da distância entre fonte e receptor [Souza, 1997].

$$PS(r) = NPS(r) - NWS \quad (17)$$

2.8 Propagação sonora em campo livre

Em campo livre o som pode propagar-se sem obstáculos. Apenas o som direto determina o nível de pressão sonora em um receptor a uma distância r da fonte [Souza, 1997]. O nível de pressão sonora de uma fonte de potência NWS , a uma distância r da fonte, pode ser calculado da seguinte forma [Souza, 1997]:

$$NPS(r) = NWS - 10 \log r^2 - 10 \log \mathbf{f} \quad (18)$$

Para uma fonte pontual omnidirecional livre, o ângulo de emissão sonora $\mathbf{f} = 4\pi$, portanto, o fator $10 \log \mathbf{f} = 11$. Já para uma fonte com irradiação semiesférica, como é o caso (b) da Figura 2.5, $\phi = 2\pi$. Este raciocínio pode ser estendido para os outros casos.

2.9 Propagação sonora em campo difuso (ambientes fechados)

Souza, 1997, mostra que a densidade de energia sonora estacionária gerada por uma fonte de diretividade Q , [ad.], e potência sonora W , [W], em um ponto da sala de área S , [m²], e com coeficiente médio de absorção \mathbf{a}_m , [m²], à distância r , [m], é dada pela soma das densidades de energia do som direto ϵ_d , [Ws/m³], e do som reverberante ϵ_r , [Ws/m³], como mostra a equação abaixo [Souza, 1997]:

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}_d + \mathbf{e}_r \quad (19)$$

sendo:

$$\mathbf{e}_d = \frac{QW}{4\mathbf{p}cr^2} \quad (20)$$

e

$$\mathbf{e}_r = -\frac{4W(1-\mathbf{a}_m)}{cS \ln(1-\mathbf{a}_m)} \quad (21)$$

De acordo com Reynolds, 1981, a densidade de energia sonora total ϵ em uma sala fechada de grandes dimensões pode ser expressa pela equação (22) abaixo, onde \mathbf{r} é a densidade específica do meio, [Kg/m³], e $\overline{p^2}$ a pressão quadrática média [Pa²].

$$\mathbf{e} = \frac{\overline{p^2}}{\mathbf{r}c^2} \quad (22)$$

Igualando-se as equações (20), (21) e (22), transformando esta nova expressão numa equação logarítmica e adotando alguns valores de referência, faz-se algumas considerações de ordem prática (absorção do ar desprezível, α_m pequeno, isto é, $(1 - \alpha_m) \cong 1$) e chega-se a equação (23) bastante utilizada por projetistas em acústicas [Souza, 1997].

$$NPS(r) = NWS + 10 \log \left(\frac{Q}{4\mathbf{p}r^2} + \frac{4}{S\mathbf{a}_m} \right) \quad (23)$$

Da mesma forma, a atenuação devido a distância percorrida pelo som, em ambos os casos, pode ser expressa pela seguinte equação:

$$aten(r) = NPS(r_{ref}) - NPS(r) \quad (24)$$

sendo $aten(r)$ é atenuação sofrida pelo som ao percorrer uma distância r , [dB];

$NPS(r_{ref})$ é o nível de pressão sonora a uma distância de referência (usualmente, utiliza-se a distância de 1m), [dB];

$NPS(r)$ é o nível de pressão sonora à distância r , [dB].

Tendo em vista as equações (18) e (23), é possível determinar uma distância limite onde o nível de pressão sonora do campo reverberante é igual ao do campo direto. Esta distância, conhecida como distância crítica, é o ponto onde a curva de propagação sonora em campo difuso é 3dB maior que a curva de propagação em campo livre, como pode ser visto no gráfico da Figura 2.6. A distância crítica d_c , [m], é dada pela seguinte expressão [Cysne, 2000]:

$$d_c = \sqrt{\frac{QS a_m}{16p}} \quad (25)$$

A distância crítica, d_c , pode ter sua expressão aperfeiçoada quando lhe são introduzidos modificadores, expressos pelos fatores N e M . A expressão fica, então [Cysne, 2000]:

$$d_c = \sqrt{\frac{QS a_m M}{16pN}} \quad (26)$$

sendo M e N dados por, respectivamente [Cysne, 2000]:

$$M = \frac{1 - a_m}{1 - a_p} \quad (27)$$

$$N = \frac{NWS_R}{NWS_D} \quad (28)$$

sendo a_m é o coeficiente de absorção médio do recinto, [m²];

a_p é o coeficiente de absorção médio da superfície mais absorvente sobre a qual incidem os sons diretos, [m²];

NWS_R é a potência acústica produzida por todas as fontes (alto-falantes) que contribuem, portanto, para a formação do campo reverberante, [W];

NWS_D é a potência acústica produzida pela fonte, ou fontes, que irradiam som direto para um ouvinte que, portanto, contribuem para a formação do campo direto, [W];

Essa modificação é bastante útil quando se trata de projeto de sistemas de sonorização baseados na reprodução sonora através de alto-falantes. Caso os alto-falantes do sistema forem iguais, o valores de NWS_R e NWS_C podem ser substituídos apenas pelo número de alto falantes relacionados a cada um dos campos acústicos.

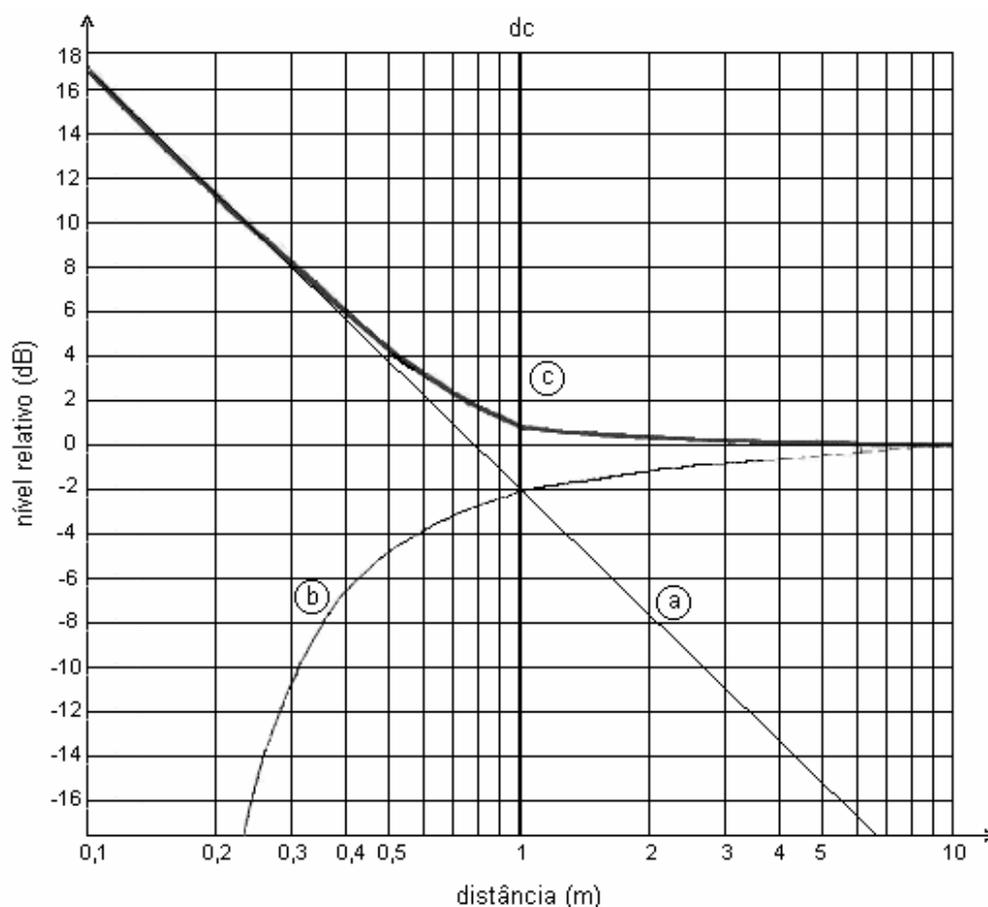


Figura 2.6 – Gráfico da propagação sonora em campo livre (a), campo difuso (b) e da diferença entre as duas curvas (c). No gráfico, dc é a Distância Crítica. Fonte: Cysne, 2000.

2.10 Modos de vibração numa sala retangular

Dado uma fonte sonora operando entre duas paredes paralelas refletoras, distanciadas entre si de uma distância L , [m], ocorrerá uma interação entre as ondas refletidas pelas paredes e

as geradas pela fonte que poderá produzir o fenômeno de interferência, isto é, o cancelamento (nós) ou reforço (antinós) da onda original, de acordo com a sua frequência de operação. Pode-se definir, então, uma *frequência de ressonância*, f_g , [Hz], e múltiplos desta frequência, associadas aos pontos nodais (nós) da onda resultante desta interação, como sendo [Arau, 1999]:

$$f_g = \frac{cg}{2L}, g = 0,1,2\dots \quad (29)$$

Estas frequências também são chamadas de *frequências próprias, ou modos ressonantes*.

Estendendo este raciocínio para o caso tridimensional como, por exemplo, uma sala retangular com paredes rígidas, é possível escrever um equação que relacione a(s) frequência(s) de ressonância com as dimensões desta sala:

$$f_{g,h,i} = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{g}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{h}{L_y} \right)^2 + \left(\frac{i}{L_z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (30)$$

sendo $f_{g,h,i}$ a frequência de ressonância, [Hz];

g, h e i números inteiros, 0, 1, 2 ...;

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

A equação (30), proposta por Rayleigh em 1896, é formulada a partir da equação de onda tridimensional escrita em coordenadas cartesianas, descrita abaixo [Gomes, 1998]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + K^2 p = 0 \quad (31)$$

sendo,

$$K^2 = K_x^2 + K_y^2 + K_z^2 \quad (32)$$

e

$$K_x = \frac{gp}{L_x}; \quad K_y = \frac{hp}{L_y}; \quad K_z = \frac{ip}{L_z} \quad (33)$$

Como as paredes são rígidas, a componente normal da velocidade de partícula deve ser nula nas paredes, então, as condições de contorno podem ser escritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \text{ para } x = 0 \text{ e } x = L_x. \text{ e da mesma forma para as outras direções.}$$

No caso de paredes não rígidas, a velocidade não é nula nas paredes e as condições de contorno se tornam complexas devendo ser analisadas caso a caso. Estes casos são descritos com maiores detalhes em Gomes, 1998.

De acordo com o tipo de onda que se propaga dentro de uma sala poderão existir três tipos de modos normais de vibração, a saber:

- Onda axial: Propagação paralela a um eixo ($g = h = 0, i \neq 0$);
- Onda tangencial: Propagação paralela a duas paredes ($g = 0, h = i \neq 0$);
- Onda oblíqua: Encontram todas as paredes da sala ($g, h \text{ e } i \neq 0$).

Dependendo do espaçamento, em Hz, entre as frequências modais de uma sala, pode ocorrer a existência em defeitos acústicos como coloração, reforço e/ou cancelamento. Everest, 2001, cita dois critérios que determinam os limites de espaçamento entre frequências modais para que não ocorram tais defeitos. O primeiro, proposto por Gilford em 1979, suporta a opinião de que o espaçamento não deva ser superior a 20Hz entre modos axiais, para que sejam evitados problemas de ressonância. O segundo, proposto por Bonello em 1981, mostra que é desejável que as frequências modais de qualquer tipo de modo de vibração estejam separadas entre si de pelo menos 5% de seu valor, para evitar problemas de coincidência (degeneração). Este autor acrescenta ainda que frequências modais de igual valor são fontes comuns de coloração, pois tendem a super enfatizar as frequências em que ocorrem.

A partir destas informações, algumas medidas corretivas podem ser tomadas para evitar aqueles problemas acústicos. A quebra de paralelismo da sala em questão e o uso de difusores acústicos são algumas delas. Alternativamente, pode-se utilizar dispositivos absorvedores sintonizados (ressonador de Helmholtz, *bass traps*, etc.) nas frequências que, sabidamente, serão reforçadas [Cysne, 2000].

2.11 Psicoacústica

A estrutura fisiológica do sistema auditivo bem como a percepção e interpretação dos sons que atingem este sistema são objetos de estudo da psicoacústica.

A audição, como um dos sentidos mais antigos do processo evolutivo humano, é um dos mais complexos e sofisticados mecanismos de transdução existentes na natureza. Como escreve Mirol, 2002, “ Sua gama dinâmica é enorme, sua capacidade de extrair informação do meio ambiente muito apurada e sua capacidade de síntese da informação terminou permitindo que seja usado para fins muito alheios e distantes daqueles a que estava destinado, como, por exemplo, ouvir música. Na realidade, ainda desconhecemos a maior parte do mecanismo auditivo, em especial o que se refere aos mecanismos internos do cérebro.”

A informação sonora que atinge a orelha é processada pelo sistema nervoso central em diversos níveis. Cada um destes níveis foi desenvolvido nas diversas fases evolutivas da espécie humana para fins de sobrevivência e adaptação. Sabe-se que, num nível mais baixo, o sistema auditivo é capaz de reconhecer padrões de frequência, intensidade e direção do som. A medida que esta informação “sobe” à instâncias superiores, como escreve Mirol, 2002, “o número de neurônios envolvidos cresce dramaticamente e a informação representa cada vez mais detalhes complexos do evento sonoro, e é cada vez mais influenciado por fatores comportamentais do indivíduo, com participação da memória e de centros responsáveis pelo tono emocional básico”.

Em resumo, é possível afirmar que o som que ouvimos é um subproduto da informação original que chega às orelhas, traduzidas em estímulos nervosos pelo aparelho auditivo e interpretada, em diversos níveis, pelo cérebro, sob a influencia da personalidade, da memória e do estado emocional de cada indivíduo.

2.12 Percepção sonora

As características físicas do som, tais como intensidade, frequência, timbre, etc, não estão linearmente relacionadas com a forma com que o percebemos.

Pesquisas realizadas em décadas anteriores [Everest, 2001] puderam revelar alguns aspectos da não-linearidade auditiva. Através de processos experimentais, algumas características subjetivas da audição foram estudadas e analisadas estatisticamente tornando possível a quantificação estes efeitos. Como resultado destes estudos, o modo como o sistema auditivo capta e processa o som foi melhor entendido e, a partir daí, foram criadas unidades

subjetivas como o *phone*, o *son*e e o *mel*, que puderam relacionar algumas características físicas do som com as subjetivas.

O sumário abaixo apresenta algumas características de como o sistema auditivo processa a informação sonora:

- A não-linearidade da audição gera produtos de intermodulação e harmônicos espúrios.
- O sistema auditivo é capaz de criar a percepção de uma frequência fundamental a partir dos seus harmônicos, sem a necessidade daquela frequência estar presente.
- O timbre, ou qualidade do som, e o espectro de frequências do som estão relacionados, mas não são iguais.
- O Pitch, medido em *mels*, é uma medida subjetiva cujo equivalente físico é a frequência. O sistema auditivo altera a percepção da frequência de acordo com o nível de pressão sonora do som.
- O nível sonoro percebido (*loudness*) dobra a cada acréscimo de 10dB em sua pressão sonora.
- O nível sonoro percebido de um tom com nível de pressão sonora constante aumenta à medida que aumenta o tempo de exposição a este tom. Para valores maiores que 100ms, não é relatado aumento na percepção sonora, indicando que este é o tempo de integração da orelha.
- A capacidade de localização de uma fonte sonora num plano horizontal é muito mais acurada que num plano vertical.
- O sistema auditivo é capaz de combinar a informação sonora proveniente do som direto com a de suas reflexões - vindas de qualquer direção e que chegam em até 50ms - dando a impressão que todo este som vem da direção da fonte original.

As características acima citadas, principalmente as de localização da fonte sonora e de tempo de integração do sistema auditivo, são informações essenciais na determinação dos parâmetros objetivos de qualidade acústica de um ambiente, que serão estudadas no capítulo 3.

2.13 Reflexões sonoras em ambientes fechados

Como visto anteriormente, os primeiros instantes da energia sonora que chega aos ouvidos estão intimamente ligados à capacidade do sistema auditivo em localizar uma fonte sonora e em obter uma boa audibilidade do som.

Dessa forma, em se tratando de ambientes fechados, as primeiras reflexões vindas das suas diversas superfícies terão papel fundamental na construção da informação sonora que se quer transmitir.

O gráfico da Figura 2.7 apresenta o resultado das investigações realizadas por Olive e Toole [Everest, 2001] sobre os efeitos subjetivos resultantes da audição das reflexões laterais. Ele é construído a partir do nível da reflexão em relação ao som direto, e do tempo que esta leva para atingir um receptor, ou seja, o tempo de atraso da reflexão. Os ângulos de incidência destas reflexões variam de 45° a 90° num plano horizontal, sendo a fala o sinal de teste utilizado.

No gráfico, pode-se notar três curvas (A, B e C) que são os limites de mudança de percepção auditiva.

A curva A é o limite absoluto da detecção de reflexão. Abaixo desta curva, a reflexão não é percebida pelo receptor.

A reflexão cujo nível e atraso encontra-se na área situada entre as curvas A e B já pode ser percebida pelo ouvinte, que a identifica não como um evento discreto ou um efeito direcional, mas sob a impressão de espacialidade. Mesmo ele estando numa câmara anecóica, terá a impressão de que se encontra numa sala comum.

Aumentando o nível da reflexão, entra-se na área situada entre as curvas B e C onde são relatadas mudanças na imagem espacial da fonte, como o deslocamento da sua posição original e aumento do seu tamanho aparente.

Acima da curva C, o receptor percebe a reflexão como um eco discreto. Este efeito é extremamente prejudicial à qualidade sonora e deve ser evitado sempre que possível.

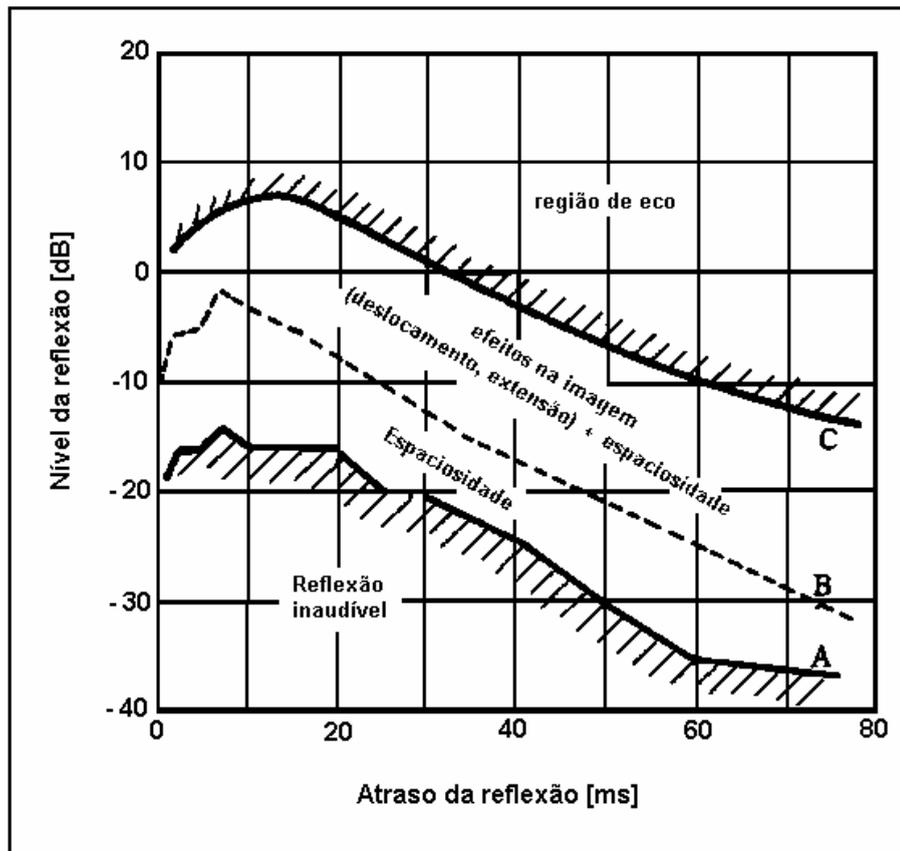


Figura 2.7 – Gráfico que relaciona o tempo de atraso e o nível de um som direto e uma reflexão com o efeito audível resultante. Fonte: Everest, 2001.

3. Acústica arquitetônica

Este capítulo versa sobre os critérios de avaliação acústica de ambientes, apresentando os termos descritores de percepção acústica, os atributos subjetivos a eles relacionados e os parâmetros objetivos que os quantificam.

3.1 Introdução

O estudo da acústica arquitetônica tem como marco inicial os trabalhos realizados pelo então professor de física da Universidade de Harvard, Wallace C. Sabine, em 1895. Alguns anos depois, Sabine trabalharia como consultor acústico na reforma da *Boston Music Hall*, tornando-a a primeira sala projetada segundo os princípios científicos da acústica. A *Symphony Hall*, como ficou denominada após a reforma, é ainda hoje uma das salas de concerto referênciais no mundo.

Alguns anos mais tarde, em 1955, Leo L. Beranek, doutor em física pela Universidade de Harvard e renomado consultor acústico, motivado por uma crítica publicada num jornal a respeito da validade dos princípios da acústica frente aos péssimos resultados encontrados em algumas salas de concerto, decide pesquisar a qualidade acústica das diversas salas encontradas ao redor do mundo.

Em 1962, Beranek lança o livro *Music, Acoustic and Architecture*, resultado de sua pesquisa em 54 salas de concerto de várias partes do mundo, onde define novos critérios para a avaliação da qualidade acústica baseada, principalmente, em atributos subjetivos.

Em trabalhos subsequentes ao de Beranek, junto com contribuições de outros autores, pode-se definir uma maneira de quantificar estes atributos subjetivos através de parâmetros objetivos mensuráveis obtendo-se, assim, uma maneira muito mais ampla de se avaliar a qualidade acústica de ambientes.

3.2 Termos descritores de percepção acústica

A partir das impressões e percepções sonoras vivenciadas por músicos, críticos e engenheiros acústicos em eventos sinfônicos, desenvolveu-se uma linguagem que procura traduzir aquelas sensações, de caráter abstrato e subjetivo, em termos mais claros, objetivos e de compreensão uniforme.

Estas percepções que, em grande parte, como enfatiza Mirol, 2002, possuem conotação visual, tátil ou até emocional, como por exemplo, a de um som “brilhante”, “opaco”, “aveludado”, “agressivo” ou “envolvente”, foram, então, agrupadas numa série de termos descritores de qualidade acústica no intuito de facilitar o diálogo entre os profissionais da área e estimular a discussão sobre a influência do ambiente na produção, transmissão e percepção da música.

Como dito anteriormente, estes termos surgiram a partir das audições de eventos sinfônicos realizados em salas de concerto. Portanto, originalmente, são definidos tendo como referência aquele tipo de ambiente, onde a “fonte sonora” é uma orquestra. Entretanto, salvo alguns termos específicos, os demais podem ser utilizados para descrever a percepção acústica de qualquer tipo de recinto sob qualquer tipo de evento sonoro, como salas de ópera, teatro, casa de shows, cinema, etc.

Abaixo são apresentados os termos mais comuns utilizados pelos profissionais de acústica [Valadares, 2002 e Beranek, 1962].

- **Clareza (clareza):** Habilidade de ouvir um detalhe musical. Esta relacionada a audição das notas musicais iniciais e o grau de distinção entre elas. Depende criticamente de fatores musicais como agilidade e intenção dos músicos, mas é também intimamente relacionada à acústica da sala.
- **Reverberação:** Audição da persistência sonora nas frequências médias que persiste no recinto após sua interrupção repentina
- **Vividez:** Relativo ao tempo de reverberação nas médias e altas frequências (acima de 350Hz). Um recinto reverberante é denominado vivo enquanto que um recinto com tempo de reverberação curto é denominado morto ou seco
- **Brilho:** Um som tocado com brilho, clareza, rico em harmônicos é denominado brilhante. Neste tipo de som, as médias frequências são proeminentes e decaem vagarosamente.
- **Calidez:** Audição da força dos tons baixos (75Hz - 350Hz) em relação aos tons de média e alta frequência (350Hz - 1400Hz). Uma sala bastante reverberante em baixas frequências é dita como soando "quente". Recintos com baixos muito fortes ou como excessiva atenuação das altas frequências é dito como sendo "escuro"

- **Intimidade:** Audição que induz a percepção de uma sala como um recinto pequeno, embora suas dimensões físicas reais sejam bem maiores. Este termo sugere ao ouvinte o tamanho do espaço do recinto.
- **Audibilidade:** Audição do som direto e reverberante, avaliando o conforto das passagens mais intensas e a capacidade de audição das passagens menos intensas.
- **Difusão:** Sensação de envolvimento e imersão nos sons.
- **Ofuscamento Acústico:** Surge da analogia com o ofuscamento visual, em termos das condições de superfícies do ambiente que produzem reflexões sonoras com antecedência, dureza e rispidez.
- **Balço:** Audição do vigor e qualidade entre as várias seções da orquestra e/ou entre a orquestra e o solista. É influenciado por fatores acústicos e musicais.
- **Ecos:** Percepção de sons refletidos discretos e atrasados em certa direção e com intensidade audível suficiente para causar desconforto na audição, tanto dos músicos quanto da audiência.
- **Espaciosidade:** Sensação relacionada a largura aparente da fonte, onde o ouvinte percebe a fonte sonora como sendo mais larga que a largura visual.
- **Coesão:** É definido como uma mistura de sons de vários instrumentos da orquestra de forma que o ouvinte perceba-os como expressão de uma textura musical.
- **Conjunto:** Refere-se a habilidade dos músicos em tocarem juntos, de forma que muitas linhas melódicas soem como uma única. Depende da habilidade dos músicos em ouvir entre si, portanto, pode ser dificultada pelo projeto do palco.
- **Resposta imediata:** Capacidade da sala em responder imediatamente às notas sonoras. Está relacionada com a maneira com que as primeiras reflexões atingem os músicos.
- **Textura:** Impressão subjetiva dos ouvintes derivada do padrão no qual a seqüência das primeiras reflexões chegam aos seus ouvidos. Uma boa textura requer um grande número de reflexões uniformes.
- **Faixa dinâmica:** Intervalo de nível sonoro no qual a música pode ser ouvida na sala; vai do menor nível produzido pela audiência até o maior nível produzido pela orquestra. Ela é determinada pela força da orquestra junto com as características acústicas da sala.

- Ruído de fundo: Audição de sons que não sejam aqueles que a orquestra produz. Qualquer ruído externo pode causar distração e interferir na execução das peças devendo, portanto, ser evitado.
- Qualidade tonal: A qualidade tonal é a beleza do tom. Como um fino instrumento, a sala de concerto deve possuir uma qualidade tonal fina. A qualidade tonal pode ser prejudicada por vários meios, tais como ressonância e distorção. Outro efeito consiste na sensação de fontes deslocadas devido a reflexões que focalizam grande parte da energia sonora em direção a uma parte específica da audiência, de modo que os ouvintes percebam o som como emanado de uma determinada superfície ao invés de vir direto da orquestra.
- Distribuição sonora: A qualidade da sala é debilitada se parte da audiência está sujeita a sons de qualidade inferior, como em locais abaixo de balcões, nas laterais e na frente da sala, ou em certos pontos sujeitos a ecos, confusões ou falta de clareza. Consistem em pontos mortos da sala segundo os músicos. Os acústicos usualmente usam este termo apenas em referência aos locais onde a música é especialmente fraca.

3.3 Atributos Acústico e Parâmetros Objetivos

A partir dos termos descritores, é proposto um conjunto de atributos para verificação da qualidade acústica ambiental. Para quantificar estes atributos, é formulado um conjunto de parâmetros que são obtidos a partir de medições realizadas nos recintos.

A seguir, são apresentados estes atributos acústicos e seus respectivos parâmetros objetivos [Beranek, 1962, e Valadares, 2002]. Outros autores [Barron, 1993, e Arau, 1999] apresentam estes mesmos atributos porém, em alguns momentos, com denominações diferentes.

3.3.1 Tempo de reverberação – T60

É o atributo que verifica as condições de decaimento da energia sonora do ambiente no tempo e no espaço. Pode ser definido através da equação (34) abaixo.

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{e}_0 \left(e^{-mct} \right) \cdot \left(1 - \mathbf{a}_m \right)^{ct/x} \quad (34)$$

sendo, $\mathbf{e}(t)$ é a densidade de energia por unidade de volume em função do tempo, [Ws/m³]

e_0 é a densidade de energia no início do processo de decaimento, [Ws/m^3]

t é o tempo, [s]

m é a constante de atenuação do meio, [ad]

c é a velocidade de propagação do som no ar, [ms^{-1}]

x é a distância média de percurso livre entre reflexões, [m]

\mathbf{a}_m é o coeficiente de absorção médio de Sabine, [m²]

É possível mostrar, desenvolvendo a equação (34) e fazendo certas considerações [Valadares, 2002], que o tempo em que ocorre o decréscimo de 60dB no nível de pressão sonora, conhecido como tempo de reverberação, referente ao decréscimo da densidade de energia sonora ao longo do tempo, é dado por:

$$T_{60} = \frac{55,3}{c} \cdot \left[\frac{V}{-S \ln(1 - \mathbf{a}_m) + 4mV} \right] \quad (35)$$

sendo T_{60} é o tempo de reverberação, [s]

V o volume interno do ambiente, [m^3],

S a área total das superfícies internas do ambiente, [m^2]

c a velocidade de propagação do som no ar, [ms^{-1}]

m a constante de atenuação do meio, [m^{-1}]

Nesta equação, o termo $-S \ln(1 - \alpha_m)$ e $4mV$ referem-se, respectivamente, a absorção do som nas superfícies internas e a absorção do som no ar. Desprezando esta última e considerando a velocidade do som à temperatura ambiente (20°C) $c = 343$ m/s, temos.

$$T_{60} = \frac{0,161V}{S \mathbf{a}_m} \quad (36)$$

Esta equação é conhecida como equação de Sabine. O T_{60} , calculado a partir desta equação, torna-se um dos poucos parâmetros de qualidade acústica possível de ser determinado ainda na etapa de projeto. A maioria dos outros parâmetros - tais como o $C50$, $C80$, LF_E , T_c , $IACC$ - só podem ser determinados a partir dos resultados de medições realizadas no ambiente já

construído. Atualmente, dispõe-se de programas de traçado de raios onde estes parâmetros podem ser determinados através da simulação em ambiente virtual.

A forma mais usual de medir o tempo de reverberação é excitar o ambiente durante um tempo suficiente para que se forme um campo difuso, cessar a fonte e em seguida medir o tempo de decaimento da pressão. O tempo em que a pressão decair 60dB (1 milionésimo da energia da fonte) será o tempo de reverberação. Usualmente é medido em bandas de oitava no espectro de audiofrequência.

No sentido de eliminar alguns componentes de carácter aleatório no momento da medição que podem prejudicar a leitura do resultado, faz-se uma média entre as curvas obtidas em várias medições. Este processo, entretanto, é um tanto demorado e dispendioso.

Schroeder, 1965, demonstrou que a média quadrática de várias respostas obtidas através da aplicação de um ruído branco num sistema pode ser alcançada integrando o quadrado da sua resposta impulsiva, de zero a “infinito”. Em outras palavras, pode-se obter o equivalente à média de várias curvas de decaimento, conforme descrito anteriormente, em todo o espectro de frequências, a partir da integração de uma única resposta impulsiva. A resposta impulsiva, bem como as técnicas para a sua obtenção são discutidos no capítulo 5. A equação (37) expressa matematicamente esta relação [Barron 1993].

$$\langle n^2(t) \rangle = \int_0^{\infty} h^2(\mathbf{t}) d\mathbf{t} \quad (37)$$

sendo $n(t)$ a resposta ao ruído aleatório (“ $\langle \rangle$ ” implica na média de várias respostas).

$h(\mathbf{t})$ a resposta impulsiva do sistema.

O resultado é uma curva de decaimento livre de componentes de carácter aleatório, o que melhora a precisão da análise além de agilizar o processo de medição. Gomes, 1998, aponta como sendo os pontos cruciais desta técnica a determinação dos limites de integração da resposta impulsiva e a garantia de que o sistema seja invariante no tempo.

A partir desta curva de decaimento é possível não só determinar o tempo de reverberação mas, também, a maioria dos demais parâmetros objetivos por serem estes baseados em relações de energia sonora que, em última análise, é derivada da integração da resposta impulsiva. Também é possível, a partir desta curva, detectar problemas acústicos relativos ao recinto. O mais comum deles refere-se a espaços acoplados com tempos de reverberação diferentes,

indicados na curva por decaimentos distintos com taxas de inclinação diferentes, como pode ser visto na Figura 3.1.

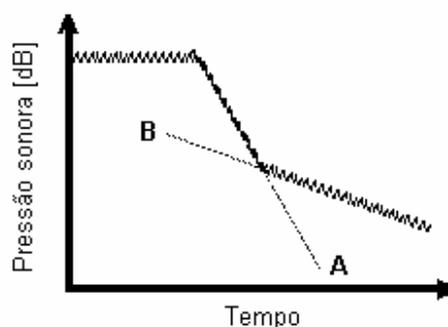


Figura 3.1 - Curva de decaimento com taxas de inclinação diferentes. Fonte: Everest, 2001

Como mostra Everest, 2001, se o decaimento ótimo (tempo de reverberação ótimo) para uma dada sala é aquele percorrido pela curva A, uma pessoa localizada próxima ao ambiente acoplado, cuja curva de decaimento é dado pela curva B, ouvirá um som de qualidade inferior.

Os valores de tempo de reverberação ótimo são específicos para cada tipo de sala; dependem do programa a ser executado, do volume da sala, da quantidade de cadeiras dentre outras coisas. Estes valores são facilmente encontrados na literatura especializada.

A seguir, é apresentada uma tabela com valores de tempo de reverberação ótimo para salas de múltiplo uso, de acordo com o uso e com a capacidade da platéia. Também é apresentado na Figura E 3 um gráfico com o tempo de reverberação ótimo em função do volume para diversos ambientes de acordo com a recomendação dada pela NBR 12179 [Norma, 1998].

Tabela 3.1 – Valores de tempo de reverberação ótimos para salas de múltiplo uso. Fonte: Barron, 1993

Uso	Capacidade máxima da platéia	Tempo de reverberação ótimo [s]
Música popular	----	< 1,0
Teatro dramático	1300	0,7 – 1,0
Opera e Ballet	2300	1,3 – 1,8
Música de Câmara	1200	1,4 – 1,8
Música de Orquestra	3000	1,8 – 2,2

O tempo de reverberação ideal para cada tipo de sala é alcançado através do tratamento acústico interno. Este deve distribuir e determinar a quantidade ótima de absorção sonora de

forma ajustar as especificações dos materiais de revestimento e acabamento interno às questões acústicas [Valadares, 2002].

No caso de salas de múltiplo uso, onde cada programa possui seu tempo de reverberação ótimo (ver Tabela 3.1 acima), deve-se optar pela utilização de elementos de acústica variável para obter maior controle do $T60$. Alguns exemplos dos elementos mais utilizados são apresentados abaixo, de acordo com a forma através da qual modificam o tempo de reverberação do ambiente.

1) Variação do volume da sala: Tem a vantagem de alterar o tempo de reverberação sem diminuir o nível sonoro total na sala. Entretanto, é pouco eficiente e bastante dispendiosa. Exemplos:

- Teto suspenso construído com varios painéis independentes que podem ser elevados ou baixados. É o sistema mais eficiente. Pode ser encontrado na Sala São Paulo, Brasil.
- Teto suspenso construído com varios painéis independentes que podem ser abertos ou fechados. Necessita de uma área aberta maior de 40%, quando na condição de aberto, para haver o acoplamento entre os espaços. O espaço acima do teto deve ser altamente reverberante para aumentar a eficiência do sistema.
- Portas localizadas no entorno da platéia abrindo para pequenas salas reverberantes. Apresenta baixa eficiência e problemas de acoplamento acústico entre espaços.

2) Variação da absorção acústica: É a técnica mais comum e a que produz maior variação do tempo de reverberação. Reduz a audibilidade da sala, principalmente nos lugares mais afastados da fonte. Exemplos:

- Em salas pequenas, pode-se utilizar cortinas retráteis nas paredes do entorno do palco ou da platéia.
- Painéis absorvedores (*baffle*) que podem ser dispostos manualmente ou mecanicamente no recinto.
- Painéis basculantes com uma face absorvente e outra reflexiva. O lado absorvente é exposto para diminuir o tempo de reverberação.
- Painéis triangulares rotativos com faces absorvente, reflexivas e difusivas. Utilizado no *Espace de Projection, no Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Music, Paris*.

3) Sistemas eletrônicos de reverberação: Uso de equipamentos eletrônicos para adicionar reverberação e/ou nível sonoro. Proporcionam um melhor controle dos parâmetros a serem modificados porém, têm sua limitação na qualidade do equipamento que pode tornar o som “artificial”. Alguns exemplos destes sistemas são:

- *Delta Stereophony System*: É composto por um microfone localizado próximo a fonte sonora (locutor, solista, instrumento, etc..) e um arranjo de (tipicamente 10) alto-falantes localizados no entorno da audiência. O sinal do microfone alimenta os auto-falantes com atrasos (*delays*) ajustados para proporcionar aumento de nível sonoro (reforço sonoro) sem prejudicar a percepção da localização da fonte.
- *Assisted Resonance*: Envolve vários microfones e auto-falantes instalados no entorno da audiência. O tempo de reverberação é alcançado através do controle de feedback (ou ressonância) entre microfone e auto-falantes. É desenhado para operar na faixa de frequências média-graves [Parkin et. al., 1965].
- *Multiple Channel Reverberation*: Funciona da mesma forma que o sistema anterior porém trabalha em faixa ampla de frequências. Sua operação é mais complexa e exige muitos canais para obter um aumento considerável de nível sonoro (tipicamente 100 canais para um acréscimo de 3dB).
- *Acoustical Control System*: Também utiliza um arranjo de microfones direcionais (tipicamente 12) próximos ao palco alimentando um arranjo de auto-falantes direcionados para a platéia. O reverberação é alcançada através do processamento dos sinais vindos dos microfones. Neste sistema, é possível controlar independentemente o nível de reforço sonoro e o tempo de reverberação.

3.3.2 Tempo de decaimento inicial – EDT

O tempo de decaimento inicial é expresso da mesma maneira que o tempo de reverberação porém baseados no decaimento dos primeiros 10dB da pressão sonora. Segundo Barron, 1993, o EDT está melhor relacionado com o julgamento subjetivo de reverberação que a tradicional medida do $T60$.

O EDT, por ser medido logo nos primeiros instantes do decaimento da pressão sonora, torna-se um parâmetro bastante robusto às variações do campo difuso e a situações de grande ruído de fundo sendo, portanto, preferido na determinação da reverberação de recinto com

público presente. A partir de uma consistente base de dados experimentais, como afirma Valadares, 2002, para ambientes do porte de salas de concerto atualmente existentes observa-se a seguinte relação:

$$EDT_{vz} = 0,2 + T60_{oc} \quad (38)$$

sendo EDT_{vz} o tempo de decaimento inicial sem audiência [s] e $T60_{oc}$ é o tempo de reverberação, $T60$, medido com audiência presente, [s].

3.3.3 Calidez - BR

É o atributo que verifica as condições de persistência dos sons de baixa frequência em relação aos de média frequência. Diz-se que uma sala possui calidez quando possui uma boa resposta nas frequências graves. É quantificado através do *índice de calidez* (I_c), ou pela de *razão de baixo* (BR), ambos expressos de acordo com a equação (39) abaixo:

$$I_c = \frac{T60_{125} + T60_{250}}{T60_{500} + T60_{1000}} \quad (39)$$

Na equação (39), o subíndice do parâmetro T60 diz respeito à banda de frequência de oitava em que o parâmetro foi medido. Valadares, 2002, cita alguns aspectos construtivos para melhorar a percepção dos sons graves num recinto, que são transcritos a seguir:

- Evitar o uso de madeira com espessura inferior a 2,5cm, preferindo uma espessura acima de 3,8cm, limitando-se ao uso estritamente necessário deste material;
- Usar camada de gesso com espessura acima de 2,5cm, (paredes ou teto) e alvenaria de bloco de concreto pintada nas paredes laterais. Se a aparência de madeira é desejada, aplicar papel de parede direto sobre o gesso;
- Selecionar poltronas que não absorvam em excesso as baixas frequências;

Em ambientes com baixa capacidade de absorção de frequências graves, utilizar sistemas especiais de absorção tais como ressonadores de Helmholtz ou absorvedores diafragmáticos (membrana).

3.3.4 Brilho – I_b

É o atributo que verifica as condições de persistência dos sons de alta frequência em relação aos de média frequência. Portanto, uma sala brilhante é aquela que possui uma boa resposta nas altas frequências. Este atributo é quantificado através do índice de brilho, I_B , que é dado pela equação (40).

$$I_B = \frac{T60_{(2K)} + T60_{(4K)}}{T60_{(500)} + T60_{(1K)}} \quad (40)$$

sendo $T60_{(i)}$ o tempo de reverberação na banda de oitava de frequência central de “i” Hz.

O controle de brilho pode ser alcançado variando-se a quantidade de material de absorção acústica no recinto. De uma maneira geral, estes materiais (absorventes porosos) tem sua maior eficiência na faixa de altas frequências, o que facilita o controle. Cortinas, carpetes e os estofamentos das cadeiras são outros materiais que contribuem para a absorção sonora naquela faixa de frequências.

O valor deste parâmetro deve ser o mais alto possível, se possível igual a 1. Valores abaixo de 0,8 não são recomendados.

3.3.5 Claridade (clareza) – C80 e C50

É o atributo que verifica a relação entre a energia inicial e reverberante do ambiente e suas implicações sobre a nitidez auditiva. Está relacionada com a capacidade do sistema auditivo em combinar a energia que chega nos instantes iniciais (tipicamente entre 5ms a 35ms) com a energia do som direto para determinar a audibilidade do mesmo.

É quantificado pelo parâmetro $C80$, dado em dB, que relaciona a energia sonora que chega nos primeiros 80ms com a energia que chega após este tempo, sendo preferencialmente calculado em bandas de média frequência.

O $C80$ é usualmente calculado quando o programa é música. Quando se trata da fala, utiliza-se o $C50$, onde a energia inicial é medida nos primeiros 50ms.

$$C80 = 10 \log \left(\frac{\int_0^{0,08} p^2(t) dt}{\int_{0,08}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (41)$$

$$C 50 = 10 \log \left(\frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_{0,08}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (42)$$

sendo $p(t)$ a variação temporal da pressão sonora RMS num determinado ponto do ambiente, [Pa].

Proporcionar um grande número de reflexões iniciais é a melhor maneira para se obter um ambiente com boa clareza. Isto pode ser alcançado, por exemplo, estreitando-se as paredes laterais do recinto ou instalando painéis refletores nas paredes e no teto. No caso da existência de balcões laterais, pode-se utilizar os frontões como superfície refletora difundindo a energia sonora inicial na audiência.

Valores típicos de $C80$ obtidos em salas de concerto na Inglaterra [Barron, 1993] variam entre -3dB e 6dB enquanto que os valores ótimos sugeridos por esse autor estão na faixa de -2dB a 2dB . Arau, 1999, sugere ainda valores acima de 6dB para salas de teatro. Valores de $C50$ acima de 0dB são considerados resultados satisfatórios.

3.3.6 Audibilidade – G

É o atributo que verifica as condições de audibilidade do ambiente. É mensurado através do parâmetro G , medido em dB, que relaciona a energia que chega num determinado ponto do ambiente emitida por uma fonte sonora com a energia emitida por esta mesma fonte, estando o receptor a 10m da fonte num ambiente livre de reflexões (câmara anecóica). O *fator de força*, como é chamado o parâmetro G , de um ambiente será a média de várias medições tomadas neste ambiente.

$$G = 10 \log \left(\frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \right) \quad (43)$$

sendo $p(t)$ é a variação temporal da pressão sonora RMS num determinado ponto do ambiente, [Pa];

$p_{10}(t)$ a variação temporal da pressão sonora RMS medida a 10m de uma fonte sonora em campo livre (câmara anecóica), [Pa].

Valadares, 2002, apresenta uma outra abordagem para o cálculo de G que dispensa a obtenção da resposta impulsiva e é expressa pela equação (44).

$$G = NPS_R - NPS_A \quad (44)$$

sendo NPS_R o nível total de pressão sonora com influência de reflexões sonoras, [dB];

NPS_A o nível total de pressão sonora sem influência de reflexões sonoras [dB], ambos medidos em, [dB].

Considerando que os valores de NPS_R e NPS_A podem ser obtidos, respectivamente das equações (45) e (46) abaixo:

$$NPS_R = NWS + 10 \log \left[\left(\frac{Q}{4pr^2} \right) + \left(\frac{4}{At} \right) \right] \quad (45)$$

$$NPS_A = NWS - 20 \log \frac{r_A}{r_{ref}} \quad (46)$$

sendo NWS o nível de potência sonora da fonte [dB];

Q o fator de diretividade [ad.];

r a distância entre a fonte sonora e o receptor [m];

r_A a distância de 10m entre fonte e receptor [m];

r_{ref} a distância de 1m tomada como referência [m];

At a absorção total do ambiente [m²].

Substituindo a equação (45) e (46) na (44), resulta em:

$$G = 10 \log \left[\left(\frac{Q}{4pr^2} \right) + \left(\frac{4}{At} \right) \right] + 31dB \quad (47)$$

A audibilidade de um ambiente é melhor representada quando o fator de força é medido nas médias frequências. O G_{mid} , pode ser calculado filtrando-se a resposta impulsiva na banda de frequência desejada.

Como pode ser visto na equação (47), o fator G , assim como o tempo de reverberação, dependem da absorção sonora existente no ambiente. Portanto, deve-se determinar o valor preferencial de G_{mid} e $T60$, para então definir o volume da sala.

Em contrapartida, caso exista a necessidade, deve-se utilizar um sistema de reforço sonoro para melhorar a audibilidade, principalmente nos lugares mais afastados da fonte. Neste sentido, pode-se optar pela instalação do chamado sistema *fly* onde as caixas de som, instaladas nas laterais do palco, são elevadas e devidamente inclinadas proporcionando uma distribuição mais uniforme da energia sonora na audiência.

Valores para G_{mid} obtidos em salas de múltiplo uso na Inglaterra variam entre -5 a 8dB , sendo que são preferíveis valores maiores que 0dB em qualquer posição na platéia [Barron, 1993].

3.3.7 Espaciosidade – LF_E , $IACC_{E4}$.

Este atributo que avalia as condições de impressão espacial nos ouvintes é mensurada através dos parâmetros LF_E e $IACC_{E4}$. Uma outra forma mais simplificada de se avaliar tal impressão, segundo Valadares, 2002, é pela comparação entre o fator de força em baixas frequências, G_{low} , e o fator de força em médias frequências, G_{mid} .

O parâmetro LF_E , derivado de testes subjetivos, é considerado uma medida linear de impressão espacial acústica. Ele consiste na razão entre a energia sonora provinda apenas das reflexões laterais e aquela oriunda de todas as direções incluindo o som direto, referente ao som inicial, ou seja, nos primeiros 80ms.

$$LF_E = \frac{\int_{0,005}^{0,08} p_{F8}^2(t) dt}{\int_0^{0,08} p^2(t) dt} \quad (48)$$

sendo LF_E , é fração da energia inicial lateral, [ad];

$p(t)$ é a variação temporal da pressão sonora RMS num ponto do ambiente, [Pa];

$p_{F8}(t)$ é a a variação temporal da pressão sonora RMS no mesmo ponto anterior porém utilizando um microfone com o padrão polar em “figura 8” com a parte de ganho nulo voltada em direção a fonte, [Pa].

Outra maneira de quantificar a espaciosidade é através do coeficiente de correlação interaural, $IACC$, que consiste numa medida bi-aural da diferença de sons que atingem os dois s a partir de uma fonte sonora. Para tal, utiliza-se um microfone tipo *dummy head* que simula o formato de uma cabeça humana.

$$IACF(\mathbf{t}) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) \cdot p_R(t + \mathbf{t}) dt}{\left(\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t) dt \right) \cdot \left(\int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t) dt \right)} \quad (49)$$

sendo $IACF(\mathbf{t})$ a função de correlação cruzada interaural;

$p_L(t)$ e $p_R(t)$ são, respectivamente, a pressão sonora RMS no esquerdo e direito, [Pa].

Dado que o tempo gasto por uma onda sonora incidindo perpendicularmente num lado da cabeça para chegar ao outro lado é de 1ms, é usual variar o τ de -1 a 1 s. O $IACC$ é, então, calculado como sendo:

$$IACC_{E4} = |IACF(\mathbf{t})|_{MAX}, \text{ para } -1 < \mathbf{t} < 1 \quad (50)$$

sendo $IACC$ é o coeficiente de correlação cruzada interaural.

O sub-índice $E4$ indica o tempo inicial (*early*), ou seja, $t_1 = 0$ e $t_2 = 80$ ms medido pela a média nas 4 bandas de frequência de 500, 1000, 2000 e 4000Hz.

Valadares, 2002, propõe uma outra equação para o cálculo do parâmetro LF_E baseado no conceito de relação de energia:

$$LF_E = 10 \log(10^{[0,1(NPS_a - NPS_b)]}) \quad (51)$$

sendo NPS_a é o nível total de pressão sonora oriunda de reflexões sonoras laterais apenas, em um posição na audiência, [dB];

NPS_R é o nível total de pressão sonora com influência de reflexões sonoras e do som direto, [dB];

r é a distância limite de afastamento entre fonte e receptor para assegurar a determinação de NPS_a e NPS_b no intervalo inicial de 80ms.

Os valores de NPS_a e NPS_b podem ser estimados pela equação (23). No caso de NPS_a , considerar absorção total no piso e no teto, isto é, fazer com que o coeficiente de absorção nestas áreas sejam iguais a 1.

Para uma boa Espaciosidade acústica, é importante que o ambiente disponha de aspectos construtivos que proporcionem um grande número de reflexões sonoras providas de suas paredes laterais. Isto pode ser alcançado, por exemplo:

- Estreitando as paredes laterais, de preferência, mantendo uma forma retangular, principalmente em se tratando de salas de concerto;
- Instalando painéis refletores nas paredes laterais do recinto;
- Dando preferência a construção de balcões laterais, utilizando os frontões como refletor de energia sonora;
- Utilizando caixas de som nas paredes laterais que reproduzam o som emitido pela fonte. Este sinal deve ser eletronicamente processado para não prejudicar a orientação espacial da fonte.

Valores preferências para o parâmetro LF_E , encontram-se na faixa de 0,1 a 0,35.

3.3.8 Envolvimento – $IACC_{L3}$, SDI

É o atributo que verifica as condições de envolvimento/imersão da fonte sonora. Ele pode ser mensurado através do coeficiente de correlação cruzada de sons tardios, $IACC_{L3}$, ou, de forma simplificada, através de uma inspeção visual das irregularidades superficiais internas do recinto e mensurada pelo índice de difusão sonora na sala, SDI.

O modo como se calcula o $IACC_{L3}$ é idêntico ao $IACC_{E4}$, porém, no caso do $IACC_{L3}$ utiliza-se os limites de integração $t_1 = 80\text{ms}$ e $t_2 = 1\text{s}$, realizando a média nas bandas de frequência de 500Hz, 1KHz e 2KHz..

O parâmetro SDI pode ser calculado da seguinte forma:

$$SDI = \frac{\sum_{i=1}^n s_i d_i}{\sum_{i=1}^n s_i} \quad (52)$$

sendo s_i a área de cada superfície interna, excluindo-se o piso, [m²];

d_i é o coeficiente de difusão sonora, [ad.]. Se alto, $d = 1$; médio, $d = 0,5$; baixo, $d = 0$, conforme Valadares, 2002.

Pode-se dispor de algumas maneiras para criar um recinto com um bom Envolvimento, tais como:

- Criar irregularidades em tantas superfícies quantas forem possíveis, aumentando o coeficiente de difusidade das mesmas;
- Evitar áreas de focalização sonora dentro da sala, evitando superfícies côncavas.
- Evitar balcões profundos, dando preferência aos balcões laterais com pequenas profundidade;
- Criar irregularidades nos frontões dos balcões laterais.
- Utilizar caixas de som nas paredes laterais e traseira que reproduzam o som emitido pela fonte. Este sinal deve ser eletronicamente processado para criar a impressão de envolvimento.

3.3.9 Intimidade – ITDG

Atributo que verifica a condição dimensional do recinto percebido pelo ouvinte. É quantificado pelo parâmetro ITDG que mede a diferença temporal entre o som direto e a primeira reflexão. É obtido em uma única posição no centro da sala na audiência principal [Valadares, 2002]. É dado por:

$$ITDG = \frac{x_i - x_d}{c} \quad (53)$$

sendo $ITDG$ o Intervalo de Tempo de Atraso Inicial, [s];

x_d a distância entre fonte e receptor percorrida pelo som direto, [m];

x_i a distância entre fonte e receptor percorrida pela primeira reflexão, [m];

c a velocidade do som.

Valores de *ITDG* da ordem de 20ms são um indicativo de recinto com boa Intimidade. Isto pode ser alcançado, aproximando as fontes sonoras naturais da boca de cena do palco ou tornando a sala um pouco mais estreita [Valadares, 2002].

3.3.10 Tempo Central – T_c

O tempo central é um parâmetro relacionado à inteligibilidade da palavra. Corresponde, matematicamente, ao primeiro momento (ou centro de gravidade) do quadrado da resposta impulsiva. Quanto menor o T_c , melhor pode ser esperada a inteligibilidade da palavra na posição do receptor.

$$T_c = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (54)$$

sendo T_c o tempo central, [s];

t é o tempo, [s];

$p(t)$ a variação temporal da pressão sonora rms num ponto do ambiente, [Pa];

Na prática, o T_c é altamente correlacionado com o *EDT* (coeficiente de correlação típico = 0,975). Portanto, em algumas ocasiões, sua medição é descartada.

3.3.11 Definição – D50

Atributo usualmente relacionado à inteligibilidade da palavra. Um recinto com baixo índice de Definição é percebido como pouco íntimo e muito vivo, normalmente, devido a um excesso de reverberação. À medida que este índice aumenta, subjetivamente tem-se a impressão que a calidez piora.

É quantificado através do parâmetro D50 que relaciona a energia sonora inicial (50ms) e a energia total que atinge um receptor num dado ponto da sala. Usualmente, é apresentada sob forma de porcentagem.

$$D50 = \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (55)$$

sendo $D50$ é o parâmetro Definição, [ad.]

$p(t)$ a variação temporal da pressão sonora rms num ponto do ambiente, [Pa];

Valores ótimos para este parâmetro encontram-se na faixa de 50% a 65%.

Como visto acima, diminuir o tempo de reverberação é uma forma de melhorar a definição de uma sala assim como aumentar o número de reflexões iniciais que atingem o ouvinte das diversas formas já vista nesta capítulo

Por ser um parâmetro relacionado à inteligibilidade da palavra, deve ser, preferencialmente, calculado nas bandas de média frequência.

3.3.12 Inteligibilidade – L&B, U50 e STI

Baseado em testes de inteligibilidade em campos sonoros simulados, os pesquisadores Lochner e Burguer propuseram um parâmetro similar aos parâmetro que quantificam a Claridade e a Definição. Neste outro parâmetro que relaciona a energia útil (inicial) com a energia não útil (posterior), foi introduzido uma função $a(t)$ de ponderação para a resposta impulsiva que relaciona o atraso da primeira reflexão em relação a chegada do som direto, de acordo com o gráfico da Figura 3.2.

$$L \& B = 10 \log \left(\frac{\int_0^{0,095} a(t) \cdot p^2(t) dt}{\int_{0,095}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (56)$$

sendo $L\&B$ a taxa de Lochner and Burger, [dB]

$p(t)$ a variação temporal da pressão sonora RMS num ponto do ambiente, [$N.m^{-2}$];

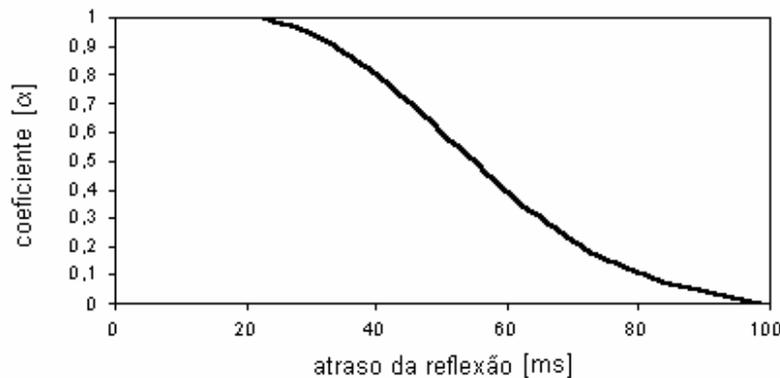


Figura 3.2 - Variação do coeficiente α em função do atraso da reflexão em relação ao som direto. Fonte: Barron, 1993.

Os parâmetros $L&B$ e Tc estão muito bem correlacionados com a inteligibilidade e, neste aspecto, são superiores ao $D50$. Porém, testes mostram que a correlação entre todas estas medidas têm coeficiente maior que 0,92, tornando a escolha de uma ou outra arbitrária.

Outro parâmetro que relaciona a energia útil com a não útil é o $U50$. A diferença é que o cálculo deste parâmetro leva em consideração o ruído de fundo do ambiente, através da adição da relação sinal/ruído (S/N) na equação [Barron, 1993]:

$$U50 = 10 \log \left(\frac{D50}{1 - D50 + (N/S)} \right) \quad (57)$$

sendo $U50$ uma relação entre energia útil e não útil, [dB];

$D50$ é a Definição, [ad]

(N/S) é a relação ruído/sinal dada em termos de energia.

Uma última medida de inteligibilidade é através do parâmetro STI (*speech transmission index*). Esta medida acomoda ambos aspectos da resposta impulsiva e da relação sinal/ruído. A idéia por trás desta medida é de que para se ter uma boa inteligibilidade o envelope do sinal deve ser preservado. Para medir a distorção no envelope do sinal, um sinal de ruído é modulado de uma forma senoidal. Cria-se, então, a partir de várias medidas em frequência uma função de transferência de modulação, MTF . As $MTFs$ nas diferentes frequências de sinal são, então, usadas para calcular o STI.

3.4 Predição da qualidade acústica subjetiva

Baseado nos resultados dos parâmetros obtidos na investigação dos atributos acústicos do ambiente, pode-se determinar a qualidade acústica subjetiva de um recinto através de uma equação que quantifica os resultados parciais de cada um dos parâmetros examinados anteriormente.

Duas formas de quantificar a qualidade acústica de um recinto foram estudadas pelo autor. A primeira é proposta por Ando, 1985, e a segunda, utilizada na parte experimental deste trabalho, é proposta por Arau, 1999.

Este último propõe o que denomina de *fator de mérito global* como parâmetro quantificador da qualidade acústica subjetiva do ambiente. Este fator é o resultado da média aritmética dos fatores de mérito relativos a cada um dos atributos, conforme exposto abaixo.

$$M_{Int.} = \begin{cases} 1 & , \text{ para } 0 < ITDG \leq 20ms \\ 2 - ITDG / 20 & , \text{ para } 20 < ITDG < 40ms \\ 0 & , \text{ para } ITDG \geq 40ms \end{cases} \quad (58)$$

sendo M_{Int} o fator de mérito relativo ao parâmetro ITDG, [ad.];

ITDG o parâmetro medido relativo à Intimidade, [ms].

$$M_{T60mid} = \begin{cases} 0 & , \text{ para } T60_{mid} \leq 0,9T60_{opt} - 0,5 \\ 1 - (1,8T60_{opt} - 2T60_{mid}) & , \text{ para } 0,9T60_{opt} - 0,5 < T60_{mid} < 0,9T60_{opt} \\ 1 & , \text{ para } 0,9T60_{opt} \leq T60_{mid} \leq T60_{opt} \\ 1 - 2(T60_{mid} - T60_{opt}) & , \text{ para } T60_{opt} < T60_{mid} < T60_{opt} + 0,5 \\ 0 & , \text{ para } T60_{mid} \geq T60_{opt} + 0,5 \end{cases} \quad (59)$$

sendo M_{T60mid} o fator de mérito relativo ao parâmetro T60, [ad.]

$T60_{mid}$ o tempo de reverberação medido em médias frequências, [s];

$T60_{opt}$ o tempo de reverberação ótimo, [s];

$$M_{calidez-música} = \begin{cases} 0 & , \text{para } I_C \leq 0,85 \\ 4I_C - 3,4 & , \text{para } 0,85 < I_C < 1,1 \\ 1 & , \text{para } 1,1 \leq I_C \leq 1,3 \\ 6,2 - 4I_C & , \text{para } 1,3 < I_C < 1,55 \\ 0 & , \text{para } I_C \geq 1,55 \end{cases} \quad (60)$$

$$M_{calidez-teatro} = \begin{cases} 0 & , \text{para } I_C \leq 0,65 \\ 4I_C - 3,4 & , \text{para } 0,65 < I_C < 0,9 \\ 1 & , \text{para } 0,9 \leq I_C \leq 1,3 \\ 6,2 - 4I_C & , \text{para } 1,3 < I_C < 1,55 \\ 0 & , \text{para } I_C \geq 1,55 \end{cases} \quad (61)$$

sendo $M_{calidez-teatro}$ o fator de mérito relativo à Calidez quando o programa é teatro, [ad];

$M_{calidez-música}$ o fator de mérito relativo à Calidez quando o programa é música,[ad];

I_C o Índice de Calidez medido no ambiente, [ad].

$$M_{Brilho} = \begin{cases} 0 & , \text{para } I_B \leq 0,45 \\ 2,86I_B - 1,29 & , \text{para } 0,45 < I_B < 0,8 \\ 1 & , \text{para } 0,8 \leq I_B \leq 1 \\ 3,86 - 2,86I_B & , \text{para } 1 < I_B < 1,35 \\ 0 & , \text{para } I_B \geq 1,35 \end{cases} \quad (62)$$

sendo M_{brilho} o fator de mérito relativo ao Brilho, [ad.];

I_B o Índice de Brilho medido no ambiente, [ad].

$$M_{EDT-concerto} = \begin{cases} 0 & , \text{para } EDT_{mid} \leq 0,4T_{60mid} \\ 2(EDT_{mid} / T_{60mid}) - 0,8 & , \text{para } 0,4T_{60mid} < EDT_{mid} \leq 0,4T_{60mid} \\ 1 & , \text{para } 0,9T_{60mid} < EDT_{mid} \leq T_{60mid} \\ EDT_{mid} / T_{60mid} & , \text{para } EDT_{mid} > T_{60mid} \end{cases} \quad (63)$$

$$M_{EDT-ópera} = \begin{cases} 0 & , \text{para } EDT_{mid} \leq 0,25T_{60mid} \\ 2(EDT_{mid} / T_{60mid}) - 0,5 & , \text{para } 0,25T_{60mid} < EDT_{mid} \leq 0,75T_{60mid} \\ 1 & , \text{para } EDT_{mid} > 4T_{60mid} \end{cases} \quad (64)$$

$$M_{EDT-teatro} = \begin{cases} 0 & , \text{para } EDT_{mid} \leq 0,35T_{60mid} \\ 4(EDT_{mid} / T_{60mid}) - 1,4 & , \text{para } 0,35T_{60mid} < EDT_{mid} \leq 0,6T_{60mid} \\ 1 & , \text{para } 0,6T_{60mid} < EDT_{mid} \leq 0,75T_{60mid} \\ 1,75 - (EDT_{mid} / T_{60mid}) & , \text{para } EDT_{mid} > 0,75T_{60mid} \end{cases} \quad (65)$$

sendo $M_{EDT-concerto}$ o fator de mérito relativo ao EDT quando o programa é concerto, [ad];

$M_{EDT-ópera}$ o fator de mérito relativo ao EDT quando o programa é ópera, [ad];

$M_{EDT-teatro}$ o fator de mérito relativo ao EDT quando o programa é teatro, [ad];

T_{60mid} o tempo de reverberação medido em médias frequências, [s];

EDT_{mid} o tempo de decaimento inicial (EDT) medido em médias frequências, [s].

$$M_{def-concerto} = \begin{cases} D_{50} / 0,45 & , \text{para } D_{50} \leq 0,45 \\ 1 & , \text{para } 0,45 < D_{50} \leq 0,6 \\ 2,2 - 2D_{50} & , \text{para } D_{50} > 0,6 \end{cases} \quad (66)$$

$$M_{def-ópera} = \begin{cases} 0 & , \text{para } D_{50} \leq 0,25 \\ 4D_{50} - 1 & , \text{para } 0,25 < D_{50} \leq 0,5 \\ 1 & , \text{para } 0,5 < D_{50} \leq 0,65 \\ 1,93 - 1,43D_{50} & , \text{para } D_{50} > 0,65 \end{cases} \quad (67)$$

$$M_{def-teatros} = \begin{cases} 0 & , \text{para } D_{50} \leq 0,45 \\ 5D_{50} - 2,25 & , \text{para } 0,45 < D_{50} \leq 0,65 \\ 1 & , \text{para } D_{50} > 0,65 \end{cases} \quad (68)$$

sendo $M_{def-concerto}$ o fator de mérito relativo à Definição quando o programa é concerto, [ad];

$M_{def-ópera}$ o fator de mérito relativo à Definição quando o programa é ópera, [ad];

$M_{def-teatro}$ o fator de mérito relativo à Definição quando o programa é teatro, [ad];

D_{50} o valor do parâmetro relativo a Definição medido no ambiente, [ad].

$$M_{claridade-concerto} = \begin{cases} 0 & , \text{para } C_{80} \leq -9 \\ 1,62 + 0,18C_{80} & , \text{para } -9 < C_{80} \leq -4 \\ 1,10 + 0,05C_{80} & , \text{para } -4 < C_{80} \leq -2 \\ 1 & , \text{para } -2 < C_{80} \leq 4 \\ 1,6 - 0,16C_{80} & , \text{para } -9 < C_{80} \leq 10 \\ 0 & , \text{para } C_{80} > 10 \end{cases} \quad (69)$$

$$M_{claridade-óperas} = \begin{cases} 0 & , \text{para } C_{80} \leq 0 \\ C_{80} / 2 & , \text{para } 0 < C_{80} \leq 2 \\ 1 & , \text{para } 2 < C_{80} \leq 6 \\ 2 - C_{80} / 6 & , \text{para } 6 < C_{80} \leq 12 \\ 0 & , \text{para } C_{80} > 10 \end{cases} \quad (70)$$

$$M_{claridade-teatro} = \begin{cases} 0 & , \text{para } C_{80} \leq 0 \\ C_{80} / 6 & , \text{para } 0 < C_{80} \leq 6 \\ 1 & , \text{para } C_{80} > 6 \end{cases} \quad (71)$$

sendo $M_{claridade-concerto}$ o fator de mérito relativo à Claridade quando o programa é concerto, [ad.];

$M_{claridade-ópera}$ o fator de mérito relativo à Claridade quando o programa é ópera, [ad.];

$M_{claridade-teatro}$ o fator de mérito relativo à Claridade quando o programa é teatro, [ad.];

C_{80} o parâmetro medido relativo a Claridade, [dB].

$$M_G = \begin{cases} 0 & , \text{para } G_m \leq 0 \\ G_m / 10, & \text{para } 0 < G_m \leq 10 \\ 1 & , \text{para } G_m > 10 \end{cases} \quad (72)$$

sendo M_G o fator de mérito relativo à Audibilidade, [ad];

G_m o fator de Força médio medido no ambiente, [dB];

O Fator de Mérito Global será dado por:

$$M_{GLOBAL} = \sum_i^n M_i / n \quad (73)$$

sendo M_{GLOBAL} o fator de mérito global, [ad.];

M_i é o fator de mérito do i -ésimo parâmetro obtido anteriormente, [ad].

Compara-se, então, o valor de M_{GLOBAL} com os valores de M_i menores que M_{GLOBAL} . Caso a diferença entre M_{GLOBAL} e M_i seja superior a 0,2, para valores de M_{GLOBAL} inferiores a 0,8, deve-se revisar a acústica do recinto em relação aquele critério, ou critérios, que a estão prejudicado.

4. Sistemas de Áudio

Este capítulo versa sobre os sistemas de áudio, seus principais componentes e os princípios básicos de projeto. Inicialmente, são descritos alguns exemplos de sistemas de áudio, suas aplicações e principais características. A seguir, apresenta-se os principais equipamentos que compõem estes sistemas, com ênfase para as suas especificações técnicas e, por último, traçam-se as linhas gerais que orientam o projeto de sistema de áudio, apresentando seus principais objetivos e cálculos.

4.1 Introdução

O desenvolvimento tecnológico ocorrido principalmente no último século na área das telecomunicações trouxe consigo o desenvolvimento do que se convencionou chamar de engenharia de áudio.

A pesquisa de novos componentes eletrônicos, o surgimento de novas técnicas de processamento de sinal, a evolução dos meios de gravação acústica, dentre outros, fez surgir uma gama de novos equipamentos destinados à área de áudio. Estes equipamentos, por sua vez, tornam-se cada vez mais complexos e sofisticados, exigindo profissionais especializados para projetá-los e operá-los.

De outro lado, a crescente demanda por tecnologia e sofisticação somadas a multiplicação de empresas de sonorização e de equipamentos cria um público consumidor exigente, forçando aquelas empresas investirem cada vez mais em pesquisa.

É nesse cenário que surge o profissional de áudio, como aquele capaz de projetar, desenvolver e operar os diversos sistemas de áudio existentes.

Aqui no Brasil, os sistemas de áudio desenvolveram-se, inicialmente, a partir da experiência adquirida através da prática de pessoas entusiastas em áudio. Nas décadas seguintes, este conhecimento prático soma-se à teoria básica de eletrônica e acústica, e os sistemas de áudio passam a ser operados por técnicos especializados. Atualmente, os sistemas de áudio, em nível mais complexo, são assunto de artigos científicos e trabalhos acadêmicos elaborados por profissionais da área de engenharia.

4.2 Sistemas de Sonorização

Sistema de sonorização é o conjunto dos dispositivos e equipamentos destinados a executar funções relacionadas à reprodução, transmissão e gravação de um evento sonoro. Podem ser classificados em diversos tipos, de acordo com sua aplicação, cada um deles com características específicas elaboradas para atender um determinado conjunto de necessidades.

Abaixo, é apresentada uma lista com diversos tipos de sistemas de sonorização, classificados de acordo com o exposto em Cysne, 2000, destacando suas principais características e finalidades.

Sistemas de Reforço Acústico de Voz: Caracterizam-se pela amplificação em tempo real dos sinais provenientes de um ou mais microfones, que servem a um ou mais oradores. Geralmente, os oradores e a audiência encontram-se no mesmo recinto. São utilizados em auditórios, teatros, anfiteatros, etc..

Sistemas de Reforço Acústico de Música ao Vivo: Caracterizam-se pela amplificação de música em tempo real proveniente de microfones e outros dispositivos ou instrumentos eletrônicos para uma platéia de qualquer tamanho. Exigem ampla resposta de frequência e, na maioria das vezes, elevados níveis de pressão sonora. São geralmente utilizados em shows musicais em lugares abertos ou fechados como casas noturnas, casas de espetáculo, bares, etc...

Sistema de Reforço Acústico de Música Mecânica: Caracterizam-se pela amplificação de música pré-gravada. A fonte de som pode ser local, como um *CD player* ou *DAT player*, ou remota, com transmissão por cabos, ondas de rádio e satélite. São empregados em casas noturnas, bares, anfiteatros, auditórios, etc..

Sistemas de Gravação: São sistemas que possibilitam o registro de vozes e/ou música. Os sinais sonoros podem ser registrados por meios magnéticos (fita K7, VHS), ópticos (CD, MD) ou digitais (computadores e máquinas especiais). São utilizados em estúdios de gravação, centrais de gravação, shows, etc..

Sistemas de Alta Impedância/Voltagem Constante: Caracterizam-se pelo uso de uma grande quantidade de alto-falantes alimentados com baixa potência. Têm como objetivo distribuir adequadamente a potência total numa grande área de cobertura. Utilizado em aeroportos, parques temáticos, bancos, hotéis, hospitais, indústrias, centros comerciais, etc..

Sistemas de Mixagem Automática: São aqueles que realizam as operações de mixagem e controle de ganho de um determinado número de microfones automaticamente, isto é, sem a

necessidade de um operador. São usados, geralmente, em salas de conferência, salões plenários, salas de reunião, assembléias, etc..

Sistemas de Mascaramento Acústico: São os sistemas de sonorização destinados a reduzir a inteligibilidade num determinado local, através da diminuição da relação sinal/ruído, para fins de privacidade. Esta redução é feita de modo controlado para que não haja desconforto auditivo. Sua principal aplicação é em escritórios panorâmicos e/ou salas de escritórios divididas por divisórias de baixa absorção acústica.

Sistemas de Tradução Simultânea: São sistemas especiais de reforço de voz destinados a transmitir, em tempo real, a tradução da fala de um ou mais oradores para uma platéia. A platéia recebe a informação traduzida através de fones de . São utilizados em auditórios, salas plenárias, salas de reunião, etc..

Sistemas Móveis: São aqueles projetados para equipar objetos móveis, tais como trens, carros, aeronaves, metros, tróleys elétricos, etc..Caracterizam-se por possuir um elevado grau de dificuldade de concepção e invariável complexidade técnica.

Sistemas Industriais: São sistemas de sonorização com características próprias para aplicação em ambiente industrial. São um misto de sistemas de comunicação, com central e ramais, e sistema de avisos e chamadas.

Sistemas Digitalmente Controlados: Como o nome diz, são sistemas controlados através de comando digitais. A interface MIDI (*Musical Instrument Digital Interface*) na qual uma quantidade de códigos digitais com informação de temporização e controle musical são utilizados para controlar, por exemplo, um teclado na execução de músicas, é uma das interfaces mais utilizadas neste tipo de sistema. A MIDI, atualmente, também é utilizada para o controle de consoles digitais e sistemas de iluminação.

Sistemas Combinados: Quaisquer combinação dos sistemas anteriores.

4.3 Equipamentos de som

São os dispositivos que compõem os sistemas de som. Existe uma variedade de equipamentos e especificações, cada um destinado a uma determinada tarefa dentro da cadeia de áudio. Os dispositivos mais comuns, presentes em quase todos os sistemas de sonorização, são discutidos a seguir.

4.4 Microfones

São transdutores que transformam energia acústica em energia elétrica. Existem dois componentes básicos em qualquer microfone: O diafragma e o elemento gerador. O diafragma é uma pequena membrana que, exposta ao campo sonoro, vibra de acordo com o som incidente, cabendo ao elemento gerador converter estas vibrações em tensão elétrica.

Os microfones são usualmente classificados de acordo com o tipo de elemento gerador e/ou pelo seu padrão polar.

Os principais tipos de elementos geradores são o dinâmico, o capacitor e o eletreto.

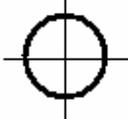
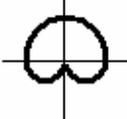
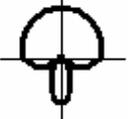
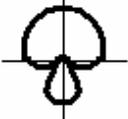
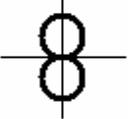
Nos microfones dinâmicos, uma bobina móvel imersa num campo magnético acompanha o movimento da membrana, induzindo tensão elétrica nos terminais da bobina. Estes microfones têm a característica de serem robustos e de baixo custo porém, na maioria das vezes, apresentam resposta em frequência reduzida e baixa sensibilidade.

No microfone a capacitor (ou condensador) o elemento gerador é composto por um capacitor de placas paralelas (da ordem de 40pF) e um pré-amplificador, sendo que uma das placas é fixa e a outra é móvel, fazendo às vezes do diafragma do microfone dinâmico. O capacitor é, então, polarizado através de uma fonte externa do tipo corrente contínua. Assim, as variações da placa móvel devido às variações de pressão sonora fazem variar o espaço entre as placas e, conseqüentemente, a capacitância fazendo com que às variações da tensão de polarização sejam proporcionais às variações de pressão sonora. O valor da tensão de polarização típica em microfones comerciais é 48V. Nos microfones a condensador a tensão de saída (AC) é bastante baixa e a impedância de saída extremamente alta. São menos robustos que os dinâmicos porém apresentam respostas em frequência planas e amplas.

Os microfones de eletreto são semelhantes aos de capacitor, com a diferença que o eletreto é carregado permanentemente não necessitando, por isso, polarização externa.

Quanto ao padrão polar, os microfones podem ser de vários tipos, como aqueles apresentados na Tabela 4.1 abaixo. O padrão polar indica a sensibilidade tridimensional do microfone em relação ao seu eixo. Deve ser selecionada de acordo as características da aplicação.

Tabela 4.1 – Padrões polares dos microfones. Fonte: Cysne, 2000

Característica	Omni-direcional	Cardióide	Super-cardióide	Hyper-cardióide	Bi-direcional
Padrão de resposta polar					
Eq. polar	1	$1/2 (1 + \cos \theta)$	$0,37 + 0,63 \cos \theta$	$1/4(1 + 3 \cos \theta)$	$\cos \theta$
Ângulo de cobertura	360°	131°	115°	105°	90°
Ângulo de rejeição máx.	—	180°	126°	110°	90°
Rejeição traseira	0	25dB	12dB	6dB	0

A Figura 4.1 abaixo ilustra o padrão polar de um microfone supercardióide.

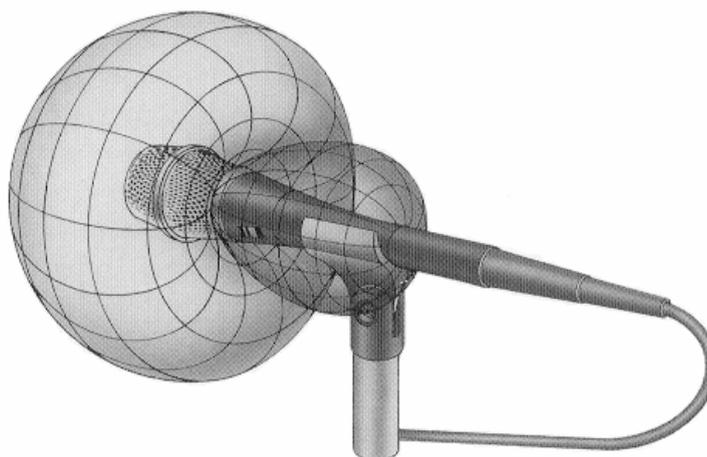


Figura 4.1 – Padrão polar de um microfone supercardióide. Fonte: Shure, *Microphone technique for music – Sound Reinforcement*.

4.4.1 Impedância

Em relação à impedância, os microfones dividem-se em dois grupos: Os de alta impedância e os de baixa impedância.

Os microfones de alta impedância apresentam maior nível de saída (cerca de 20dB a mais) em relação aos de baixa impedância. Entretanto, não permitem o uso de cabos muito longos pois, a grandes distâncias, estes cabos comportam-se como capacitores, filtrando as altas frequências, o que limita o seu uso com cabos de 6 a 7m no máximo. Já os microfones de baixa

impedância permitem a utilização de cabos mais longos sem perdas significativas em altas frequências.

Quanto à saída dos microfones, estas podem ser balanceadas ou desbalanceadas. As saídas balanceadas são compostas por três condutores; dois deles conduzindo o sinal de áudio em antifase entre si e o condutor restante é a blindagem do cabo. Como o ruído (eletromagnético) é induzido em fase nos dois condutores, este pode ser eliminado através de amplificação diferencial na entrada do dispositivo receptor, o que resulta num sinal com o dobro de amplitude e praticamente livre de ruído.

Na saída desbalanceada, o sinal de áudio é conduzido pelo condutor central e pela blindagem que, assim como no caso anterior, deve ser ligada ao sistema de aterramento do dispositivo receptor. A figura 2 (a) e (b) ilustra ambos os casos.

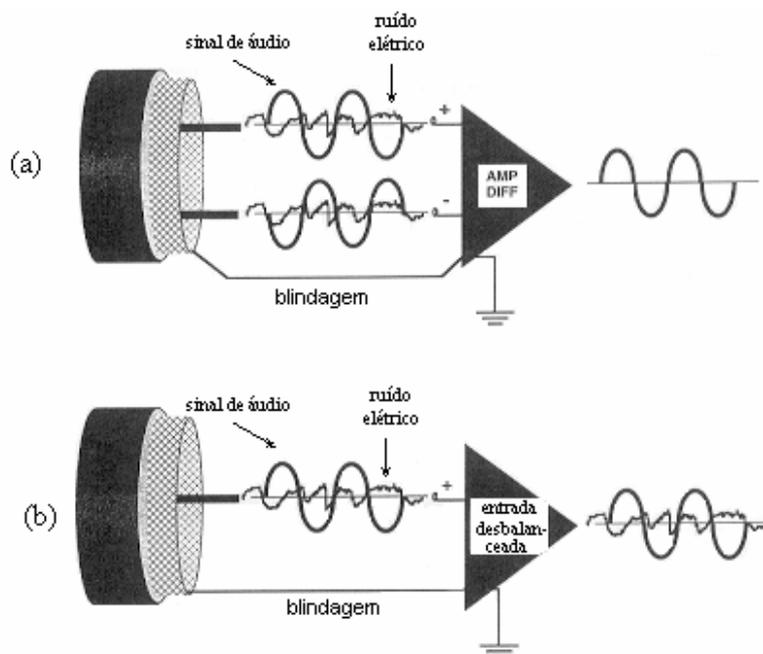


Figura 4.2 – Esquemático do tipo de saída de microfone (a) balanceada e (b) desbalanceada. Fonte: Shure, *Microphone technique for music – Sound Reinforcement*

Em áudio profissional dá-se preferência para microfones de baixa impedância com saída balanceada que permitem, portanto, o emprego de cabos longos com baixo nível de ruído.

4.4.2 Resposta em Frequência

Os microfones apresentam diferentes respostas em frequência de acordo com suas características construtivas. Estas respostas são fornecidas pelo fabricante usualmente de forma

gráfica e devem ser criteriosamente analisadas adequando o microfone à aplicação a que é destinado.

Por exemplo, microfones utilizados em medições acústicas ou em captação de alta fidelidade devem possuir resposta em frequência o mais plana e ampla possível. Já naqueles destinados à comunicação, respostas relativamente planas na faixa de médias frequências são o suficiente para garantir a inteligibilidade da voz.

4.4.3 Sensibilidade

É o parâmetro que relaciona o nível de tensão elétrica na saída do microfone com o nível de pressão sonora que a gerou. É expressa pela seguinte equação [Cysne, 2000]:

$$S_V = 20 \log VCA + 74 - CAC \quad (74)$$

sendo S_V a Sensibilidade, [db / V / Pa];

VCA a tensão de circuito aberto na saída do microfone, [V];

CAC a pressão sonora do campo acústico, [Pa];

74 o valor de referência para o campo acústico, [dB].

Outro parâmetro bastante utilizado em especificações para microfone é o nível de saída dado, em dBm, também chamado de nível de potência, expresso por [Cysne, 2000]:

$$S_{NP} = (S_V - 10 \log Z + 44) \quad (75)$$

sendo S_{NP} o Nível de Potência, [dBm / 10 Pa];

Z a impedância do microfone, [Ω].

4.4.4 Ruído Térmico e Relação Sinal/Ruído

O ruído térmico do microfone é dado pela seguinte expressão [Cysne, 2000]:

$$TN = (-198 + 10 \log LFX + 10 \log Z) \quad (76)$$

sendo TN o ruído térmico do microfone, [dB/V]

LFX a largura de faixa da resposta em frequência nominal do microfone, [Hz];

Z a impedância do microfone, [Ω].

A partir da especificação de S_V e TN é possível encontrar a relação sinal/ruído (S/R) do microfone, dada em dB, pela seguinte expressão [Cysne, 2000]

$$S / R = S_V - TN \quad (77)$$

Analisando a equação (77), pode-se concluir que quanto maior a sensibilidade do microfone, maior sua relação sinal/ruído. O raciocínio inverso pode ser feito em relação a impedância e a largura de faixa.

4.5 Amplificador de Potência

A função principal deste dispositivo é fornecer potência ao sinal de áudio sem introduzir distorções. Os amplificadores utilizados em áudio profissional apresentam impedâncias de entrada e saída típicas de amplificadores de tensão e, geralmente, são capazes de entregar elevados níveis de energia.

Todos os amplificadores possuem atenuadores em sua entrada que alteram o nível de sinal que será entregue à etapa de potência. Esta etapa de potência, cujo ganho é fixo, irá transferir energia da fonte de alimentação para o sinal de áudio. Alguns amplificadores, mais sofisticados, podem possuir desde proteção contra curto-circuito até monitoração de temperatura.

Os amplificadores de potência são classificados de acordo com o tipo de circuito de amplificação, conforme mostra a Tabela 4.2 abaixo.

Tabela 4.2 – Características das classes de amplificadores. Fonte: Valle, 2003

Classe	Características
Classe A	<ul style="list-style-type: none"> - Os dispositivos de saída conduzem corrente em todo ciclo de sinal - Rendimento baixo, em torno de 25%; qualidade de reprodução máxima
Classe B	<ul style="list-style-type: none"> - Os dispositivos de saída conduzem corrente durante meio ciclo de sinal cada um, o que faz surgir um distorção de transição (<i>crossover distortion</i>) que afeta, principalmente, sinais de alta frequência e baixa amplitude - Rendimento teórico de 64% aproximadamente
Classe AB	<ul style="list-style-type: none"> - Dispositivos de saída conduzem corrente em um pouco mais que meio ciclo cada um, reduzindo os efeitos da distorção de transição. - Qualidade se aproxima do Classe A com rendimento maior (aprox. 60%)
Classe C	<ul style="list-style-type: none"> - É usado apenas um dispositivo de saída que opera durante meio ciclo, sendo que ciclo restante é completado por circuito sintonizado - Utilizado em transmissões de rádio.
Classe D	<ul style="list-style-type: none"> - O sinal de entrada é aplicado a um PWM (modulador de largura de pulso) antes da etapa de amplificação. Posteriormente, este sinal é filtrado restando apenas o sinal de áudio. - Alta qualidade com rendimento teórico de 100%. Na prática, o rendimento fica em torno de 90%.
Classe D em ponte	<ul style="list-style-type: none"> - É uma variante da classe anterior, com dois amplificadores classe D ligados em ponte. - Elimina o filtro passivo, reduzindo o peso e o volume
Classe H	<ul style="list-style-type: none"> - A tensão da fonte de alimentação varia conforme o sinal de entrada de forma a só fornecer ao estágio de saída a tensão necessária a seu funcionamento. - Possuem menor custo, menor tamanho e menor peso, porém, perde-se em qualidade em altas frequências. Mais utilizado em amplificação de subgraves

4.5.1 Potência de saída

É definida como a máxima potência que o amplificador pode fornecer antes que a distorção harmônica total (THD) seja maior que 1%.

Em projetos e especificações deve-se sempre usar a potência RMS (raiz quadrática média). A potência RMS do amplificador é determinada a partir da aplicação de um sinal senoidal na entrada do equipamento. Em seguida, calcula-se o valor da tensão RMS na saída do amplificador, eleva-se ao quadrado e divide-se pela valor da carga de teste. A tensão RMS é calculada da seguinte forma [Cysne, 2000]:

$$V_{RMS}^2 = \frac{1}{2p} \cdot \int_0^{2p} (A \text{ sen}(wt))^2 dt \quad (78)$$

sendo V_{RMS} a tensão quadrática média do sinal de saída, [V];

A a tensão de máxima, [V];

w a frequência angular, [rad/s];

t o tempo, [s]

Existem outras determinações de potência, tais como a Potência Musical e Potência PMPO. A primeira, baseia-se no fato de que o amplificador pode fornecer uma potência maior que sua potência RMS por curtos períodos de tempo, se na maioria do tempo ele é utilizado a potências médias mais baixas. Como a música, em geral, possui um nível médio mais baixo que o nível dos picos ocasionais, o amplificador poderá fornecer potência maior nestas passagens mais curtas. Esta potência maior (cerca de 10%) é a Potência Musical. A outra determinação, a Potência PMPO, não tem base científica e deve ser ignorada. [Valle, 2003].

4.5.2 Distorção Harmônica Total (THD)

É o parâmetro que quantifica a distorção gerada pela introdução de sinais de frequências harmônicas no sinal original durante o processo de amplificação. A THD é medida a partir da aplicação de um tom puro (geralmente de 1KHz) na entrada do amplificador e subsequente análise harmônica do sinal de saída. É calculada pela soma RMS das tensões de todos os harmônicos da saída, dividida pela tensão total. [Valle, 2003]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2 + V_1^2}} \quad (79)$$

sendo THD a distorção Harmônica total, [ad.];

V_i a tensão de saída da i -ésima harmônica do sinal, [V];

V_1 a tensão de saída da fundamental (sinal original), [V];

n um número inteiro.

Os valores típicos de THD para amplificadores encontrados no mercado atual podem ser vistos na tabela abaixo. Valores de THD menores de 0,1% são praticamente inaudíveis.

Tabela 4.3 – Valores típicos de THD . Fonte: Valle, 2003.

Aplicação	THD
Amplificadores de potência para sonorização	< 0,2%
Amplificadores para uso doméstico	< 0,1%
Amplificadores de referência para estúdios	< 0,05%
Amplificadores “high end” para audiófilos	< 0,02%

4.5.3 Distorção por Intermodulação (IMD)

A distorção por intermodulação ocorre quando sinais de duas ou mais frequências são aplicados ao amplificador gerando outros sinais cujas frequências são a soma e a diferença dos sinais previamente aplicados.

A SMPTE (*Society of Motion Picture and Television Engineers*) especifica o uso de dois sinais senoidais, um de 60Hz e outro de 7KHz, mixados na proporção de 4:1, respectivamente, como método de medida da IMD. Os sinais de intermodulação aparecerão nas frequências de $(F_H \pm n * F_B)$, onde $F_H = 7\text{KHz}$, $F_B = 60\text{Hz}$ e n um número inteiro.

A IMD é então calculada pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos sinais de intermodulação nas frequências de $F_H \pm 1 * F_B$ e $F_H \pm 2 * F_B$, e geralmente apresentada na forma de porcentagem [Valle, 2003]

Os critérios para a avaliação da IMD são idênticos aos da THD .

4.5.4 Relação Sinal/Ruído (S/R)

A relação sinal/ruído é a razão, em dB, entre a potência máxima RMS de saída e a potência do ruído de fundo do amplificador. Esta última é medida colocando-se a entrada do amplificador em curto e medindo a potência na saída, utilizando o mesmo valor de impedância que foi utilizado ao medir a potência máxima RMS do amplificador.

Relações sinal/ruído acima de 80dB são satisfatórias para amplificadores de potência e S/R acima de 90dB são julgadas excelentes [Sóllon, 2003].

4.5.5 Slew Rate (SR)

A *Slew Rate* (SR) de um amplificador é taxa máxima de variação de tensão de saída no tempo, medida em volts por microssegundos. Deve ser aferida graficamente estando o amplificador trabalhando à máxima potência e no limite superior da sua faixa de frequência. Quando a SR é muita baixa, sinais de saída de alta amplitude e alta frequência não conseguem ser devidamente reproduzidos, acarretando em distorção do sinal de saída conhecida como *Slew Induced Distortion* (SID). Como efeito, os sons agudos tornam-se ásperos devido á deformação do sinal de saída.

A SR mínima que um amplificador deve possuir para que não ocorra a distorção acima citada, é calculada da seguinte forma [Valle, 2003]

$$SR = 4 \cdot 2\pi f \cdot \sqrt{2} \cdot V_{RMS} \quad (80)$$

sendo SR a *slew rate* do amplificador, [V/μs];

f a frequência máxima de operação, [Hz]

V_{RMS} tensão de saída à potência máxima. [V]

4.5.6 Fator de Amortecimento (FA)

O fator de amortecimento de um amplificador é a relação entre sua impedância de carga (4Ω, 8Ω, etc..) e sua impedância de saída, dada pela seguinte expressão [Valle, 2003]:

$$FA = \frac{Z_C}{Z_L} = \frac{V_0}{V_0 - V_L} \quad (81)$$

sendo FA o fator de amortecimento, [ad.]

Z_C a impedância nominal da carga, [Ω]

Z_L a impedância de saída do amplificador, [Ω]

V_0 a tensão de saída do amplificador sem carga conectada, [V]

V_L a tensão de saída do amplificador com carga conectada, [V]

As tensões V_0 e V_L devem ser adquiridas a partir da aplicação de um sinal senoidal na entrada do amplificador, na frequência de interesse. Ao se medir a FA deve-se especificar a impedância da carga e realizar a medição em várias frequências de interesse.

Valores para FA para amplificadores de estado sólido (transistorizados) abaixo de 100 são considerados ruins enquanto que valores acima de 500 são considerados excelentes. Em amplificadores valvulados, o FA costuma ser mais baixo, da ordem de 50.

4.6 Alto-falantes e Caixas de Som

Os alto-falantes são transdutores capazes de transformar energia elétrica em energia acústica tendo como principal aplicação a reprodução de sinais de áudio. São compostos por duas partes básicas: O sistema motor e o sistema móvel.

O sistema motor é formado por um ímã permanente (magneto) e por peças polares e sua função é produzir um intenso campo magnético no entreferro (espaço entre o magneto e a peça polar), local onde será inserida a bobina móvel.

O sistema móvel é composto principalmente por um cone e por uma bobina móvel, que são partes fisicamente unidas. A Figura 4.3 abaixo apresenta algumas partes componentes do alto-falante.

O princípio de funcionamento é simples: O sinal elétrico variável contendo a informação de som (sinal de áudio) percorre a bobina gerando um campo magnético variável, proporcional a variação do sinal elétrico. Este campo interage com o campo magnético permanente, produzido pelo sistema motor, resultando numa força que é aplicada na bobina. Por sua vez, o movimento da bobina faz vibrar o cone em que está conectada e, como resultado desta vibração, o som é produzido.

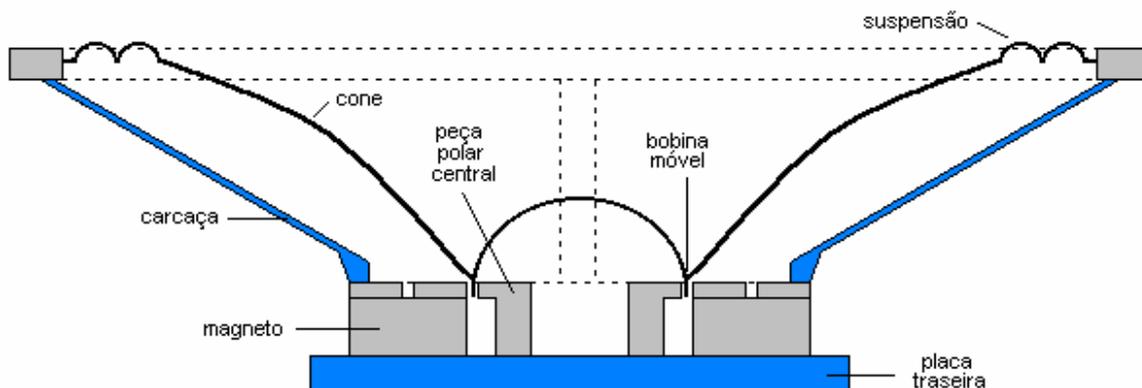


Figura 4.3 – Corte esquemático de um alto-falante. Fonte: Cysne, 2000

O desenvolvimento da tecnologia de fabricação de alto-falantes fez surgir uma série de alto-falantes, cada um especializado na reprodução de uma determinada faixa de audiodiferência. Os termos que designam cada tipo de alto-falante e suas principais características são apresentados na Tabela 4.4 abaixo.

Tabela 4.4 – Características principais dos alto-falantes de acordo com o tipo. Fonte: Cysne, 2000

Tipo de alto-falante	Características principais
Subwoofer	<ul style="list-style-type: none"> - Conjunto auto-falante/caixa acústica projetado para trabalhar com frequências abaixo dos 100Hz. - Cones de grande diâmetro, frequência de ressonância extremamente baixa. Diâmetros nominais típicos de 15'' ou 18''.
Woofers	<ul style="list-style-type: none"> - Projetado para trabalhar tipicamente na faixa de 40Hz a 1KHz. - Baixa frequência de ressonância com diâmetros nominais típicos 12'', 15'' e 18''.
Midrange	<ul style="list-style-type: none"> - Projetado para trabalhar tipicamente na faixa de 1KHz a 8KHz. - diâmetros nominais típicos de 6'', 8'' e 10''.
Tweeter e Supertweeter	<ul style="list-style-type: none"> - Projetado para trabalhar com frequências acima de 1KHz. - O <i>tweeter</i> de cone possui, em geral, baixa eficiência e difícil controle direcional. <p>O <i>tweeter</i> e <i>supertweeter</i> de diafragma metálico possuem maior eficiência e maior limite de frequência (tipicamente 20KHz).</p>

Em aplicações profissionais, e na maioria das demais aplicações, os alto-falantes são montados nas chamadas “caixas-acústicas” que são estruturas destinadas a melhorar o desempenho dos alto-falantes.

Sette, 2003, descreve as principais funções das caixas acústicas.

1 – Eliminar o cancelamento entre as ondas frontal e traseira geradas pelos dois lados do cone, que confere a fonte sonora um comportamento de dipolo, o que é especialmente necessária para as frequências baixas, principalmente aquelas cujo comprimentos de onda são iguais ou superiores a 4 vezes o diâmetro físico do alto-falante;

2 – Reduzir o deslocamento do cone, evitando excursões descontroladas devido à ação da inércia (*hangover*) que prejudica o resultado sonoro;

3 – Modificar a diretividade.

A Tabela 4.5 apresenta os principais tipos de caixas acústicas encontradas no mercado e suas principais características.

Tabela 4.5 – Características principais das caixas acústicas de acordo com o tipo. Fonte: Cysne, 2000

Tipo de caixa	Características principais
Suspensão Acústica (caixa selada)	<ul style="list-style-type: none"> - Caixas acústicas fechadas. - Bom desempenho com tamanho reduzido. - Eficiência e limite superior de frequência reduzidos.
Refletor de graves	<ul style="list-style-type: none"> - Caixas acústicas com um abertura de comunicação entre o exterior e o interior do gabinete, chamada de pórtilo. - Dispositivo sintonizado para reforçar as baixas frequências. - Boa eficiência e extensão do limite superior de frequência.
Caixas com dutos	<ul style="list-style-type: none"> - Semelhante às características da caixa refletor de graves com a vantagem de serem compactas.
Caixa cornetada	<ul style="list-style-type: none"> - São caixas de suspensão acústica onde, sobre a parte externa do alto-falante, é montado uma corneta. - Maior sensibilidade e melhor controle de diretividade.
Sistemas Bandpass	<ul style="list-style-type: none"> - São caixas sintonizadas para responder a uma determinada faixa de frequência. - Possuem dois pórtilos através dos quais som é irradiado. O alto-falante é montado dentro da caixa e não tem comunicação com o exterior.

	- Sua principal aplicação são em caixas de <i>subwoofer</i> (abaixo de 100Hz).
--	--

Existe, ainda, outros projetos de caixas acústica que combinam as características daquelas acima citadas. A literatura sobre projeto de caixas acústicas é bastante extensa e completa e é encontrada facilmente em literaturas especializadas.

4.6.1 Impedância Nominal

A impedância nominal dos alto-falantes (e das caixa de som em geral) é usualmente fornecida pelo fabricante e deve ser cuidadosamente observada no momento da ligação com o amplificador. A impedância nominal da carga (alto-falante ou suas associações) não deve ser inferior àquela recomendada pelo fabricante do amplificador com risco de danificar ambos dispositivos.

Os alto-falantes podem ser associados em série, em paralelo, ou numa combinação desses dois tipos. No primeiro caso, as impedâncias de cada dispositivo são somadas e a impedância final do conjunto é o resultado desta soma. No segundo caso, soma-se o inverso das impedâncias de cada dispositivo e a impedância final do conjunto é o inverso dessa soma.

A impedância do alto-falante, como era de se esperar, varia com a frequência. Para efeitos de cálculo de projeto, utiliza-se o valor de impedância mais baixo encontrado ao longo do espectro. Valores de impedância para alto-falantes e caixas de som usualmente encontrados são de 4Ω e 8Ω . Também encontram-se valores de impedâncias de 1Ω , 2Ω , 16Ω e até 32Ω .

4.6.2 Máxima Potência Admissível

É a potência máxima que o alto-falante pode suportar, durante um período de tempo suficiente longo, sem ser danificado. Usualmente, a potência é dada em Watts RMS e fornecida pelo fabricante.

O excesso de potência pode danificar definitivamente o alto-falante. Basicamente, existe duas maneiras através das quais isto acontece. A primeira, através do superaquecimento da bobina móvel, que provoca o derretimento da mesma e o seu subsequente rompimento. Na segunda maneira, ocorre o colapso mecânico das estruturas do dispositivo devido ao intenso deslocamento da bobina móvel.

4.6.3 Sensibilidade

É a medida do nível de pressão sonora, em dB , produzido pelo alto-falante (ou caixa acústica) quando alimentado com uma determinada potência elétrica, a um determinada distância do centro acústico do alto-falante (ou caixa acústica). Dá-se o nome de *sensibilidade axial* àquela medida em relação ao eixo perpendicular ao centro acústico do alto-falante. Fora deste eixo, a sensibilidade é denominada de *sensibilidade relativa*.

A distância de referência mais utilizada é de 1m, da mesma forma que a potência preferencial de medida é 0dBW, porém, quaisquer outros valores de distância e potência podem ser utilizados desde que devidamente indicados.

As medidas de sensibilidade devem ser feitas levando em consideração apenas o som direto, portanto, sem a influência da acústica do local.

4.6.4 Ângulo de Cobertura

O conceito de Ângulo de Cobertura, Relação de Diretividade (Q) e Índice de Diretividade (DI) foram apresentadas nos itens 2.4 e 2.5 e fazem parte das especificações técnicas de caixas acústicas e alto-falantes.

Geralmente as informações sobre ângulo de cobertura são fornecidas pelo fabricante através de gráficos polares, como aqueles apresentados no item 6.11, junto com os valores de Q e DI .

Essas especificações são informações essenciais para o projeto de sistemas de sonorização, como será visto adiante.

4.7 Consoles (*Mixers*)

O console é o equipamento que gerencia o percurso e controla os diversos aspectos do sinal de áudio dentro de um sistema de sonorização. Segundo Cysne, 2000, as funções básicas de um console são

- Amplificar os sinais de entrada provenientes de microfones e outras fontes;
- Controlar os níveis dos sinais de entrada independentemente uns dos outros;
- Combinar (mixar) todos os sinais ou quantos deles desejados;
- Apresentar o sinal mixado em uma ou mais saídas;

As partes básicas de qualquer console são: As entradas dos canais, onde são conectados os microfones e as outras fontes de áudio, o pré-amplificador, presente em cada canal, que elevam o nível do sinal de entrada, o *fader*, potenciômetro que controla o nível do sinal de cada canal e o circuito de mixagem onde os sinais são combinados e enviados para as diversas saídas. Existe, ainda, outros controles como o de panorâmico (*pan*), de equalização (*bass, mid, treble*), de mandadas (*send*), de efeitos (*effect*) e outros que vão depender da sofisticação de cada console e do tipo de aplicação a que está sendo destinada.

A Figura 4.4 abaixo mostra um diagrama simplificado de um console estéreo de 3 canais.

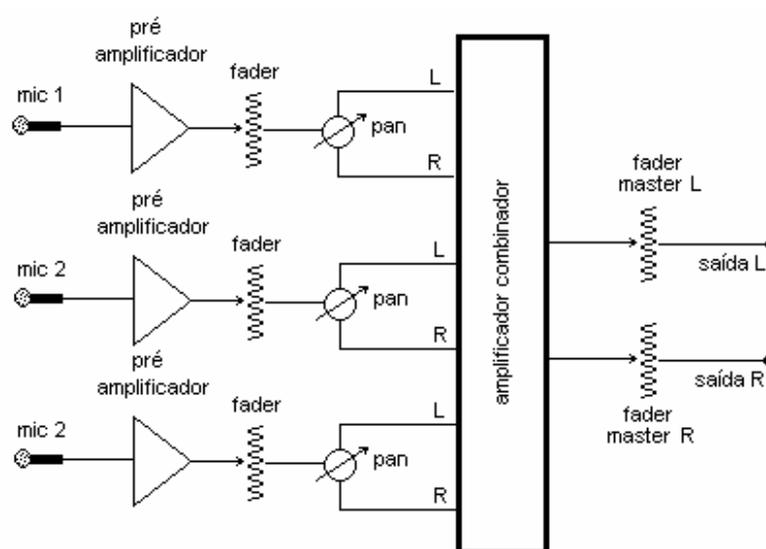


Figura 4.4 – Diagrama simplificado de um console estéreo de 3 canais. Fonte: Cysne, 2000

Os recursos dos consoles devem ser criteriosamente analisados para que o console possa responder adequadamente as exigências de sua aplicação.

4.8 Processadores de sinal (periféricos)

São os equipamentos capazes de modificar os sinais de áudio para obtenção de efeitos diversos. A Figura 4.5 abaixo apresenta um quadro com os principais processadores de sinal atualmente existentes, dispostos por categoria de processamento.

Num projeto bem elaborado, torna-se imprescindível a utilização de alguns destes periféricos para que se alcance um bom resultado. Como é o caso da utilização, dentro da categoria de processadores de amplitude, dos *noise-gates*, dos *limitadores* e dos *compressores*, e, na categoria de processadores de espectro, dos *equalizadores*.

Estes últimos, os equalizadores, têm papel fundamental principalmente em sistemas de sonorização permanentes. Aqui, eles são utilizados para contornar problemas de resposta em frequência ocasionadas pela interação entre o sistema de reprodução e a “acústica da sala”, atenuando ou reforçando uma ou mais frequências no intuito de melhorar o resultado sônico final. Entretanto, não se deve confiar aos equalizadores a solução de problemas acústicos. Estes, por sua vez, devem ser resolvidos com soluções acústicas, deixando a cargo dos equalizadores os problemas referentes ao sinal de áudio. Os equalizadores também são empregados para formatação e equalização do programa musical.

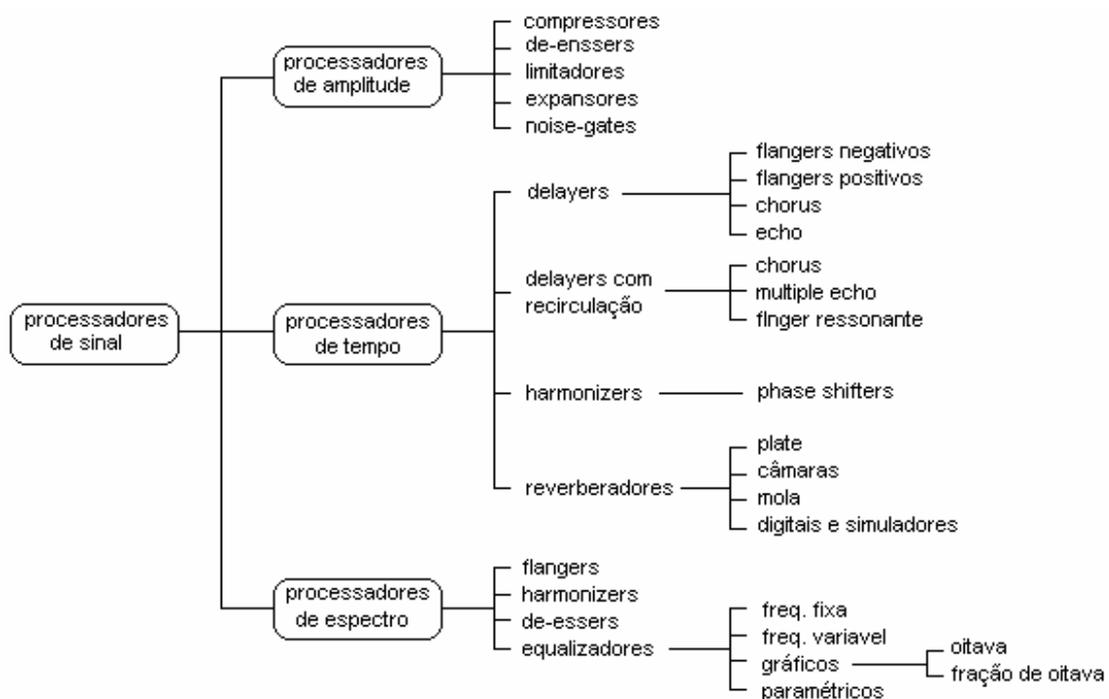


Figura 4.5 – Tipos de processadores de sinais. Fonte: Cysne, 2000

4.9 Projeto de sistemas de sonorização

O projeto de sistema de sonorização envolve uma série de tarefas que, de uma maneira geral, podem ser agrupadas nos seguintes itens: dimensionamento (acústico e eletroacústico), arquitetura do sistema e escolha dos equipamentos, infra-estrutura, documentação e apresentação. Desta forma, o projetista, baseado nas necessidades do cliente e sua disponibilidade orçamentária, poderá estabelecer os resultados antes mesmo do sistema ser instalado.

Todo bom projeto de sonorização deve cumprir certos objetivos essenciais que servem de guia no momento da sua elaboração. Este objetivos essenciais podem ser agrupados em tarefas conforme é apresentado abaixo [Cysne, 2000]:

- **Cobertura Sônica:** O projeto deve proporcionar cobertura sônica para toda área destinada a receber os benefícios do reforço sonoro, de modo que o nível de pressão sonora resulte uniforme, com variações dentro de tolerâncias pré determinadas ao longo de todo o recinto.
- **Nível Adequado:** O projeto deve proporcionar um nível de pressão sonora para o ouvinte mais afastado da fonte sonora, condizente com o tipo de programa a ser reforçado e com as características acústicas do ambiente.
- **Inteligibilidade:** O projeto tem como objetivo principal estabelecer uma relação ótima entre o que se está reproduzindo e o que se está “ouvindo”. Para tanto, utiliza-se as ferramentas apropriadas para o cálculo da inteligibilidade (AL_{CONS} , $C50$, $C80$, etc..) para alcançar este objetivo.
- **Evitar a microfonia:** No caso da utilização de um ou mais microfones, o sistema deve ser projetado de modo a evitar realimentações acústicas sobre os mesmos capazes de provocar oscilações regenerativas (microfonia).
- **Resposta em frequência:** O projeto deve proporcionar a resposta em frequência apropriada ao tipo de programação a ser reforçada consistente em toda a área de cobertura.

4.10 Cobertura Sônica

A cobertura sônica é uma função da quantidade de alto-falantes utilizados, de suas características, de sua localização, de sua orientação espacial, da geometria da área a ser sonorizada, dentre outros fatores.

Alguns aspectos sobre as características dos alto-falantes já foram discutidos em item anterior, cabendo aqui uma discussão sobre os diversos tipos de localização dos mesmos.

4.10.1 Fonte única (*Cluster* Central)

Cluster é o nome dado a um conjunto de alto-falantes, que podem ou não ser do mesmo tipo, dispostos muito próximos uns dos outros.

Fonte única é o nome dado ao *cluster* que, sozinho, projeta som para toda área a ser sonorizada. A Figura 4.6 ilustra um caso típico de utilização de fonte única.

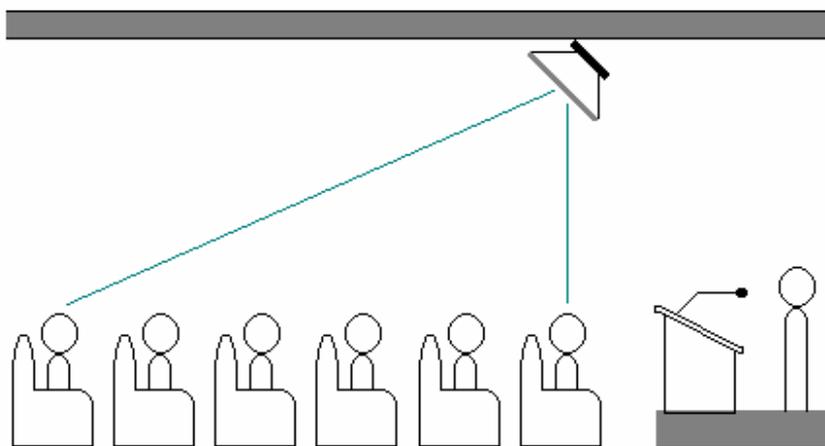


Figura 4.6 – Exemplo de utilização de Fonte Única (*cluster central*). Fonte: Cysne, 2000.

No caso de fonte única, deve -se localizar o *cluster* de tal maneira que a pressão sonora na área por ele coberta seja a mais uniforme possível. Dispõe-se, basicamente, de três ações para que este resultado seja alcançado:

- 1) Variando a distância do cluster em relação a audiência (para frente e para trás);
- 2) Variando a altura do cluster em relação a audiência (para cima e para baixo);
- 3) Variando o ângulo de montagem em relação a audiência.

Estas três ações devem ser tomadas conjuntamente no momento da instalação, tendo em vista a atenuação sonora devido à distância entre um ponto qualquer da audiência e o *cluster* e a atenuação radial inerente ao *cluster*, fornecida pela fabricante através do diagrama polar.

Utilizando a equação (23) para o caso de um ambiente fechado, e de posse das informações relativas à área de absorção total do ambiente, Sa_m , relação de diretividade do *cluster*, Q , distância entre uma determinada posição da audiência e o *cluster*, r , juntamente com o seu diagrama polar, que fornece a informação de atenuação fora do seu eixo central, é possível calcular a pressão sonora em qualquer ponto da audiência. Então, determina-se a distância, a altura e o ângulo de montagem do *cluster* para proporcionar uniformidade na área de cobertura.

Pode-se considerar uma boa cobertura sônica aquela que apresenta variações máximas de $\pm 2\text{dB}$ de lado a lado e, $\pm 2\text{dB}$ de frente ao fundo, ou seja, uma variação máxima total de 8dB , considerando a banda de frequência de 250Hz a 5KHz [Cysne, 2000].

É importante lembrar que, psicoacusticamente, a elevação da fonte não tem grande influência quanto a sua localização percebida pelo ouvinte. Portanto, a variação da altura de instalação do *cluster* pode ser amplamente utilizada sem prejudicar o resultado sônico.

4.10.2 Fonte múltipla

É o nome dado ao sistema sonorização que possui os alto-falantes (ou caixas acústicas) localizados ao longo da área de cobertura, como pode ser visto na Figura 4.7. Neste tipo de cobertura, cada caixa acústica, ou um grupo delas, cobre uma área bem definida da área total a ser atendida.

Geralmente, este sistema é utilizado no caso de recintos muito longos e relativamente estreitos ou que possui obstáculos na área de cobertura, que implicaria, se o sistema adotado fosse do tipo de fonte única, na utilização de alto-falantes com altas relações de diretividade para proporcionar a cobertura adequada na parte posterior da audiência.

A quantidade total de alto-falantes a utilizar pode ser calculada através da seguinte expressão [Cysne, 2000]

$$N = \frac{Q_{MIN}}{Q_{DISPONÍVEL}} \quad (82)$$

sendo N é o número de alto-falantes a ser empregado, [ad.]

$Q_{DISPONÍVEL}$ é a relação de diretividade do alto-falante escolhido para cobrir adequadamente sua área de abrangência, [ad.]

Q_{MIN} é a relação de diretividade mínima para se alcançar um determinado grau de inteligibilidade tal que $AL_{CONS} = 15\%$ (ver equação (88)).

A Figura 4.7 ilustra um caso de sistema de fonte múltipla.

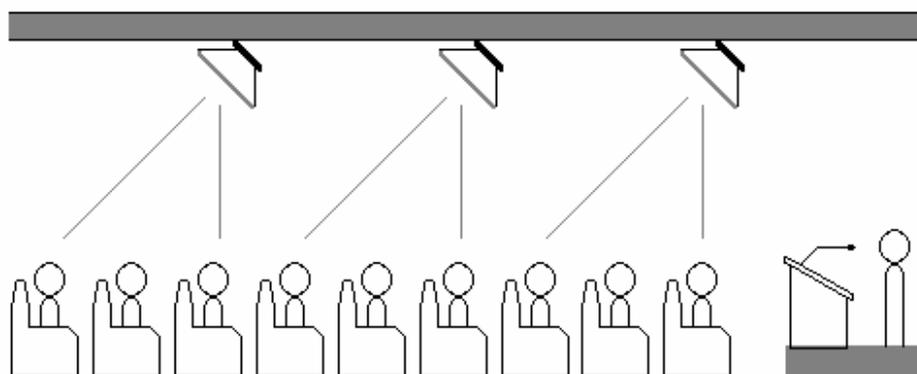


Figura 4.7 – Exemplo de utilização de Fonte Múltipla. Fonte: Cysne, 2000.

4.10.3 Falantes Distribuídos (*Overhead*)

É o nome dado ao sistema de fonte múltipla cuja quantidade de alto-falantes é muito elevada e a distância entre a audiência e as fontes é bastante reduzida. Esta técnica é utilizada principalmente em locais onde o pé direito do recinto é muito baixo em relação as dimensões horizontais.

Nesta montagem, a quantidade de alto-falantes depende exclusivamente do espaçamentos entre estas fontes. A prática da montagem desta modalidade de cobertura fez surgir diversos padrões de espaçamento entre alto-falantes. Os padrões mais utilizados são o quadrado e hexagonal, e suas variantes, conforme pode ser verificado em Cysne, 2000.

A Figura 4.8 apresenta duas variantes do padrão quadrado; a variante extremidade com extremidade e a variante sobreposição de centro a centro. O ângulo que determina a projeção sonora e, conseqüentemente, a circunferência da extremidade, é o Ângulo de Cobertura.

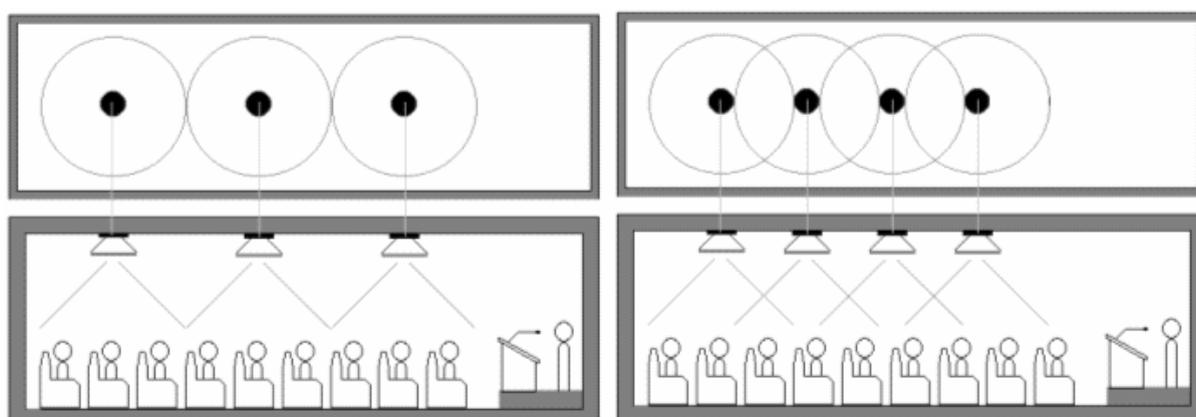


Figura 4.8 – Variantes do padrão quadrado. (a) extremidade com extremidade e (b) sobreposição de centro a centro. Fonte: Cysne, 2000.

Entre estas duas variantes, aquela representada pela Figura 4.8 (b) possui maior uniformidade, com variação máxima na área de cobertura de 1,39dB enquanto que a representada pela letra (a) possui variação máxima de 4,35dB.

Como pode ser visto, a escolha do padrão será uma função do orçamento disponível e da uniformidade de cobertura desejada.

Este sistema apresenta algumas vantagens em relação as duas outras modalidades previamente estudadas. Uma delas é a flexibilidade do sistema que permite que um ou mais alto-falantes sejam desligados quando a área por eles coberta está desocupada. Outra vantagem é a capacidade do sistema em poder trabalhar com diferentes níveis de potência para cada alto-falante, ou grupo deles, uniformizando a cobertura nos casos onde o pé direito é variável, por exemplo. Em contrapartida, o custo destes sistemas é, em geral, bastante elevado.

4.10.4 Pew Back

É o nome dado ao sistema onde a fonte sonora é montada na parte traseira dos assentos voltada para os ouvintes que ocupam as filas de trás.

É utilizado em casos onde o recinto apresenta condições acústicas precárias, impossibilitando a reprodução sonora pelos meios anteriormente estudados. A exemplo deste tipo de ambiente, temos as igrejas que, em geral, possuem um tempo de reverberação e ruídos ambiente muito elevados o que prejudica a inteligibilidade da oratória.

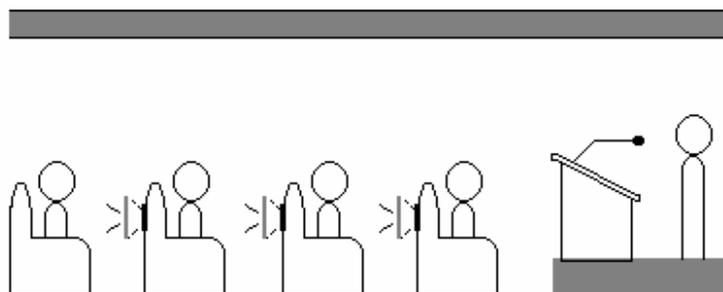


Figura 4.9 – Exemplo de utilização de Pew Back. Fonte: Cysne, 2000.

A Figura 4.9 acima apresenta um esquemático deste sistema. Geralmente, cada alto-falante tem a função de dar cobertura a no máximo três ouvintes.

4.10.5 Fonte Única Dividida

Muitas vezes, por motivos estéticos ou por motivos de infra-estrutura, o *cluster* não pode ser localizado na parte central superior do palco. Nestes casos, divide-se a fonte única em duas partes; uma do um lado esquerdo do palco e a outra do lado direito.

Excluindo a região da linha central entre as duas fontes, onde o som direto de ambas chegam ao mesmo tempo, e aquela bem próxima a cada uma das fontes, as demais regiões da audiência apresentarão resultado sônico inferior, com degradação de qualidade e inteligibilidade sonora.

A perda da qualidade sônica naquelas regiões é, basicamente, devida por dois motivos:

- 1) Pela Filtragem pente (*comb filter*), que ocorre devido ao cancelamento de fase dos sinais reproduzidos pelas duas fontes, em determinados pontos da platéia.
- 2) Pelo efeito de Eco que ocorre quando os sinais das duas fontes chegam com um determinado tempo de atraso capazes de serem identificados pelo ouvinte como sons distintos.

O efeito de *comb filter* pode ser facilmente verificado quando o ouvinte desloca-se horizontalmente de sua posição e seu efeito é mais pronunciado quando o tempo de atraso entre os sinais são pequenos (inferiores a 40ms) [Everest, 2001]. A Figura 4.10 abaixo mostra o efeito na amplitude, em função da frequência, das combinação de dois sinais iguais com três diferentes atrasos.

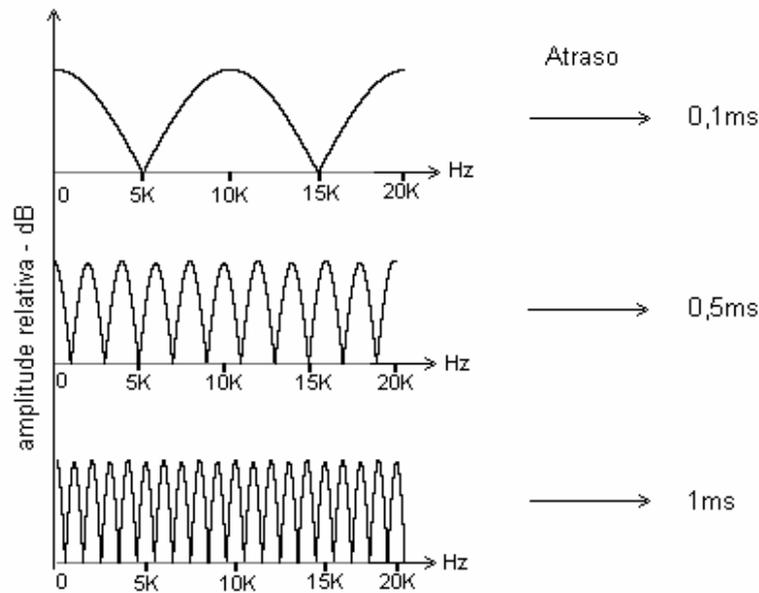


Figura 4.10 – Efeito Comb Filter. Fonte: Everest, 2001.

O frequência onde ocorre o primeiro ponto nulo, F_0 , [Hz] e o espaçamento de frequência entre os subsequentes pontos nulos (ou cristas), F_N , [Hz], são dados, respectivamente, pelas seguintes equações [Everest, 2001]:

$$F_0 = \frac{1}{2t} \quad (83)$$

$$F_N = \frac{1}{t} \quad (84)$$

sendo t a diferença de tempo entre os dois sinais.

A região do recinto propensa ao efeito de eco pode ser determinada tendo como base o gráfico da Figura 2.7 .

No sentido de determinar a região da platéia do Salão de Atos da UFRGS, objeto de estudo do presente trabalho, onde o efeito do eco se faz presente, foi elaborado um programa de computador que é apresentado na conclusão deste trabalho, assim como os resultados por ele obtidos.

Segundo Cysne, 2000, a solução para o problema de *comb filter* consiste em operar qualquer das fontes laterais com níveis de 3dB a 6dB abaixo da outra, reduzindo os efeitos

negativos deste efeito. Como será visto na conclusão deste trabalho, esta redução de nível também pode contribuir para reduzir o efeito devido ao eco.

4.10.6 Estereofonia

A produção do efeito estereofônico baseia-se na capacidade do sistema auditivo em utilizar o som que chega em cada um dos ouvidos para fins de localização da fonte sonora. Dentre os mecanismos utilizados pelo sistema auditivo para processar esta informação de localização estão a diferença de fase e intensidade dos sons que chegam em cada um dos ouvidos (audição binaural) e o tempo de “memorização do som”, responsável pelo chamado efeito de precedência, ou efeito Hass (ver item 2.12).

Dessa forma, é possível criar um campo sonoro onde se pode localizar virtualmente diversas fontes, a partir de duas ou mais caixas acústicas. Este efeito é o chamado efeito estereofônico.

Existe, basicamente, três tipos de estereofonia produzida a partir de duas caixas acústicas: O estéreo convencional, o estéreo aumentado e o estéreo aumentado avançado. No primeiro, é possível apenas a localização horizontal no espaço entre as caixas acústicas, sem nenhuma percepção de profundidade. No segundo, o sinal em cada canal passa por algum tipo de processamento (alteração de nível de baixas frequências, decorrelação de fase, etc..) resultando numa percepção de “espacialidade” da fonte enquanto que no terceiro tipo, utiliza-se técnicas mais avançadas que possibilitam a imagem sonora ampliada para além do limite entre-caixas com bastante fidelidade sonora.

Outra técnica recente utiliza a função de transferência relacionada à cabeça (HRTF) para criar um campo sonoro em três dimensões em torno do ouvinte. Esta nova modalidade, que vem sendo chamada de “áudio binaural”, possui maior eficiência quando o som é reproduzido através de fones de ouvido.

Existe ainda o estéreo multicanal onde o campo sonoro é produzido através de várias caixas acústicas localizadas no entorno da audiência, amplamente utilizado nos cinemas atuais [Landome et. al., 2000].

Entretanto, como escreve Cysne, 2000 “ não se pensa distribuir falantes para obter estereofonia em casos de sistemas de reforço destinados exclusivamente a discursos ou voz”. Em se tratando de grandes ambientes, onde as distâncias envolvidas entre fonte e ouvinte são

relativamente grandes, problemas relacionados com o efeito de eco, limitação em frequência das caixas acústicas e deficiência de nível de pressão sonora nas regiões mais distantes, dentre outros, podem tornar a sonorização “com duas fontes de som separadas, uma de cada lado do palco, verdadeiras aberrações, com resultados sônicos extremamente desagradáveis”.

Portanto, no caso de um auditório onde o sistema de sonorização será utilizado tanto para reforço de voz quanto para reprodução musical, convém utilizar o sistema estéreo junto com sistema de *cluster* central.

4.11 Nível Adequado

Outro requisito essencial de um projeto de sonorização é estabelecer o nível de pressão sonora adequado para atender as necessidades da sua programação, garantindo ao ouvinte boa inteligibilidade e uniformidade em toda área de cobertura.

Esta é uma tarefa nem sempre fácil pois envolve, por um lado, aspectos subjetivos na determinação do nível do programa que pode variar ao “gosto” do cliente e/ou do projetista, e por outro lado, limitações impostas pela legislação quanto ao nível máximo de ruído ambiente permitido para aquela determinada região e ao tempo de exposição a um determinado nível.

Martins, 2002, apresenta valores de pressão sonora usuais praticados em casas noturnas na cidade de Vitória, ES, de acordo com o estilo musical, tanto para música ao vivo quanto pré-gravada. Estes valores, mostrados na Tabela 4.6 abaixo, podem ser considerados um bom indicativo dos valores praticados em outras cidades brasileiras.

Tabela 4.6 – Valores de nível de pressão sonora de acordo com o estilo musical. Fonte: Martins, 2002.

Estilo musical	Pressão sonora média (dB NPS)
MPB, Jazz, Bossa Nova	80 - 90
Pop, Rock, Pagode	90 - 100
<i>Dance music</i> , música eletrônica	100 - 110

Entretanto, a determinação do nível adequado deve levar em conta o nível de ruído ambiente e a relação entre o nível da programação e o nível deste ruído, isto é, a relação sinal/ruído (S/R), de forma a garantir condições mínimas para se obter boa inteligibilidade na comunicação.

No caso de sistemas de reforço de voz, o grau de inteligibilidade pode ser expresso matematicamente pela equação (88) e o nível de pressão sonora deve ser determinado a partir do cálculo da Distância Acústica Equivalente, EAD , dado pela equação (85). A EAD é a maior distância entre duas pessoas que ainda permite uma boa comunicação direta entre elas, sem a necessidade de amplificação eletrônica ou qualquer outro recurso. [Cysne, 2000]

$$EAD = 10^{\frac{NPS(ref) - NRA - S/R}{20}} \quad (85)$$

sendo EAD a distância acústica equivalente, [m];

$NPS(ref)$ nível de pressão sonora da fonte, medido ou estimado a 1m de distância, [dBA];

NRA é o nível médio de ruído ambiente, [dBA];

S/R é a relação sinal/ruído desejada, [dB].

A $NPS(ref)$ média de um orador falando normalmente varia em torno de 67dB.

Já a relação sinal/ruído suficiente para se obter $AL_{CONS} \leq 15\%$ (ver item 4.12), em ambientes com valores de $T60 < 1,6s$ (ver Figura E 1), é de 25,0dB. Valores acima deste patamar não alteram as condições de inteligibilidade da comunicação. Portanto, em se tratando de sistemas de reforço de voz, utiliza-se o valor de $S/R = 25dB$ para determinação da EAD .

O sistema de reforço de voz deve, então, proporcionar a todos ouvintes situados na região de cobertura condições de audição aproximadas àquela que possui um ouvinte situado a uma distância EAD do orador. Em outras palavras, o sistema deve ser capaz de proporcionar eletronicamente, e em qualquer posição, as condições que teria um ouvinte situado na EAD , sem a necessidade do sistema.

Calculada a distância EAD , determina-se a pressão sonora à distância EAD utilizando as equações (24) e (18), sendo $r = EAD$. Determinado o $NPS(EAD)$, tem-se o nível que deve ser praticado em toda a área de cobertura chamado, agora, de NPD (nível de programa desejado).

Após determinado o nível do programa, calcula-se a potência elétrica necessária, EPR , para produzir tal nível de pressão sonora, de acordo com a expressão abaixo [Cysne, 2000]:

$$EPR = 10^{\frac{NPD+TPM+aten(D_2)-S_{axial}}{10}} \quad (86)$$

sendo EPR é a potência elétrica necessária, [W]

NPD é o nível de programa desejado, [dB]

TPM é a margem para picos e transientes, [dB]

$aten(D_2)$ é a atenuação sonora referente à posição mais afastada da área de cobertura, [dB]

D_2 é a distância entre a fonte e a posição mais afastada da área de cobertura, [m]

S_{axial} é a sensibilidade axial do cluster, [dB].

Quando se utiliza o sistema de fonte múltipla, o fator D_2 refere-se à distância entre o alto-falante e a posição mais afastada da área de cobertura a ele destinado, portanto, o valor da EPR total será dada por:

$$EPR_{TOTAL} = EPR \times N \quad (87)$$

sendo EPR_{TOTAL} é a potência elétrica total necessária, [W];

EPR é a potência elétrica, [W];

N é a quantidade total de alto-falantes do sistema, [ad.].

4.12 Inteligibilidade

Um sistema de sonorização com boa inteligibilidade é aquele que possibilita a um ouvinte qualquer, situado dentro da área de cobertura do sistema, entender uma mensagem falada sem necessidade de esforço. As mensagens faladas estão presentes não só em discursos ou palestras mas também na música em geral, que raramente são desprovidas de letras. Portanto, independente da aplicação, o sistema de reforço deve ser dimensionado para garantir um determinado grau de inteligibilidade.

Este dimensionamento pode ser feito ainda na etapa de projeto, utilizando a equação proposta por Peutz, em 1971, que leva o seu nome [Cysne, 2000]:

$$AL_{CONS}\% = \frac{200 \cdot (D_2)^2 \cdot (T60)^2 \cdot N}{V \cdot Q \cdot M} \quad (88)$$

sendo $AL_{CONS}\%$ o Índice Percentual de Perda de Articulação Consonantal, [%];

D_2 a distância entre o alto-falante e o ouvinte mais afastado dele na região de cobertura, [m];

$T60$ o tempo de reverberação, [s];

N um operador dado pela equação (28), [ad];

V o volume interno do ambiente, [m³];

Q a relação de diretividade do alto-falante, [ad];

M um operador dado pela equação (27), [ad];

O critério que avalia o grau de inteligibilidade a partir do cálculo de $AL_{CONS}\%$ é o seguinte:

$AL_{CONS}\% < 10\% \Rightarrow$ inteligibilidade muito boa

$10\% \leq AL_{CONS}\% \leq 15\% \Rightarrow$ inteligibilidade boa

$AL_{CONS}\% > 15\% \Rightarrow$ inteligibilidade ruim

A partir deste critério, a equação de Peutz pode ser utilizada de maneira inversa, isto é; estipula-se um valor para $AL_{CONS}\%$ (tipicamente $AL_{CONS}\% = 15\%$) que garanta uma boa inteligibilidade e, a partir daí, determina-se os valores dos outros parâmetros, tais como D_2 , $T60$, V , etc.

Outro critério mais específico para avaliação da inteligibilidade a partir do cálculo de $AL_{CONS}\%$ e do parâmetro STI, proposto por Isbert, 1998, pode ser visto na Tabela E 4.

Entretanto, para que a equação de Peutz seja válida é necessário $S/R \geq 25,0$ dB e $D_2 \leq 3,16D_C$, onde D_C é a distância crítica dada pela equação (26).

Para os casos em que $D_2 > 3,16 D_C$, o valor de $AL_{CONS}\%$ é dado pelo seguinte expressão

$$AL_{CONS}\% = 9 \cdot T60 \quad (89)$$

4.13 Evitar Microfonia

Os sistemas de reforço sonoro destinados a amplificar voz (ou instrumento) ao vivo utilizando, portanto, microfones, devem proporcionar a todos os ouvintes situados na área de

cobertura as mesmas condições de audição que possui um ouvinte situado a uma distância EAD do orador (ou instrumento). Entretanto, isto deve ser feito sem que o sistema entre em oscilação regenerativa, provocando o que se conhece por microfonia.

A microfonia ocorre quando o nível do som reproduzido pelo alto-falante, e que realimenta o microfone, é suficientemente elevado de modo que torne o sistema instável, passando, este, a operar de maneira auto-sustentada. O ponto teórico exato onde este efeito ocorre é quando a intensidade do material realimentado torna-se igual a intensidade do material produzido pelo orador, ambos relativos ao microfone. O efeito audível característico é conhecido por microfonia.

Para dimensionar o sistema de modo a não provocar a microfonia, alguns conceitos devem ser estudados:

- Ganho Acústico Necessário (NAG): É o ganho que o sistema precisa dispor para reconstituir em D_0 as condições de audição em EAD , dado pela equação (90);
- Ganho Acústico Potencial (PAG): É ganho máximo que pode ser obtido do sistema antes que ocorra a microfonia. É dado pela equação (91);
- Ganho Acústico Suficiente (SAG): É o ganho mínimo suficiente para reconstituir em D_0 as condições de audição em EAD , sem que ocorra a microfonia. Portanto, o SAG é determinado quando $NAG \leq PAG$.

$$NAG = 20 \log D_0 - 20 \log EAD \quad (90)$$

$$PAG = 20 \log D_0 + 20 \log D_1 - 20 \log D_s - 20 \log D_2 - 10 \log NOM - FSM \quad (91)$$

sendo NAG o ganho acústico necessário, [dB]

PAG o ganho acústico potencial, [dB]

D_0 a maior distância entre um ouvinte e o orador, [m]

EAD a distância acústica equivalente, [m]

D_1 é a distância entre o microfone e o alto-falante, [m]

D_s a distância entre o orador e o microfone, [m]

D_2 a maior distância entre um ouvinte e o alto-falante, [m]

NOM o número de microfones simultaneamente abertos, [ad]

FSM a margem para estabilidade de Realimentação (tipicamente = 6dB), [dB]

A Figura 4.11 orienta as informações dispostas nas equações (90) e (91).

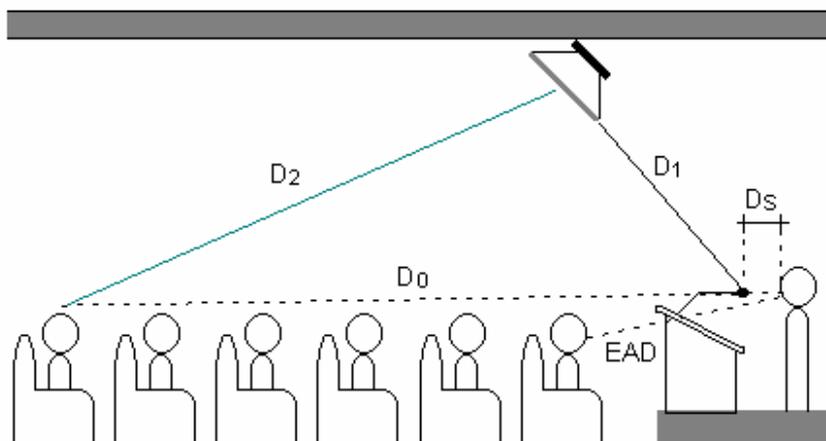


Figura 4.11 – Exemplo de Fonte Única com indicação das distâncias envolvidas no cálculo dos ganhos acústicos.
Fonte: Cysne, 2000..

A FSM é uma margem de projeto para que o sistema não trabalhe exatamente no ponto de instabilidade. A prática mostrou que o valor de 6,0dB para FSM evita que o sistema opere na região de “ringing” que é uma região de ganho que antecede a microfonia, caracterizada pela instabilidade da resposta em frequência e um efeito sonoro típico.

O sistema deve ser projetado, então, para disponibilizar um SAG tal que $NAG = PAG$. Assim, igualando as equações (90) e (91) pode-se determinar os demais fatores, tais como as distâncias máximas e mínimas possíveis, a quantidade de microfones máxima, etc..

Cabe observar que as expressões de NAG e PAG consideram os microfones e os alto-falantes como sendo omnidirecionais. Portanto, utilizar microfones e/ou alto-falantes direcionais pode ajudar a aumentar o PAG , evitando a microfonia.

Analisando os conceitos de ganho acústico descritos acima, surgem algumas recomendações para o sistema opere da melhor maneira possível. A primeira delas é que $D_l \geq D_c$ para que dessa forma o microfone fique no campo reverberante do alto-falante e, conseqüentemente, menos sujeito à microfonia. Outra é que $D_l \leq 14m$, para que aqueles ouvintes próximos ao orador que ainda conseguem escutar a voz sem amplificação, não percebam o som vindo do alto-falante como eco. E por último, que $EAD \leq D_c$ pois se EAD for maior que D_c o ouvinte estará no campo reverberante e, portanto, sem a necessidade de sistema de reforço.

Cysne, 2000, descreve algumas reações possíveis do sistema baseadas nas equações acima: “ Se D_1 for aumentada, o som direto produzido pelo falante chegará mais atenuado ao microfone e será possível operar o sistema com ganho mais elevado. Inversamente, a redução D_1 implica na redução do ganho do sistema, sob pena de nos aproximarmos de PAG , reduzindo a FSM . Se D_2 for aumentada, o nível de pressão sonora em D_2 será inferior ao pretendido e será preciso compensá-lo via aumento de ganho do sistema. Se D_3 for aumentada, também cairá o nível de pressão em D_2 . Se EAD for reduzida, será preciso aumentar o ganho do sistema para garantir o mesmo nível de pressão em D_2 .”

4.14 Resposta em Frequência

A resposta em frequência do sistema de reforço deve ser estabelecida tendo em vista, principalmente, o espectro de frequências do programa a ser reforçado. O quadro da Figura E 2 pode auxiliar nesta tarefa.

Como visto anteriormente, a faixa de frequência passível de ser ouvida pelo ser humano é de 20Hz a 20KHz. No entanto, se for considerado a capacidade auditiva média das pessoas, o limite superior fica entre 12KHz e 18KHz.

Portanto, projetar um sistema para responder em ampla faixa de frequência nem sempre é necessário e, na maioria das vezes, é um compromisso entre o orçamento disponível, o tipo de programa, a aplicação e a sofisticação que se quer imprimir ao sistema.

Mais importante que a extensão da faixa de frequência estão a linearidade e o balanço desta faixa. Considera-se uma resposta em frequência bem balanceada aquela que possui o produto dos seus limites inferior e superior entre 400.000 e 500.000. Uma resposta bastante plana é aquela que possui variação máxima de $\pm 5,0$ dB ao longo de sua extensão.

Cysne, 2000, cita um exemplo prático a respeito um de sistema de reforço de voz para um ambiente fechado de até 200 lugares. Neste ambiente, “as respostas em frequência que mais agradam são as bastante planas de 50Hz a 5KHz, apresentando um atenuação de 6,0 dB/oitava acima deste limite.” Em contrapartida, este mesmo autor escreve que “ na reprodução de música “séria”, em grandes ambiente abertos ou fechados, as exigências de resposta em frequência podem chegar a atingir tipicamente 40Hz a 20KHz”.

5. Técnicas de medição de resposta impulsiva

A resposta impulsiva é aquela resposta que um sistema apresenta em sua saída quando submetido a um estímulo do tipo impulsivo. Através dela é possível determinar as principais características do sistema que a gerou.

A resposta impulsiva de sistemas acústicos é adquirida através de medições envolvendo a geração, captação e armazenamento de um sinal sonoro que é posteriormente processado para fornecer as informações desejadas.

Grande parte dos parâmetros de qualidade acústica presentes no capítulo 3 são determinados a partir de cálculos que envolvem a resposta impulsiva. Portanto, é necessário que se desenvolvam técnicas de medição de resposta impulsiva para aumentar a confiabilidade e precisão destes parâmetros.

Este capítulo versa sobre as diferentes técnicas de medição de resposta impulsiva existentes atualmente, apresentando as formulações, as principais características e as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

5.1 Introdução

Um sistema linear invariante no tempo, *LTI*, é aquele que mantém uma relação linear entre a sua saída e sua entrada e, além disso, possui todas as suas propriedades fundamentais invariantes ao longo do tempo. Portanto, os parâmetros deste sistema serão sempre constantes. Outra característica importante a respeito dos sistemas *LTI* é a sua propriedade de conservação da frequência, isto é, este sistema não irá causar nenhuma modificação (translação) na frequência da entrada aplicada, podendo somente modificar a amplitude e a fase deste sinal.

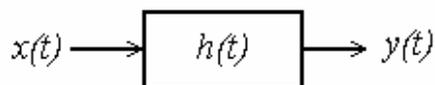


Figura 5.1 – Esquema em blocos da entrada e saída de um sistema.

Para um função arbitrária $x(t)$, a saída do sistema $y(t)$ é dada pela integral de convolução descrita pela equação (92). As características dinâmicas do LTI podem ser descritas por um

função de ponderação, $h(t)$, que é definida como sendo a saída do sistema, em qualquer tempo, para um entrada unitária impulsiva aplicada num tempo τ antes [Bendat, 1971].

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\mathbf{t}) \cdot x(t - \mathbf{t}) d\mathbf{t} \quad (92)$$

Um sistema *LTI* pode ser caracterizado, também, pela sua função de transferência $H(p)$, que é a transformada de Laplace da função $h(\mathbf{t})$, ou seja [Bendat, 1971]:

$$H(p) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \cdot e^{-pt} dt, \quad p = g + jh \quad (93)$$

sendo $p = g + jh$ coordenadas num plano complexo;

g, h números reais, [ad.]

Uma outra forma de caracterizar este sistema é através da sua função de resposta em frequência $H(f)$, que é definida como sendo a transformada de Fourier de $h(\mathbf{t})$. Esta função é simplesmente um caso especial da função de transferência onde, no expoente $p = g + jh$, $g = 0$ e $h = 2\pi f$. Em se tratando de sistemas “reais” (realizáveis e estáveis), a função de resposta em frequência pode substituir a função de transferência sem nenhuma perda de informação útil [Bendat, 1971].

$$H(f) = \int_0^{\infty} h(\mathbf{t}) \cdot e^{-j2\pi f t} d\mathbf{t} \quad (94)$$

Até aqui, observa-se que é possível obter uma descrição bastante completa de um sistema *LTI*, aplicando em sua entrada um sinal impulsivo, ou seja, um impulso. Este sinal, matematicamente encontrado na função Delta de Dirac $\delta(\mathbf{t})$, é idealizado como sendo um sinal de amplitude infinita e de duração infinitesimal (área unitária) e de possuir um espectro plano de potência sobre uma infinita banda de frequência. A resposta de um sistema a este tipo de entrada é conhecida como resposta impulsiva (IR) do sistema.

Outra maneira bastante simples de descrever o comportamento de um sistema *LTI* é utilizando um sinal aleatório como entrada do sistema.

De acordo com Bendat, 1971, é possível demonstrar que a correlação cruzada entre o sinal de entrada de um sistema e a sua saída é igual à convolução entre a auto-correlação do sinal de entrada e a resposta impulsiva do sistema, ou seja:

$$f_{xy}(t) = f_{xx}(t) \otimes h(t) \quad (95)$$

sendo, $f_{xy}(t)$ é a função de correlação cruzada entre o sinal de entrada $x(t)$ e o de saída $y(t)$;

$f_{xx}(t)$ é a auto-correlação do sinal de entrada do sistema;

$h(t)$ a resposta impulsiva do sistema.

A auto-correlação de um processo aleatório descreve a dependência geral de valores deste sinal num determinado tempo com valores deste mesmo sinal num outro tempo qualquer da duração do sinal. O conceito de correlação cruzada segue a mesma linha que a anterior, porém, a relação de dependência é calculada entre dois sinais distintos. Ambas funções, a de auto-correlação e de correlação cruzada, são expressas respectivamente através das integrais expostas a seguir [Bendat, 1971]:

$$f_{xx}(\mathbf{t}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t + \mathbf{t}) dt \quad (96)$$

$$f_{xy}(\mathbf{t}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t + \mathbf{t}) dt \quad (97)$$

Supondo que a auto-correlação do sinal de entrada é uma função Delta de Dirac, como é o caso de um sinal de entrada do tipo aleatório (ruído branco, por exemplo), a equação (95) passa a ser [Gomes, 1998]:

$$f_{xy}(t) = h(t) \quad (98)$$

Desta forma, o sistema pode ser determinado. É importante observar que, teoricamente, o ruído branco possui um espectro plano de potência, assim como o sinal tipo impulso, porém seu espectro de fase é aleatório ao contrário do que acontece com o espectro de fase do impulso, que é nulo para qualquer frequência.

Outros sinais foram surgindo com o avanço das técnicas de medição, adequando-se cada um deles ao tipo de sistema que se quer caracterizar.

Segundo Massarani, 2002, a medição da resposta em frequência de qualquer dispositivo sob teste (DUT) sempre envolve o fornecimento de um sinal de banda larga, contendo porções suficientes de energia em todas as frequências. A avaliação da função de transferência pode então ser realizada analisando-se a resposta na saída do *DUT* e comparando o resultado com o da entrada.

Archambeau et. al., 2002, escreve que, considerando a imobilidade de fonte e receptor, o espaço acústico no qual eles estão inseridos pode ser considerado um sistema linear invariante no tempo e caracterizado por uma resposta impulsiva.

Portanto, as características de um ambiente acústico, como salas, teatros e cinemas, podem ser determinadas através da sua IR. Nas técnicas atualmente utilizadas, o sistema acústico é excitado com algum tipo de sinal de banda larga e, após a aquisição da resposta do sistema é realizado o processo de deconvolução com o sinal de entrada, obtendo-se assim a resposta impulsiva. Este processo de deconvolução pode ser entendido como a convolução entre o sinal de saída e o inverso do sinal de entrada. Em geral, para melhorar a relação sinal-ruído (S/R) da IR, é feita uma média de várias respostas ainda antes do processo de deconvolução [Archambeau et. al., 2002]. Segundo este mesmo autor, a escolha do sinal de excitação e da técnica de deconvolução é de essencial importância para a medida da resposta impulsiva. Ele enfatiza a necessidade de que o sinal de excitação seja perfeitamente reproduzível e de que tanto o sinal de excitação quanto a técnica de deconvolução utilizada maximizem a relação sinal-ruído e eliminem os artefatos não-lineares da resposta impulsiva deconvoluída.

5.2 Técnica de Impulso

A técnica mais simples de medição é através da aplicação de um impulso, ou pulso, na entrada do sistema. A resposta obtida na saída já é a própria resposta impulsiva adquirida sem nenhum processamento adicional. No caso de acústica de ambientes, este impulso pode ser gerado, por exemplo, através de um disparo de pistola, mas na maioria das vezes ele é sintetizado eletronicamente e reproduzido através de alto-falantes. Neste último caso, a amplitude do sinal é limitada pelo sistema de reprodução. Assim, não se consegue concentrar energia suficiente neste único pulso, o que acarreta uma relação sinal/ruído insatisfatória, principalmente em baixas

freqüências. O que se faz então é espalhar a energia que se concentra no pulso para um período maior de medição através de um sinal de ruído aleatório (ruído branco) ou pseudo-aleatório (MLS, IRS, etc) que será discutido posteriormente.

Aoshima, 1981, afirma que mesmo quando a fonte impulsiva é um disparo de pistola ou uma explosão de um balão, como é usualmente utilizado para gerar impulsos em medições acústicas, o espectro do sinal gerado não é plano nem para uma estreita faixa de freqüência. Apesar disto, enfatiza a vantagem de se usar pulsos, pois eles podem ser facilmente distinguidos na resposta do sistema através das suas diferenças temporais, o que é conveniente para o processamento posterior.

Ele então elabora um pulso gerado por computador que possui uma característica espectral plana com fase zero, típicas de um sinal impulsivo. Para gerar este sinal, primeiramente é definida a característica do mesmo no domínio freqüência e, posteriormente, obtém-se a resposta no domínio tempo através da transformada inversa de Fourier do sinal gerado.

A parte real da matriz complexa é definida por [Asano, 1981]:

$$\begin{aligned} X(n) &= 999 \cdot \exp\{-(n-900/800)^2\}, 1 \leq n \leq 2048 \\ X(n) &= X(4098-n), 2050 \leq n \leq 4096 \\ X(2049) &= 0 \end{aligned} \quad (99)$$

Sendo n um número inteiro que representa a freqüência e o tamanho da matriz, que neste caso é de 4096 posições. A parte imaginária assume-se ter o valor constante de zero. Na Figura 5.2 podemos ver a formato desta função.

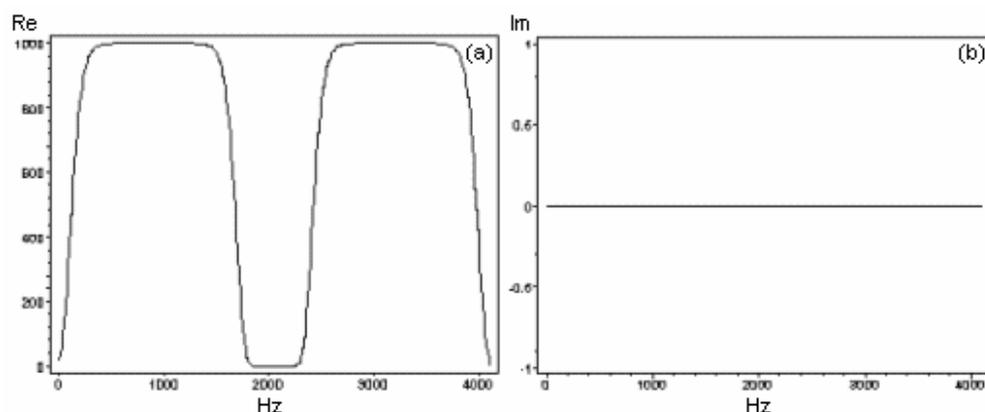


Figura 5.2 – Função complexa que descreve um pulso no domínio freqüência. (a) é a parte real e (b) parte imaginária (igual a zero). Fonte: Aoshima, 1981.

Como esta é uma função complexa conjugada, a transformada inversa de Fourier é uma função real no tempo, como mostra a Figura 5.3. O ângulo de fase desta função é sempre zero, portanto, a função no tempo se concentra perto da origem, isto é, nos pontos mais a esquerda e mais direita do eixo do tempo. Por fim, estes últimos pontos são conectados, como mostra a Figura 5.4 criando, assim, um pulso no domínio tempo com as características espectrais desejadas.

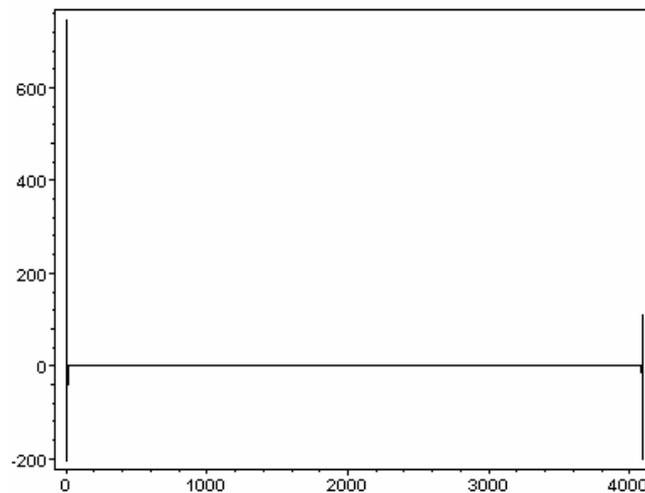


Figura 5.3 - Parte real da transformada inversa de Fourier da função dado pela Figura (2). A parte imaginária é constante com valor zero. Fonte: Aoshima, 1981.

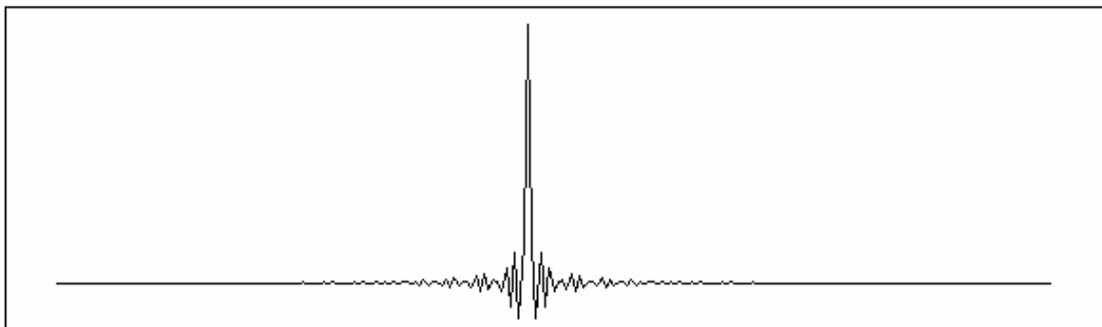


Figura 5.4 - Pulso gerado a partir da conexão da primeira e da última parte do gráfico da Figura 5.3.

5.3 Técnica TDS – Time Delay Spectrometry

Na década de 60, Richard Heyser concebeu um outro tipo de técnica de medição baseada em varredura linear de frequência e que dispensa o cálculo da FFT para a obtenção das funções de transferência. Na técnica TDS (*Time Delay Spectrometry*), como é conhecida, um sinal de

varredura linear, cuja frequência instantânea aumenta com um incremento constante no tempo, é emitido através de um alto-falante para um sistema acústico qualquer e a resposta deste sistema é captado por um microfone. Este sinal de resposta é, então, multiplicado pelo sinal do gerador e ainda por uma versão defasada em 90° . Assim as partes real e imaginária da função de transferência complexa são obtidas [Muller, 2002]. A figura abaixo traz um diagrama de blocos do processamento do TDS.

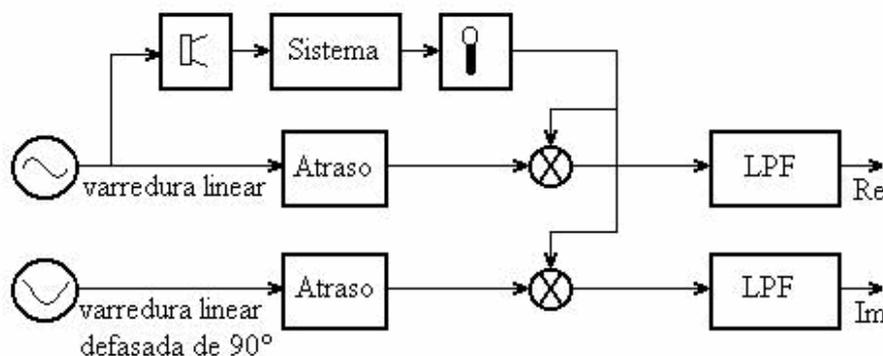


Figura 5.5 – Diagrama em blocos de um analisador TDS. Fonte: Muller, 2002.

Um bloco de atraso é colocado no processo para sincronizar o sinal do gerador com aquele captado pelo microfone devido ao atraso na propagação do som. O filtro passa baixa (LPF) na saída do processo serve para atenuar o sinal com frequência de batimento muito alta, resultante da multiplicação dos dois sinais anteriores. Quando bem sincronizado, o som direto e o sinal do gerador ao serem multiplicados, resulta num sinal com frequência próxima a 0Hz que passa sem atenuação pelo LPF. Entretanto, aqueles sinais de sons refletidos, que chegam no microfone com uma frequência instantânea menor que a do som direto, geram um sinal com frequência de batimento bem mais alta e são atenuados pelo LPF. Quanto maior o trajeto, maior a atenuação. Dessa forma, esta técnica tem a grande vantagem de eliminar os efeitos das reflexões no sinal direto.

Outras vantagens de se usar a TDS é que ela é menos sensível a distorções e variâncias no tempo do que métodos que empregam ruído pseudo-aleatório (RPA). Porém, a lentidão, a baixa relação sinal-ruído em baixas frequências e as ondulações na frequência inicial de varredura, prejudicam o seu desempenho. Aliado a isto, a TDS também requer um ajuste manual do tempo de retardo.

Farina, 2000, diz que o atual estado da arte em medições de áudio está representado por dois diferentes tipos de medições: A caracterização da função de transferência do sistema através da medição da resposta impulsiva e a análise de não linearidades através da medição da distorção harmônica em várias ordens. Para a caracterização da IR, as técnicas mais comuns utilizadas hoje em dia são a MLS (*maximum length sequence*) e a IRS (*inverse repeated sequence*), que usam um sinal de ruído branco pseudo-randômico e a TSP (*Time Stretched Pulse*) e a *SineSweep*, que utilizam sinais de varredura em frequência.

5.4 Técnica MLS

A técnica MLS foi primeiramente proposta por Schroeder em 1979 e na década seguinte se popularizou na área da acústica com o surgimento do sistema MLSSA (*MLS System Analyzer*) até hoje utilizado, que consiste de um programa para MS DOS e de uma placa com conversores A/C de 12bits.

Ela surgiu como uma alternativa mais eficiente de se medir a resposta impulsiva de sistemas, tendo em vista a dificuldade de gerar pulsos em curtos espaços de tempo e com espectro plano nas faixas de frequência de interesse. Como enfatiza Gomes, 1998, no caso específico de medições acústicas, 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, gerando distorções e espectros não planos. De outra forma, o uso de ruído aleatório (ruído branco) não proporciona a repetibilidade do experimento e, como dito anteriormente, não fornece uma boa relação sinal/ruído, principalmente em baixas frequências.

Esta técnica tem como base a excitação de um espaço acústico por um sinal periódico pseudo-randômico que possui as propriedades estocásticas de um ruído branco puro. Com a técnica MLS, a resposta impulsiva é obtida através da correlação cruzada circular (*circular crosscorrelation*) entre a medição de saída e o sinal de entrada (MLS). O resultado é a obtenção da resposta impulsiva periódica $\hat{h}[n]$, que se relaciona com a resposta impulsiva $h[n]$ através da seguinte expressão [Archambeau et. al., 2002]:

$$\hat{h}[n] = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} h[n - mL_{MLS}] \quad (100)$$

sendo L_{MLS} é o comprimento da sequência MLS.

Uma forma bastante rápida de se calcular a correlação cruzada entre a entrada e a saída do sistema é utilizando a transformada rápida de Hadamard (FHT) que executa a operação ainda no domínio tempo. Archambeu, 2002, cita o artigo de Alrutz e Schoroeder onde esta transformada é apresentada. Os sistemas MLSSA utilizam a FHT para o cálculo da resposta impulsiva. Outros sistemas executam a correlação cruzada através da transformada inversa de Fourier (IFFT) do resultado da multiplicação das FFTs dos sinais de entrada e saída.

As seqüências do tipo “*Maximum-Lenght*” são geradas por “*shift registers*” que satisfazem certas relações recursivas e que podem ser representadas como mostra o diagrama abaixo:

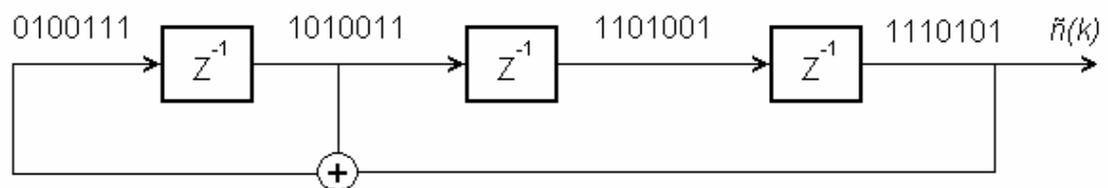


Figura 5.6 – Diagrama em blocos que representa uma relação recursiva geradora de uma seqüência MLS. Fonte: Gomes, 1998.

A geração da seqüência ocorre da seguinte forma: Cada bloco representado por Z^{-1} atrasa um “bit” da “palavra binária” que existe no nó anterior. As “palavras” apresentadas no diagrama são produzidas quando o estado inicial do sistema for $\tilde{n}(k) = 1111111$. Um “*shift register*” com i estágios é capaz de produzir 2^i estados diferentes. No entanto, se ocorrer o estado $\tilde{n}(k) = 0000000$, será impossível a ocorrência de estados diferentes. Para evitar este problema, a seqüência mais longa que pode ser gerada, usando realimentação linear, tem comprimento $2^i - 1$. Uma seqüência binária de comprimento $2^i - 1$ é denominada “*Maximum Lenght Sequence*” [Gomes, 1998]

A Figura 5.7 mostra o espectro de amplitude seqüência MLS de ordem 19 (19 bits) à uma taxa amostragem do sinal for de 44.1 KHz, enquanto que a Figura 5.8 mostra a quantidade de energia em cada freqüência, ao longo do tempo, ou seja, o sonograma do sinal.

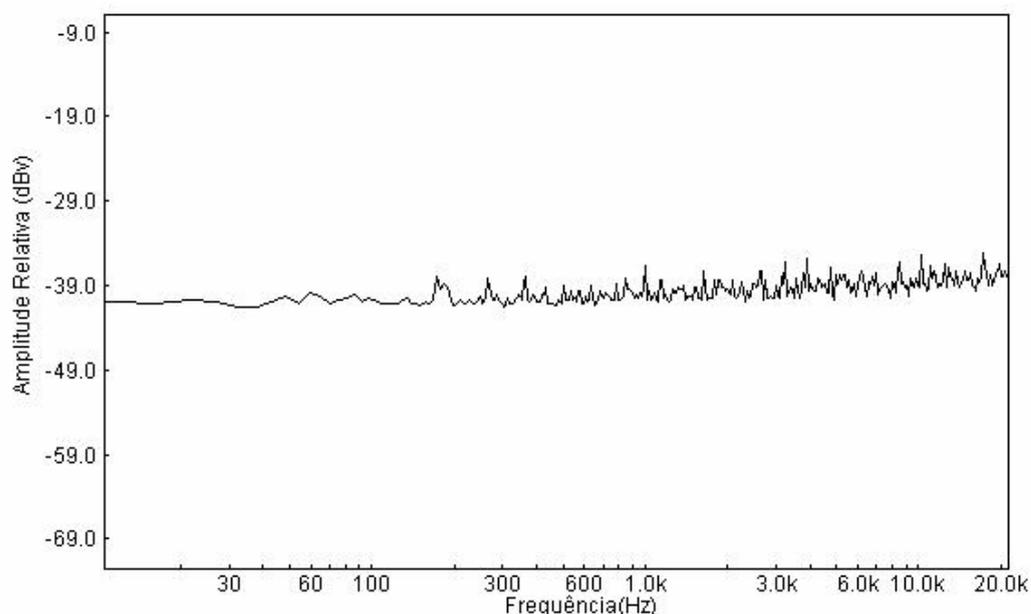


Figura 5.7 – Gráfico da resposta em frequência de uma sinal MLS.

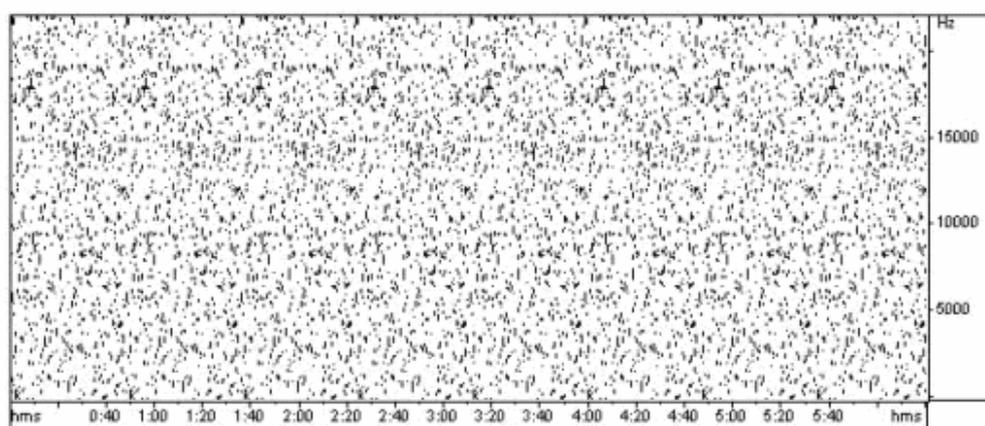


Figura 5.8 – Sonograma de sinal MLS.

Apesar das características de amplitude e fase serem idênticas a de um sinal aleatório, este sinal é determinado pela seqüência muito bem definida vista anteriormente. Esta é a grande vantagem da MLS: Por ser um sinal determinístico, a repetibilidade das medições é garantida, assim, diferenças entre medições sucessivas são atribuídas ao ruído de fundo do sistema cujo efeito pode ser eliminado através do cálculo das médias de várias medições. Archambeau et. al., 2002, explica que esta técnica tem a capacidade de randomizar o espectro de fase de qualquer componente do sinal de saída do sistema que não está correlacionado com o sinal MLS. Como conseqüência, um distúrbio qualquer (ruído branco ou impulsivo) terá sua fase randomizada, o

que levará a uma distribuição uniforme dos seus efeitos ao longo da resposta impulsiva deconvoluída, ao invés de em pontos localizados no eixo do tempo. Por isso, as médias sucessivas eliminarão os distúrbios indesejáveis, aumentando a relação sinal/ruído das medições.

Outra vantagem de ser um sinal previamente determinado é a não necessidade de “gravar” o sinal de excitação junto com o sinal da resposta do sistema, o que faz com que apenas um canal de medição seja necessário.

Um problema bem conhecido na execução desta técnica é o erro gerado pelo efeito de “*time aliasing*”. Como visto anteriormente, o resultado da correlação cruzada circular é a resposta impulsiva periódica $h'[n]$ que se relaciona com a resposta impulsiva $h[n]$ através da equação (100). Para que $h'[n]$ seja uma boa aproximação de $h[n]$ é necessário que o comprimento da seqüência L_{MLS} seja igual ou maior que a resposta impulsiva do sistema. Portanto, na prática é necessário um conhecimento prévio e aproximado do tempo de reverberação do ambiente, no caso de uma medição acústica, para que se possa estimar o comprimento da seqüência MLS a ser utilizado.

Da mesma forma que um ruído aleatório, a seqüência MLS também tem um espectro plano de frequências. Na verdade, como escreve Massarani, 2002, um espectro plano é pouco prestável em medições acústicas pois o ruído ambiente é quase sempre maior em baixas frequências e é nesta faixa, também, que a resposta da maioria dos alto-falantes cai. Outro problema é que numa caixa de som a maior parte da energia vai para o alto-falante mais fraco, ou seja, o *tweeter*. Na tentativa de se obter uma S/R satisfatória para o sinal de saída é freqüente aumentar o volume do sinal de excitação. Em consequência, além da possibilidade de queimar o *tweeter*, o sinal acaba saindo distorcido dos alto-falantes alterando de forma definitiva o resultado as medições. Outra forma para aumentar a S/R seria, então, realizar uma pré-ênfase nas faixas de frequências desejadas. Tanto Massarani, 2002, quanto Gomes, 1998, mostram que este procedimento acaba gerando outros problemas, o que não justificaria o uso desta técnica.

De um forma geral, a alta vulnerabilidade às distorções harmônicas e às invariâncias no tempo são as principais desvantagens das técnicas que usam ruído aleatório ou pseudo-aleatório.

Outro aspecto negativo e de ordem prática é que o som gerado pelas MLS são desagradáveis e agressivos, constituindo até em perigo em sistema de som poderosos. Se a MLS for acidentalmente fornecida com um nível muito alto, pode trazer danos à audição de pessoas nas proximidades dos alto-falantes [Massarani, 2002].

5.5 Técnica IRS

Esta técnica pode ser considerada uma otimização da técnica MLS no sentido de aumentar a relação sinal ruído da medição através do aumento do comprimento da seqüência.

Cada seqüência $x[n]$ com um período de amostragem de $2L_{MLS}$ é definida a partir da correspondente seqüência MLS de período L_{MLS} ($MLS[n]$) através da seguinte relação [Archambeau et. al., 2002]:

$$x[n] = \begin{cases} MLS[n/2], & n \text{ par}, 0 \leq n \leq 2L \\ -MLS[n/2], & n \text{ ímpar}, 0 < n < 2L \end{cases} \quad (101)$$

O processo de deconvolução é exatamente o mesmo que para a técnica MLS (correlação circular).

Archambeau et. al., 2002, compara medições feitas com a MLS e com a IRS e mostra que esta última oferece uma melhor S/R reduzindo, inclusive, alguns picos de distorção ocasionados pelo alto-falante.

Em geral, tanto uma técnica quanto outra esbarra no cansativo e demorado trabalho de se ajustar o nível do sinal de excitação que será enviado ao alto-falante. Na prática, a amplitude deste sinal é um compromisso entre aumentar a distorção do alto-falante, através do aumento da amplitude, e reduzir a relação sinal ruído da resposta, através da redução da amplitude.

Gomes, 1998, cita um artigo de Bradley, em 1996, que trata da otimização do sistema de medição utilizando MLS. Segundo este último autor, para calcular os parâmetros acústicos a partir da curva de decaimento (resposta impulsiva), é importante que a faixa dinâmica desta seja maximizada. Então é apresentado alguns fatores que podem reduzir esta faixa dinâmica, tais como: relação sinal MLS/ruído de fundo inadequada; comprimento pequeno da MLS; número inadequado de médias e distorção excessiva do alto-falante sendo estes fatores comprovados através de experimentos práticos.

5.6 Técnica TSP – *Time Stretched Pulse*

O sinal de TSP (*Time Stretched Pulse*), como o próprio nome já diz, é um pulso estendido no tempo criado a partir das suas características no domínio da freqüência. Foi proposto por Aoshima, 1981 e posteriormente otimizado por Suzuki et. al., 1994.

O autor propõe, então, uma outra função em frequência que possui os mesmos valores absolutos que os da equação (99), como sendo[Suzuky et. al., 1994]:

$$\begin{aligned}
 X(n) &= 999 \exp \left[- \left(\frac{n-900}{800} \right)^2 \right] \cos \left(\frac{12n^2}{10000} \right), 1 \leq n \leq 2048 \\
 X(n) &= X(4098-n), 2050 \leq n \leq 4096, \\
 X(2049) &= 0, \\
 Y(n) &= 99 \exp \left[- \left(\frac{n-900}{800} \right)^2 \right] \sen \left(\frac{12n^2}{10000} \right), 1 \leq n \leq 2048, \\
 Y(n) &= -Y(4098-n), 2050 \leq n \leq 4096, \\
 Y(2049) &= 0
 \end{aligned} \tag{102}$$

onde $X(n)$ e $Y(n)$ as partes real e imaginária desta função complexa e estão apresentadas na Figura 5.9 e na Figura 5.10, respectivamente.

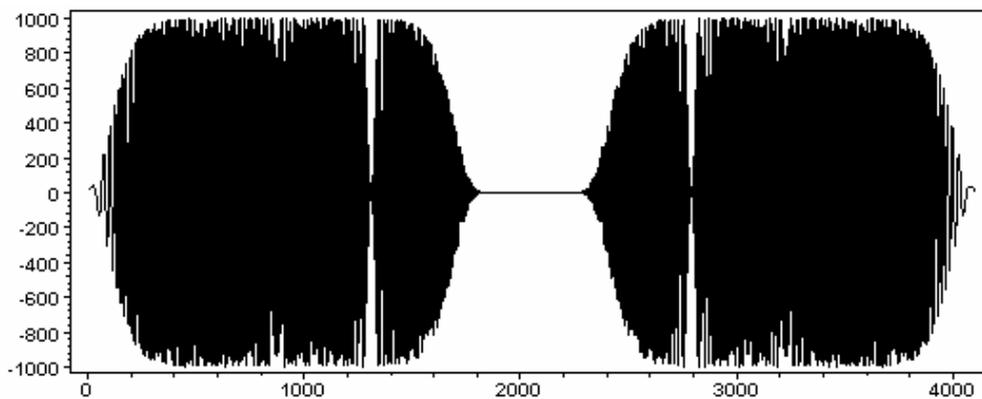


Figura 5.9 - Parte real, simétrica, da função complexa dada pela equação (102). Fonte: Aoshima, 1981.

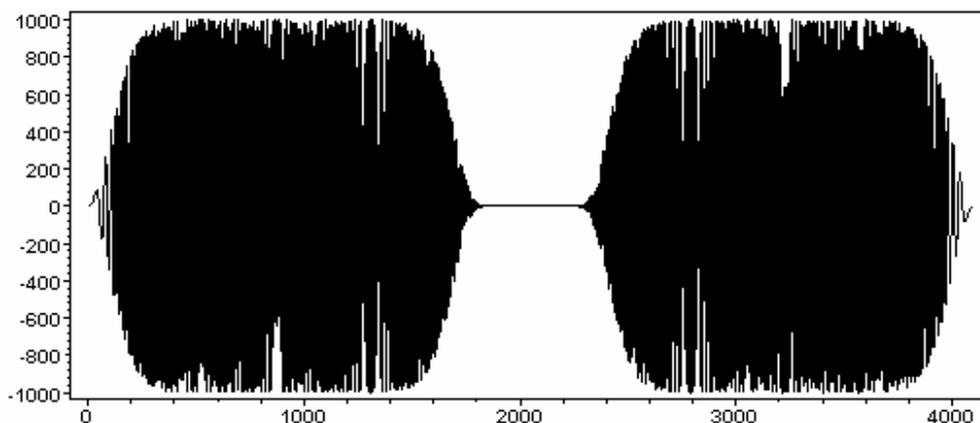


Figura 5.10 - Parte imaginária, anti-simétrica, da função complexa dada pela equação (102). Fonte: Aoshima, 1981.

Por se tratar de uma função complexa simétrica conjugada, a sua transformada inversa de Fourier (iFFT) é uma função real no tempo, como mostra a Figura 5.11. Este é o sinal TSP.

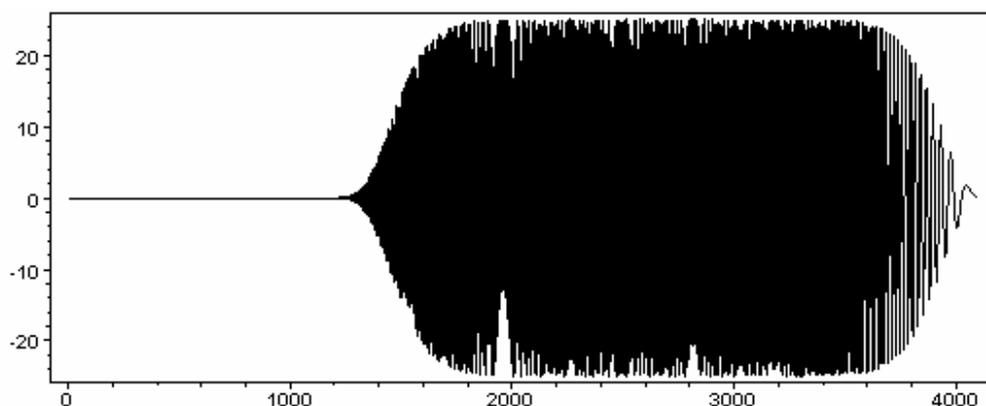


Figura 5.11 – Função no tempo que representa o sinal TSP.

Como o autor escreve, esta função pode ser considerada como a saída de um filtro cuja função de transferência é dada pela equação (103) e o sinal de entrada é dado pela equação (99). A derivada em frequência da fase deste filtro é dado pela equação (104) e representa o atraso de tempo para uma dada frequência n [Suzuky et. al., 1994]:

$$H(n) = \exp \left[j \left(\frac{12n^2}{10000} \right) \right] \quad (103)$$

$$-\frac{d}{dn} (\angle H) = -\frac{24n}{10000} \quad (104)$$

$$H^{-1}(n) = \exp\left[-j\left(\frac{12n^2}{10000}\right)\right] \quad (105)$$

Cada componente de frequência do sinal de entrada avança, então, proporcionalmente ao avanço de sua frequência. Em outras palavras, existe uma relação exata entre a frequência momentânea do sinal e o tempo em que ela ocorre. Como resultado, o filtro dado pela equação (103) expande o sinal de pulso no domínio tempo sem alterar as características espectrais.

O autor também mostra que, aplicando o filtro inverso dado pela equação (105) no sinal de TSP, a compressão do mesmo é alcançada e um impulso no domínio tempo aparece. Portanto, para obter a resposta impulsiva de um sistema cujo sinal de excitação é o TSP, aplica-se este filtro de compressão ao sinal de saída.

Entretanto, da forma como foi proposto, este sinal de TSP se apresenta com uma estrutura bem rígida. Sua limitação em frequência (4096Hz), que conseqüentemente limita sua extensão no tempo, não permite medições de respostas impulsivas longas e não fornece dados significativos para as altas frequências. Além disso, como se pode observar na Figura 5.9 e na Figura 5.10, o pulso gerado no domínio frequência é bastante suavizado próximo das extremidades e este efeito é refletido, conseqüentemente, para o domínio tempo. Este fato limita a generalidade do uso não fornecendo bons resultados próximo das frequências 0Hz e $f_s/2$ Hz, sendo f_s a frequência de amostragem do sinal.

Visando melhorar estes fatores de forma a deixar com que o usuário determine o quanto este “pulso será estendido”, Suzuki et. al., 1994, reescreve a função no domínio frequência e propõe um “pulso estendido no tempo de Aoshima otimizado” (OATSP), dado pela equação (106).

$$H(k) = \begin{cases} \exp(j4gpk^2 / N^2), 0 \leq k \leq N/2 \\ H(N-k), N/2 < k < N \end{cases} \quad (106)$$

sendo g um número inteiro que determina a extensão do OATSP;

$$N=2^i, i = 0, 1, 2 \dots;$$

k valor definido em frequência.

Aqui o problema da suavização é resolvido e o usuário pode determinar a extensão do pulso e a frequência máxima de amostragem.

A resposta do sistema sob este sinal é então multiplicada em frequência (convolução) com o filtro inverso $H^{-1}(k)$ e, após feita a iFFT deste resultado, encontra-se a resposta impulsiva do sistema.

Todos estes cálculos acima são baseados na FFT de comprimento N . Isto significa que a convolução do sinal com o filtro inverso é circular e o comprimento da resposta impulsiva a ser medida deve ser menor ou igual a N para que a “cauda” não sobreponha a “ponta” durante este processo, efeito conhecido como “*time aliasing*”, já discutido anteriormente. Entretanto, por alguma restrição computacional do equipamento de medida, às vezes é difícil de se gerar um sinal muito longo. Uma forma de resolver este problema é inserir “zeros” (períodos de silêncio) no pulso original para se conseguir um seqüência maior. Fazendo isto, a convolução entre os sinais deixa de ser circular e passa a ser linear e o “*time aliasing*” é evitado.

Segundo Archambeau et. al., 2002, o objetivo de se usar este processo de expansão para o sinal de excitação é aumentar a energia sonora emitida para uma magnitude fixa do sinal e, portanto, aumentar a S/R sem acrescentar não-linearidades introduzidas pelo sistema de medição. Porém, apesar de reduzir estas distorções, esta técnica não as elimina totalmente.

5.7 Técnica de varredura de seno - *SineSweep Technique*

Todas as técnicas vistas anteriormente partem do princípio de que o sistema a ser medido é linear e invariante no tempo (LTI). Na prática, e em particular em sistemas acústicos, esta condição dificilmente é alcançada e este fato acaba aparecendo sob forma de distorções na resposta impulsiva.

A técnica de varredura de seno (*sinesweep technique*), desenvolvida por Farina, 2000 ultrapassa esta limitação utilizando um sinal de varredura de seno com a frequência variando exponencialmente com o tempo, ou seja, uma varredura logarítmica de senos. Com isso, é possível simultaneamente deconvoluir a resposta impulsiva do sistema e separar seletivamente cada resposta impulsiva referente à distorção harmônica da ordem considerada. Após o processo de deconvolução, estas distorções harmônicas aparecem no eixo do tempo antes da resposta impulsiva linear do sistema e podem então serem facilmente removidas.

De outra forma, se o objetivo da medição é justamente estudar os efeitos das distorções harmônicas de ordem superior causadas pelo sistema, a utilização desta técnica nos fornece

separadamente as respostas impulsivas destas distorções que podem ser retiradas da *IR* do sistema para o seu estudo em separado.

O autor propõe, então, uma forma mais complexa (e mais realista) de se encadear os processos de medição do sistema, acrescentando duas condições importantes: A primeira de que algum ruído pode ser gerado dentro do sistema a ser medido e, portanto, este pode ser adicionado à parte “determinística” do sinal de saída. Usualmente, este ruído é considerado um ruído branco gaussiano, completamente sem correlação com o sinal de entrada. A segunda condição consiste no fato de que as não-linearidades ocorrem geralmente bem no início da resposta do sistema e são substancialmente sem memória. Depois desta distorção inicial, o sinal passa através da parte linear do sistema, caracterizado pelos evidentes efeitos temporais (memória) [Farina, 2000].

Como o autor escreve, “este é o típico cenário de um espaço reverberante excitado através de um alto-falante: A distorção ocorre no transdutor eletromecânico mas, assim que o som é irradiado no ar, ele passa pelo subseqüente processo de irradiação linear, incluindo múltiplas reflexões, ecos e reverberação.”

O diagrama em blocos deste “novo” encadeamento fica então

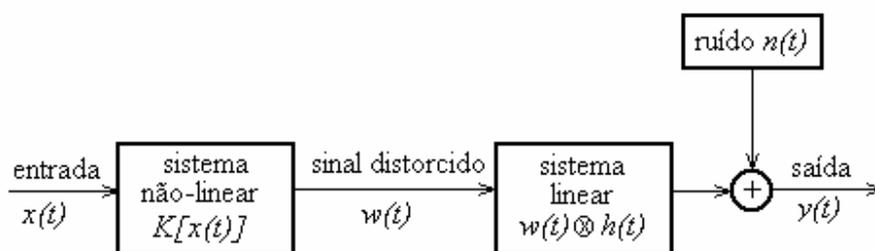


Figura 5.12 – Diagrama de blocos considerando os efeitos de ruído e de não-linearidades inerentes ao sistema.
Fonte: Archambeau et. al., 2002

Aqui, o sinal distorcido é dado por [Archambeau et. al., 2002]:

$$w(t) = x(t) \otimes k_1(t) + x^2(t) \otimes k_2(t) + x^3(t) \otimes k_3(t) + \dots x^n(t) \otimes k_n(t) \quad (107)$$

sendo $k_M(t)$ representa o i -ésimo componente do Volterra Kernel [Farina, 2000].

Archambeau et. al., 2002, escreve que, na prática, é muito difícil separar a parte linear (a parte reverberante da resposta impulsiva) da parte não-linear (distorção). Então se considera que a resposta total (a saída do sistema) é composta pelo ruído Gaussiano $n(t)$ e por uma série de respostas impulsivas $h_N(t)$, cada uma convoluída com uma diferente porção de energia do sinal de entrada. A resposta do sistema passa a ser então [Archambeau et. al., 2002]:

$$y(t) = n(t) + x(t) \otimes h_1(t) + x^2(t) \otimes h_2(t) + x^3(t) \otimes h_3(t) + \dots + x^n(t) \otimes h_n(t) \quad (108)$$

Farina, 2000, enfatiza que outras considerações são necessárias para descrever um sistema não invariante no tempo. Nestes sistemas, as respostas impulsivas $h_N(t)$ não permanecem sempre as mesmas, mas mudam vagarosamente ao longo do tempo. Essas mudanças contínuas, por serem bastante lentas, não chegam a causar algum efeito audível, porém, apresentam sérios problemas durante as medições, o que impede o uso da técnica de realizar médias para remover o ruído externo $n(t)$ no sentido de alcançar uma melhor relação sinal ruído. De fato, conclui o autor, para este tipo de medição, aumentar o número de médias não só contamina o ruído $n(t)$ mas deteriora a parte variável da função de transferência.

Uma varredura de seno de frequência variável pode ser matematicamente escrita da seguinte forma [Farina, 2000]:

$$x(t) = \text{sen}[f(t)] \quad (109)$$

A frequência instantânea da varredura é dada pela derivada do argumento da função seno. Por exemplo, se $f(t) = wt$, onde w é constante, a frequência instantânea também será constante, como era de se esperar. Porém, se ao invés de ser constante a frequência (w) variar linearmente, iniciando num valor w_1 e terminando num outro valor w_2 , num tempo total T , obtém-se [Farina, 2000]:

$$\frac{d[f(t)]}{dt} = w_1 + \frac{w_2 - w_1}{T} \cdot t \quad (110)$$

sendo t e T dados em [s] e w_1 e w_2 dados em [rad/s].

Integrando a equação (110), determina-se a $f(t)$. A varredura linear de seno é então gerada a partir da função abaixo [Farina, 2000]:

$$x(t) = \text{sen} \left(w_1 \cdot t + \frac{w_2 - w_1}{T} \cdot \frac{t^2}{2} \right) \quad (111)$$

De forma semelhante, se pode encontrar uma equação que gera uma varredura logarítmica de seno, sinal este utilizado na presente técnica [Farina, 2000]:

$$x(t) = \text{sen} \left[\frac{w_1 \cdot T}{\ln \left(\frac{w_2}{w_1} \right)} \cdot \left(e^{\frac{1}{T} \ln \left(\frac{w_2}{w_1} \right) t} - 1 \right) \right] \quad (112)$$

O tempo de atraso \mathbf{D} entre uma harmônico de ordem N e a resposta linear (não distorcida) ao longo do tempo pode ser expressa por [Farina, 2000]:

$$\Delta t = T \cdot \frac{\ln(N)}{\ln \left(\frac{w_2}{w_1} \right)} \quad (113)$$

Pode se notar que \mathbf{D} é constante para uma determinada ordem N , o que faz com que a resposta impulsiva resultante de cada harmônico “apareça” ao longo do tempo num tempo bem determinado antes da resposta linear do sistema. Também, como \mathbf{D} aumenta com o logarítmico de N , o espaçamento entre as respostas dos harmônicos diminui à medida que aumenta a ordem da distorção. Esta é outra vantagem da varredura logarítmica: No caso de uma varredura linear, os picos de distorção (harmônicos) não são muito evidentes, aparecendo como um ruído qualquer distribuído ao longo da resposta impulsiva.

A resposta impulsiva do sistema é calculada, então, através da convolução entre o sinal de saída $y(t)$ e o filtro inverso do sistema $f(t)$, através da convolução linear entre os sinais. Este filtro inverso é um sinal capaz de comprimir o sinal de entrada $x(t)$ dentro da função Delta de Dirac $\mathbf{d}(t)$, ou seja, é uma função que obedece a seguinte relação [Farina, 2000]:

$$x(t) \otimes f(t) = \mathbf{d}(t) \quad (114)$$

Por fim, Farina, 2000, escreve a melhor forma na qual esta técnica deve ser utilizada para obter melhores resultados: Gerar uma única e bastante longa varredura de seno. Isto produz um resposta linear livre de distorções, distorções harmônicas bem separadas ao longo do tempo e uma resposta não afetada por variações temporais do sistema, pois apenas uma medida é realizada. A relação sinal ruído alcançada é muito boa pois a energia é bem distribuída ao longo do tempo e então comprimida numa simples resposta impulsiva obtendo, geralmente, uma S/R de 60db ou mais em comparação a geração de um simples sinal impulsivo tendo a mesma amplitude máxima.

A Figura 5.13 representa o espectro de amplitude de uma varredura logarítmica, cujas frequências inicial e final são de 10Hz e 22KHz, respectivamente, com duração de 10s. A Figura 5.14 mostra o sonograma deste mesmo sinal

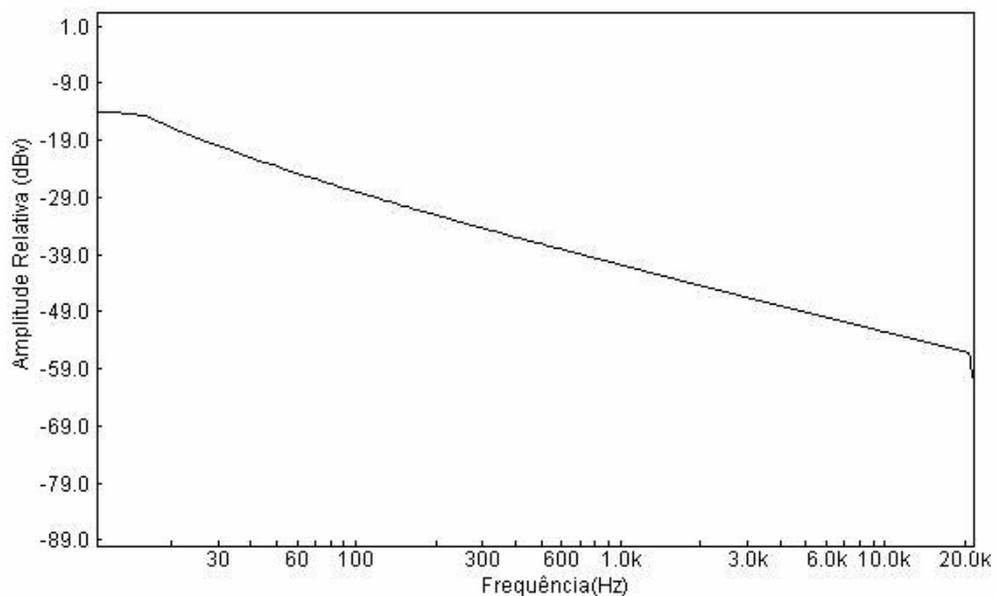


Figura 5.13 – Gráfico da resposta em frequência de um sinal de varredura logarítmica de seno.

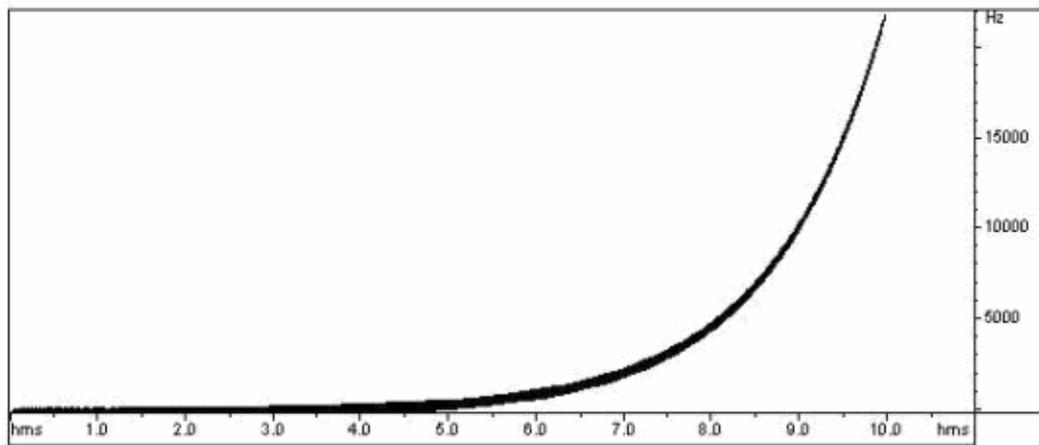


Figura 5.14 – Sonograma de um sinal de varredura logarítmica de seno.

6. Análise eletroacústica do Salão de Atos da UFRGS

6.1 Introdução

Este capítulo apresenta o resultado das medições realizadas no Salão de Atos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), localizado na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, elaboradas com o objetivo de analisá-lo sob o ponto de vista eletroacústico.

Aqui, também são relatadas as características dos equipamentos utilizados, os instrumentos de medida e todo o procedimento que envolveu estas medições.

Ao longo deste capítulo, é realizada a análise parcial dos resultados obtidos em cada medição para que, posteriormente, se possa verificar, segundo alguns critérios objetivos descritos nesta dissertação, a qualidade acústica deste ambiente quando submetido ao sistema de som nele instalado. Este capítulo também apresenta alguns resultados comparativos entre as diferentes técnicas de medição utilizadas e presentes neste trabalho.

A escolha deste ambiente surge a partir de suas características favoráveis para que este tipo de experimento seja realizado, tais como:

- Teatro de múltiplo uso, onde se realizam palestras, formaturas, apresentações musicais e espetáculos teatrais;
- Sistema de áudio próprio;
- Facilidade de acesso e permanência para a realização do experimento já que o Salão de Atos faz parte do ambiente universitário;
- Acesso à documentação.

Outro fator que contribui para a sua escolha é o fato de haver um considerável número de trabalhos na bibliografia a respeito das características acústicas deste tipo de ambiente (teatro de múltiplo uso) podendo o autor, então, comparar os resultados aqui obtidos com os resultados obtidos por outros autores.

A motivação de ordem prática para a realização deste experimento, além do presente objetivo acadêmico, vem do fato de que, tanto para eventos como formaturas e palestras de grande porte como para apresentações de música em geral, faz-se necessário a contratação de uma empresa de sonorização que tráz consigo o seu equipamento de áudio, deixando de lado o sistema existente no auditório

Daí surge a idéia de se analisar o sistema como um todo, isto é, o sistema acústico junto com o sistema de áudio, no sentido de avaliar os recursos que o auditório dispõe.

6.2 Descrição do ambiente

O Salão de Atos é um teatro de múltiplo uso em forma de leque para 1300 lugares. Possui um palco com área útil de aproximadamente 350m² e platéia inclinada disposta em filas de cadeiras. Seu volume aproximado é de 9950m³.

O piso é revestido com carpete, bem como parte de suas paredes laterais. Nestas, além do carpete, também estão instalados difusores acústicos de madeira que percorrem quase a totalidade das paredes laterais do teatro.

O teto possui painéis côncavos de gesso para a reflexão, orientados para melhorar a propagação do som vindo do palco. Este, por sua vez, possui paredes duplas na região posterior, construídas a partir de uma reforma realizada em 1989 no sentido de diminuir o ruído externo, pois está localizado junto a uma rua de alto tráfego de automóveis e caminhões.

Maiores detalhes podem ser vistos nas plantas baixas e de corte no APÊNDICE A juntamente com as fotos do interior do ambiente presentes no APÊNDICE E (Figura E 4, Figura E 5 e Figura E 6).

6.3 Sistema de áudio instalado

A concepção do sistema atualmente instalado, segundo relatos do técnico responsável pela parte eletroeletrônica do auditório, foi baseado na idéia “de que não se deve instalar um sistema de áudio configurado para eventos artísticos, porque nossa experiência mostra que bandas e conjuntos musicais exigem potências elevadas e sonorização feita por equipamentos definidos e programados especificamente pela produção do evento. Dessa forma, o sistema existente foi concebido de modo a responder, por um longo período, às necessidades de sonorização em atividades e solenidades em geral, onde há discursos e/ou falas, como formaturas, congressos, seminários, encontros e outros eventos, bem como possibilitar a sonorização ambiental, gravações e reproduções.”

Os equipamentos de áudio atualmente instalados no auditório são os seguintes:

- 02 Amplificadores marca Staner, modelo 200M;
- 01 Console marca Yamaha, modelo MX 12/4;
- 01 *Double Cassette-Deck*, marca Pioneer, modelo CT-W503R;
- 01 *Compact Disc Player*, marca Teac, modelo CD-P1100;

- 02 conjuntos de caixas acústicas (PA) marca Teleson, composto cada um por duas caixas acústica de 3 vias com *crossover* interno, impedância de 8Ω e potência de 200W RMS, dispostas em paralelo duas a duas.
- 04 Microfones dinâmicos marca LeSon, modelo SM58
- 01 Microfone sem fio, marca LeSon/Nadi.

A seguir, segue uma descrição rápida a respeito das instalações e montagem do sistema de áudio:

- A cabine de som, onde é feita a operação do sistema e onde se encontram instalados os equipamentos, está afastada do palco de aproximadamente 40 metros.
- A alimentação AC (tensão alternada) dos equipamentos na cabine é feita por meio de filtros de linha, através de um circuito AC com proteção via disjuntor de 15A, com a caixa de distribuição localizada na cabine;
- A transmissão do sinal de áudio de potência para as caixas acústicas é feita através de cabos flexíveis tipo PP, 2 X 6mm²;
- Os dois conjuntos de PAs (*public address*) estão instalados nas regiões laterais do pró-cenium. Na região frontal direita do palco, atrás do PA direito, estão localizadas quatro conexões para microfones do tipo *Canon* (XLR);
- O sinal dos microfones do palco é transmitido à cabine por meio de cabos balanceados, emborrachado flexível, marca IFE, 2 x 22 AWG;
- No palco, os microfones possuem cabos balanceados, emborrachado flexível, marca IFE, 2 x 22 AWG nos tamanhos de 5 e 10m;
- O microfone sem fio tem sua base de recepção instalada na cabine de som;
- Existe dois canais para caixas de retorno no palco, com conexão tipo *Canon*, atrás do PA direito, que utilizam fio paralelo de 2 x 4mm².

6.4 Equipamentos de medida

Os equipamentos utilizados nas medições são os seguintes:

- 01 Sono-metro, marca Simpson, modelo 886-2;
- 01 Placa de áudio, marca M-Áudio, modelo Delta44;

- 01 Micro computador com a seguinte configuração: Processador AMD Duron 650MHz, Placa Mãe Asus A7V, 128Mb de memória RAM, HD UDMA 20Gb de acesso rápido (7200 RPM);
- 01 *Direct Box*, marca Behringer, modelo UltraDI;
- 02 cabos P10/P10 marca Santo Ângelo de 3m cada;
- 08 cabos flexíveis balanceados (XLR) de 5m cada.

Para as medições de resposta impulsiva é utilizada a saída EXT. do sono-metro que, dessa forma, passa a funcionar como um microfone condensador omnidirecional de “resposta plana”.

6.5 Programas utilizados

Tendo em vista a praticidade, confiabilidade e disponibilidade, utilizou-se os programas listados abaixo na realização e no processamento das medições descritas neste capítulo, de acordo com a sua função:

- *Cool Edit Pro* versão 2.0 (*shareware*) – Reprodução e gravação de áudio, sonograma, edição de áudio;
- *Aurora* (*plug-in shareware*) – Geração dos sinais de excitação (log sinesweep, mls, etc.), convolução, deconvolução, parâmetros acústicos.
- *HPVee* – Tratamento de sinais, operações matemáticas (FFT, média movel, etc.), gráficos.

Os dois primeiros programas desta lista são de ampla utilização comercial e correspondem aos programas utilizados por Farina, 2000.

Os parâmetros acústicos fornecidos pelo programa Aurora estando de acordo com a norma ISO 3382 que fornece recomendações para avaliação da qualidade acústica de ambientes [Gomes, 1998].

6.6 Concepção e procedimento de medição

A concepção do procedimento de medida baseia-se no fato de que um sistema qualquer responde a um determinado sinal de excitação conforme as suas propriedades intrínsecas, alterando, ou não, as características originais deste sinal. Se existir diferentes dispositivos no

percurso deste sinal, cada dispositivo pode ser considerado um sistema em separado que, quando encadeados, forma o sistema como um todo. A resposta deste último pode então ser modelada através de um processo de filtragem onde o sinal de entrada é modificado pelos diversos filtros existentes na cadeia, representados por suas funções de transferência.

A Figura 6.1 apresenta um diagrama em blocos dos sistemas envolvidos no trajeto do sinal de áudio do Salão de Atos da UFRGS, desde a sua entrada na mesa de som até a saída numa determinada posição na platéia,.

Este processo de filtragem no Salão de Atos, conforme Fielder, 2003, mostra para um outro sistema, é dado pela seguinte equação:

$$y(t) = x(t) \otimes c(t) \otimes a(t) \otimes ca(t) \otimes pa(t) \otimes ps(t) \quad (115)$$

sendo t o tempo, [s];

$y(t)$ é o sinal reproduzido;

$x(t)$ é o sinal de entrada;

$c(t)$, $a(t)$, $ca(t)$, $pa(t)$, $ps(t)$ são as respostas impulsivas do console, do amplificador, do cabeamento, das caixas de som (PA) e de uma determinada posição na platéia, respectivamente.

Este processo também pode ser analisado no âmbito espectral, aplicando-se a transformada de Fourier nas funções da equação (115); no domínio frequência, o processo de filtragem é uma simples relação de multiplicação.

$$Y(K) = X(K) \cdot C(K) \cdot A(K) \cdot CA(K) \cdot PA(K) \cdot PS(K) \quad (116)$$

sendo k valores em frequência.

Quando os blocos são selecionados para serem uma potência de 2, a transformada de Fourier pode ser substituída por uma implementação mais eficiente chamada transformada rápida de Fourier (FFT).

O objetivo deste procedimento de medida é, então, analisar cada parte do sistema eletroacústico existente no ambiente em questão, nos domínios do tempo e da frequência, para que seja possível identificar quais dispositivos e de que forma eles alteram o sinal original. Em

conseqüência disto, as medições realizadas neste trabalho são montadas em função do modo com que cada dispositivo é utilizado no seu cotidiano.

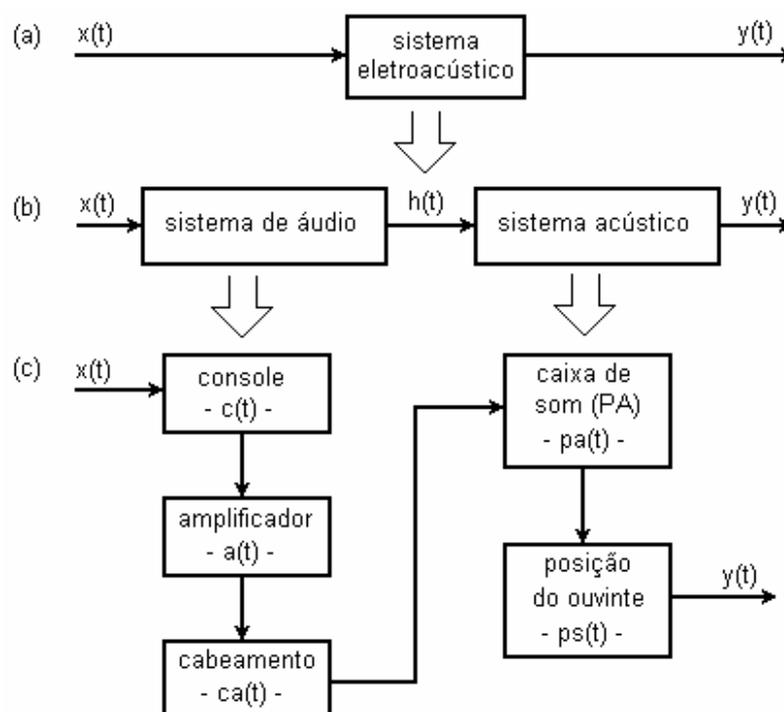


Figura 6.1 – Diagrama em blocos do sistema eletroacústico existente no Salão de Atos da UFRGS.

6.7 Calibragem do Sistema

Antes de serem efetuadas as medições, foram feitos três testes no sistema de medição para verificar sua influência nas demais respostas, utilizando a técnica de varredura logarítmica de seno. No primeiro teste, foi levantada a resposta em frequência da placa conectando sua entrada com a saída através com um cabo de 3m (P10/P10) enquanto que no segundo teste foi introduzido o *Direct Box* (DI) e mais um cabo (P10 estéreo/XLR) de 3m no circuito. Os dispositivos deste segundo teste são utilizados na medição do amplificador. As respostas podem ser vistas, respectivamente, na Figura 6.2 e na Figura 6.3.

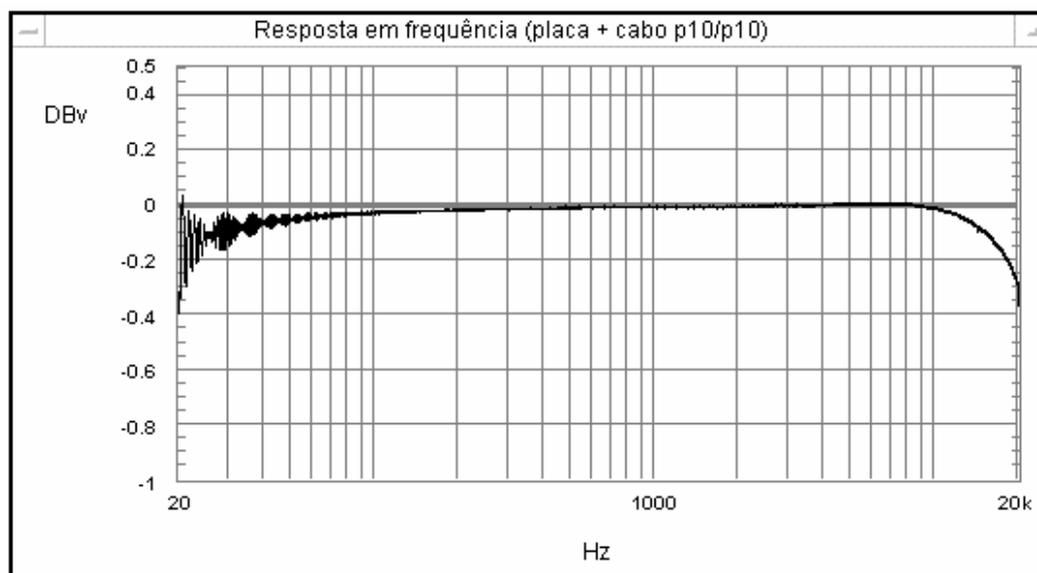


Figura 6.2 – Curva de resposta em frequência da placa de áudio com sua entrada ligada à saída através de um cabo P10/P10 de 3m.

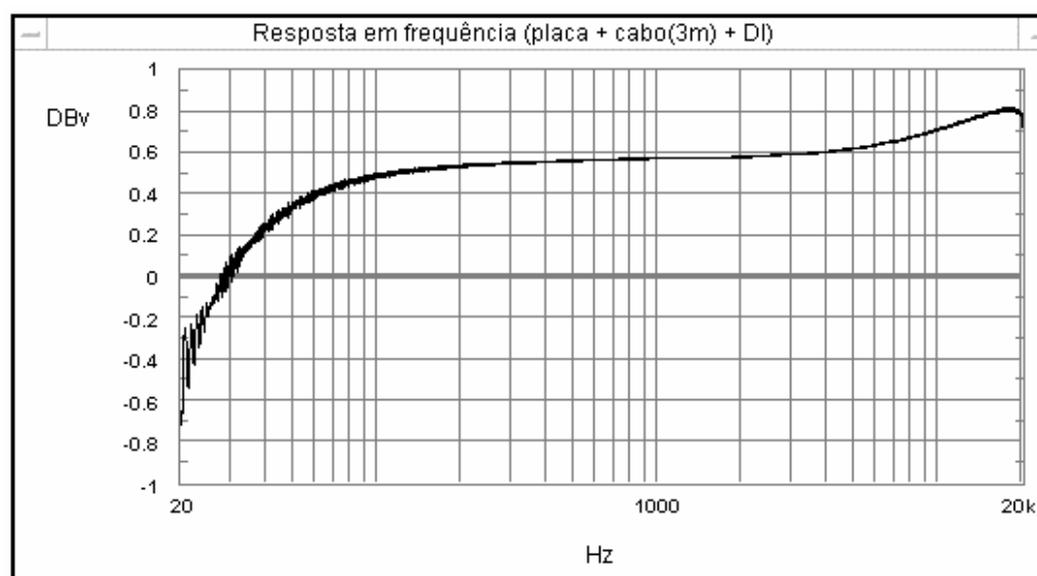


Figura 6.3 – Curva de resposta em frequência da placa de áudio com o Direct Box conectado entre a sua entrada e sua saída. A entrada conecta o DI através de um cabo P10estéreo/XLR e a saída conecta o DI através de um cabo P10/P10.

No terceiro teste, no lugar do cabo de 3m (P10/P10), foi conectado os 8 cabos XLR de 5m ligados entre si, totalizando 40m de extensão de cabo. Essa montagem é utilizada para medir a resposta nas diversas posições na platéia. A Figura 6.4 mostra o resultado da resposta em frequência desta montagem.

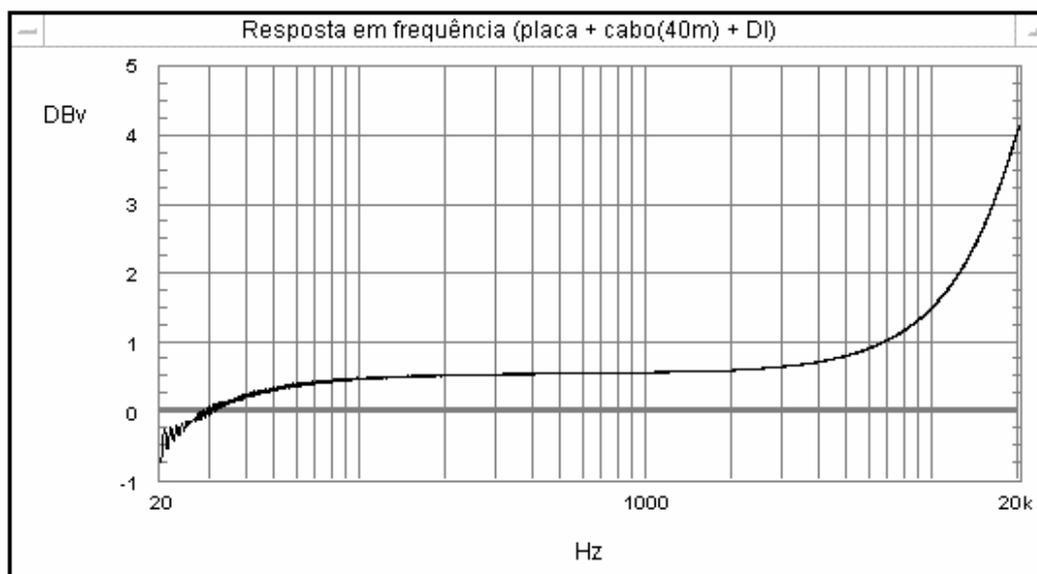


Figura 6.4 - Resposta em frequência do sistema composto pela placa de áudio mais 8 cabos XLR/XLR de 5m cada e mais o Direct Box

Após a análise dos gráficos, fez-se algumas considerações a respeito do sistema de medição:

- A resposta da placa foi considerada plana entre 20 e 20KHz pois sua variação de amplitude é menor de 0,5db (conforme fabricante) nesta faixa, mesmo conectada a um cabo desbalanceado de 3m (P10/P10).
- O ganho acima de 0dB nas respostas dos segundo e terceiro testes, representados pelas Figuras Figura 6.2 e Figura 6.3, foi considerado como sendo algum tipo de ruído proveniente dos dispositivos em questão, como interferência de RF nos cabos e/ou algum tipo de ressonância eletromagnética como também ruídos provocados pelas conexões entre cabos.

Foi verificado posteriormente a realização das medições que o cabo (P10 estéreo/XLR) não foi corretamente construído, estando o mesmo na condição de desbalanceado o que, sem dúvida, contribuiu para o aumento do ruído no sistema e, de uma forma mais significativa, quando utilizado a montagem com os cabos na extensão de 40m. Este acréscimo de ruído pode ser observado na Figura 6.4 através do aumento de aproximadamente 3dB, entre 7KHz e 20KHz.

A partir destes resultados, foi elaborada uma curva de calibragem para os segundo e terceiro testes, apresentadas na Figura 6.5.

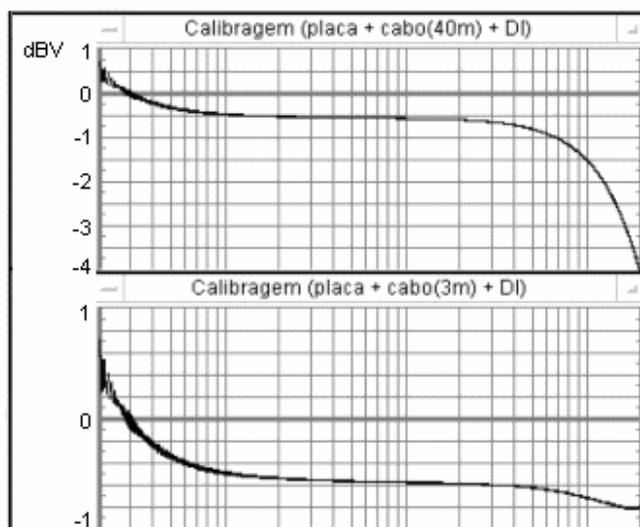


Figura 6.5 - Curvas de calibragem para os experimentos que utilizam a (acima) placa de áudio + cabos (40m) + DI e a (abaixo) placa + cabo (3m) + DI.

Nos testes acima, foi utilizado como sinal de excitação uma varredura de seno de 10Hz a 22KHz, com duração de 10s, -6dBV de amplitude relativa, taxa de amostragem de 44.1KHz/32bits (ponto flutuante) com gravação em 24bits.

6.8 Análise do Console

Para medir a resposta em frequência do console foi gerado um sinal de varredura de seno de 10Hz a 22KHz, 10s, -3dBV, 44.1KHz/32bits e este foi inserido, através de cabo não balanceados P10/P10, no canal 1 do console com todos os controles de equalização/pan/efeitos na posição neutra. Foi ajustado o ganho de entrada do canal de forma que, com o seu *Knob* na posição de 0db, a saída (LEDs) acusasse -3dBV. Da saída do *master*, a partir do canal esquerdo (L), outro cabo não balanceado XLR/P10 fez a conexão com a entrada da placa. Esta montagem pode ser vista no esquemático da Figura 6.6.

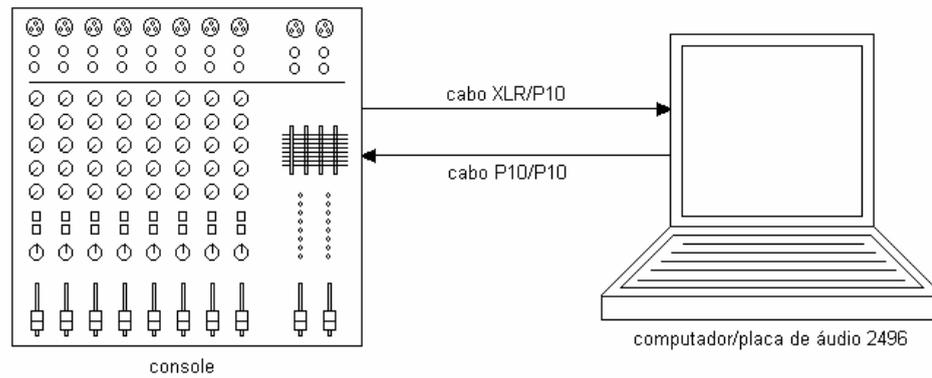


Figura 6.6 - Esquemático da montagem do sistema de medição para a análise da console.

As Figuras Figura 6.7 e Figura 6.8, mostram o sinal no tempo (acima) e o sonograma (abaixo) do sinal de excitação (varredura) e da resposta (console), respectivamente.

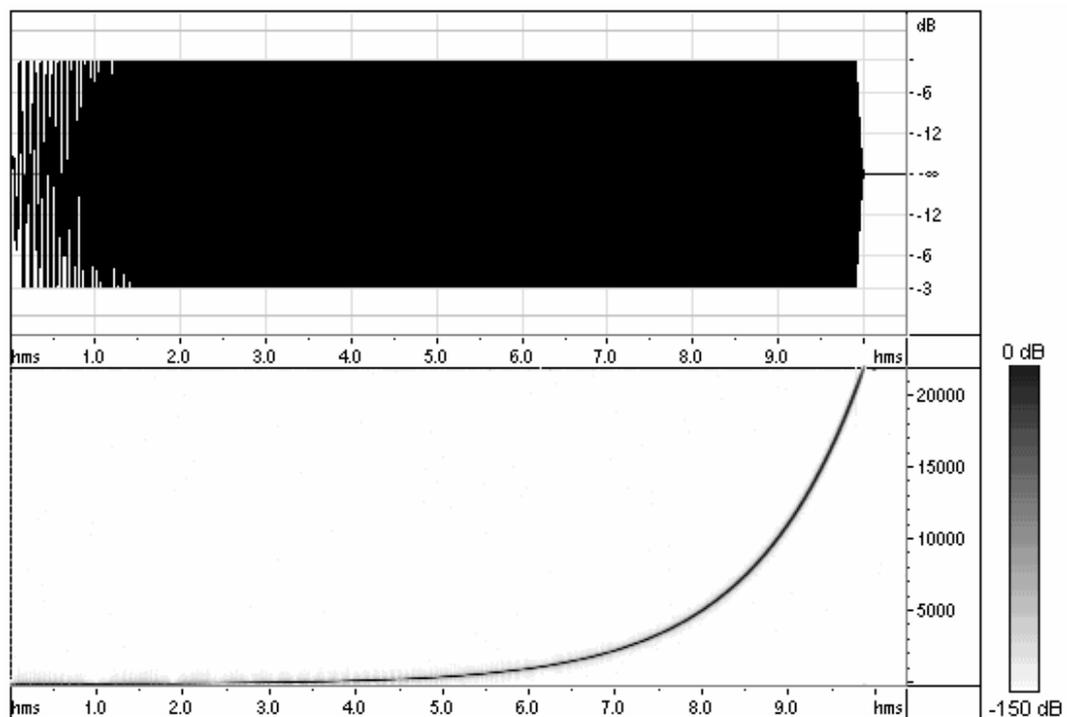


Figura 6.7 - Gráfico do sinal de excitação (acima) em função do tempo e (abaixo) o sonograma..

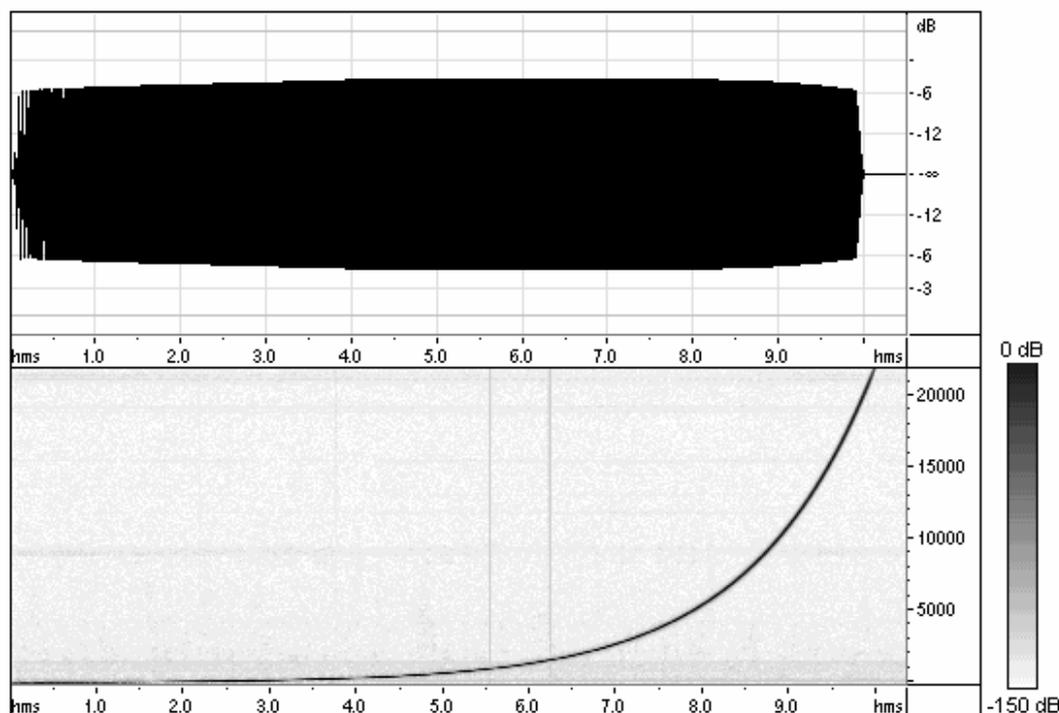


Figura 6.8 - Gráfico da resposta da console (acima) em função do tempo e (abaixo) o sonograma.

Na Figura 6.9 é mostrado o gráfico da amplitude relativa versus a frequência dos sinais de excitação e resposta da console quando esta é submetida àquele sinal. É possível observar que este sinal de varredura de seno possui um aspecto “rosa”, isto é, apresenta uma ênfase em baixas frequências que vai decrescendo com o avanço da mesma, conforme apresentado em capítulo anterior. De acordo com a equação (116), chega-se ao gráfico da resposta em frequência do console, mostrado na Figura 6.10. Neste gráfico, o autor entendeu não ser necessário realizar nenhum tipo de calibração pois o esquema de medição do console assemelha-se ao esquema de medição da placa, cujo resultado desta medição (ver Figura 6.2) não altera significativamente a resposta do sinal, consideração esta já feita anteriormente.

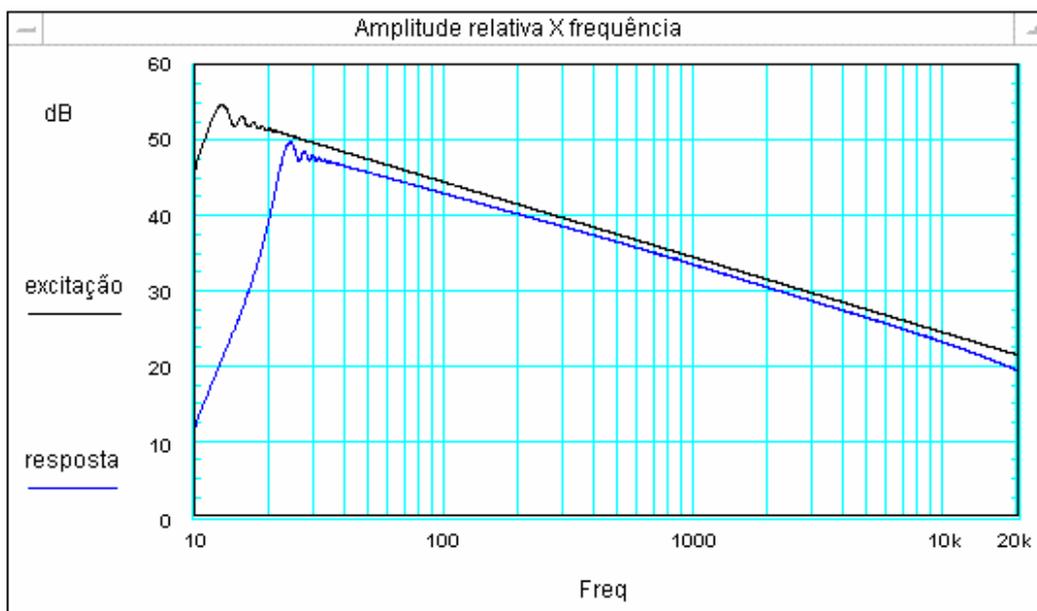


Figura 6.9 - Gráfico da amplitude relativa versus frequência dos sinais de excitação (varredura) e resposta (console).

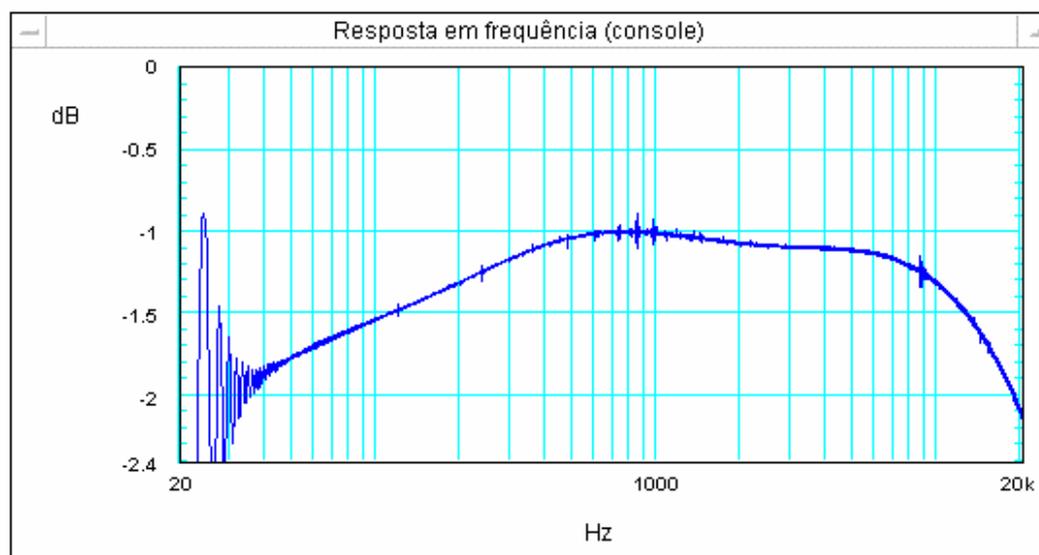


Figura 6.10 - Gráfico da resposta em frequência (ganho) da console.

Do gráfico da Figura 6.10, observa-se que a resposta deste dispositivo nesta montagem é bastante plana, com variação menor que 1,5dB na faixa de 20Hz a 20KHz e encontra-se dentro da especificação do fabricante que é de -2dB a $+4\text{dB}$ na mesma faixa. O ganho de -1dB (deslocamento do gráfico no eixo vertical) é, possivelmente, devido a imprecisão do posicionamento do *Knob* do canal na posição neutra (0dB) ou da leitura dos *LEDs* na saída do

Master, que serviu de referência de amplitude para o sinal de saída, o que, por sua vez, não deve alterar o conteúdo harmônico do sinal.

Nota-se, ainda, a influência do equalizador do canal quando se observa as pequenas flutuações na resposta em frequência que ocorrem justamente nas frequências de corte dos filtros deste equalizador, como mostra o manual do fabricante (APÊNDICE C).

A baixa distorção harmônica total (THD) da console; $< 0.1\%$ a $+14\text{dB}$ para a faixa de 20Hz a 20KHz, é verificada ao se analisar qualitativamente o sonograma da Figura 6.8 onde se observa apenas a curva logarítmica proveniente da varredura de seno sem nenhuma outra curva adjacente. A existência de uma ou mais curvas adjacentes àquela curva é um indicativo da presença de distorção harmônica no sinal.

A relação sinal/ruído (SNR) para esta medição ficou em torno de 66dB, bem próximo dos 68dB descritos no manual (APÊNDICE B). Este parâmetro também pode ser qualitativamente visualizado na Figura 6.8 através do contraste de tom entre a curva logarítmica e o ruído aleatório que preenche a maior parte do gráfico.

Deve-se levar em consideração, nesta medição, que a saída *master L* de onde o sinal foi “retirado” é inserida diretamente na entrada *AMP IN* do amplificador, nas condições normais de uso no recinto. Como a impedância na entrada *AMP IN* e a da placa de som são elevadíssimas ($> 10\text{K}\Omega$) a condições de impedância neste teste chegaram bem próximas às condições de uso normal.

6.8.1 Taxa de amostragem de gravação - um breve comentário.

Inicialmente, as gravações das respostas da console foram feitas com a taxa de amostragem de 96KHz/24bits. No sonograma da Figura 6.8, observa-se a presença de duas linhas verticais paralelas nos tempos de 5.5s e 6.3s aproximadamente. Estas linhas indicam a presença de sinais impulsivos, ou “clicks”, captados pela placa de som. O fabricante da placa escreve que, em gravações com alta taxa de amostragem é possível o surgimento destes “clicks”, problema que é solucionado com o aumento da latência da placa, isto é, aumento do tamanho do *Buffer* de DMA (*Direct Memory Access*). Ajustou-se, então, a latência da placa para o seu valor máximo (2688 amostras) e o problema persistiu. Foi decidido, a partir deste resultado, reduzir a taxa de amostragem da gravação para 44.1KHz, resolvendo o problema dos “clicks”.

Essa redução de 96KHz para 44.1Khz diminui a qualidade do áudio em altas frequências fazendo com que os dados que se encontram nesta faixa sejam menos confiáveis. Entretanto, este problema ainda é preferível ao surgimento dos “clicks” pois estes alterariam significativamente o conteúdo harmônico do sinal. Em contrapartida, esta taxa de amostragem é geralmente utilizada nos trabalhos encontrados na bibliografia [Archambeau et. al., 2002, Gomes, 1998, Guimarães et. al., 2002, Farina, 2000], quando as avaliações são feitas na faixa de áudio (20Hz – 20KHz).

Posteriormente, verificou-se que o programa de gravação/reprodução tem seu próprio ajuste de tamanho de *buffer* o que, combinado com o ajuste do *buffer* da placa, poderia ter contornado o problema dos “clicks”.

6.9 Análise do amplificador

Esta análise foi realizada em apenas um dos dois amplificadores existentes no auditório e foi montada segundo o esquemático da Figura 6.11. O sinal de excitação foi inserido na entrada “AMP IN” (ver APÊNDICE C) do amplificador que tem a característica de ser ligada internamente direto na etapa de potência, portanto sem os efeitos do seu equalizador, reproduzindo a forma com que o amplificador é utilizado para eventos. Foram conectadas também, duas caixas com impedância total de 4Ω . O nível do sinal de entrada foi ajustado em -17dBV que apresentou ser o nível máximo suportado pelas caixas sem distorção/clipamento. O DI foi ajustado com desacoplamento de terra (*ground lift*) e atenuação -20dB .

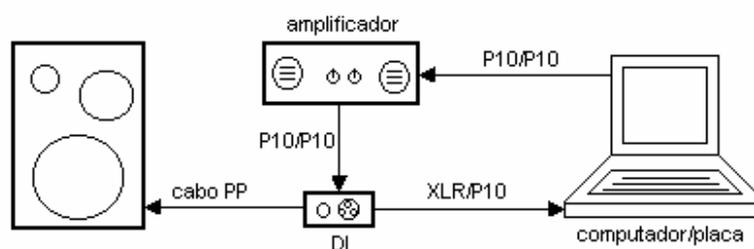


Figura 6.11 - Esquemático da montagem do sistema de medição para a análise da console.

A resposta em frequência do amplificador pode ser visualizada no gráfico da Figura 6.12, curva (b). A curva (a) deste mesmo gráfico mostra a resposta em frequência do amplificador sem a calibração, isto é, com os efeitos dos instrumentos de medida.

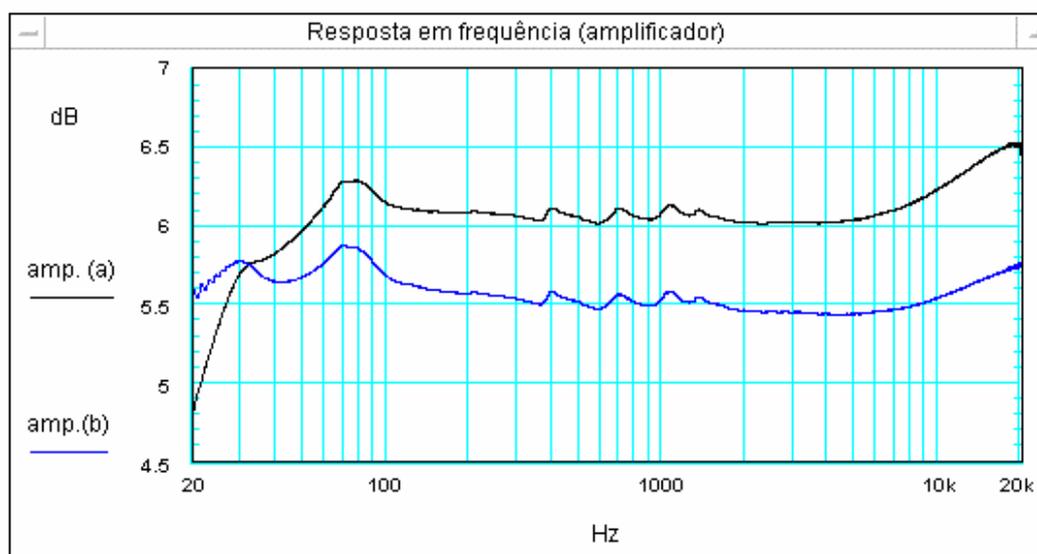


Figura 6.12 - Resposta em frequência do amplificador sem calibração (a) e com calibração (b).

Como pode ser verificado no gráfico acima, a resposta do amplificador é bastante plana, e vem de encontro com os dados do fabricante de variação de $\pm 0,5\text{dB}$ entre 20Hz a 50KHz, quando utilizado somente o amplificador.

Nota-se ainda, que o ganho obtido nesta medição é de aproximadamente 6dB o que, somados aos 20dB atenuados pelo *DI*, mostra que o ganho do amplificador fica em torno de 26dB. A partir deste resultado, pode-se calcular o valor da potência entregue à caixa de som que resulta em aproximadamente 2,0Watts, ou, 3,0dBW.

Também foi medida a taxa de distorção harmônica total (THD) em 1KHz. O gráfico da Figura 6.13 mostra os primeiros harmônicos, indicando o valor (em volts) da fundamental e do primeiro harmônico. Realizando os cálculos, chega-se a um valor de aproximadamente 0,08% de distorção que, conforme Valle, 2003, é um indicativo de baixa *THD*.

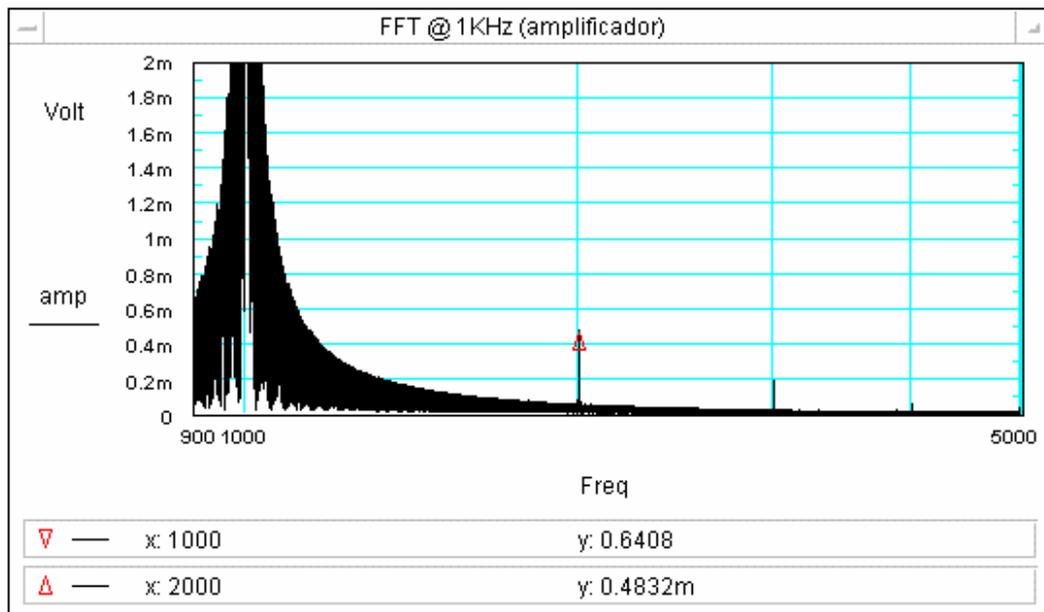


Figura 6.13 - Gráfico da resposta em frequência do amplificador submetido a um sinal de 1KHz para a verificação da taxa de distorção harmônica (THD).

Como resultado da técnica de varredura logarítmica de seno, após o processo de convolução do sinal temos a resposta impulsiva do sinal original (a fundamental) separada, no eixo do tempo, das respostas impulsivas dos harmônicos subsequentes. Em cada umas destas respostas, encontra-se “compactada” a energia do harmônico que se quer avaliar de todas as frequências do sinal de teste.

No gráfico da Figura 6.14, é indicado o conteúdo dos primeiro e segundo harmônicos de todas as frequências do sinal de teste, “compactadas” na sua respectiva resposta impulsiva.

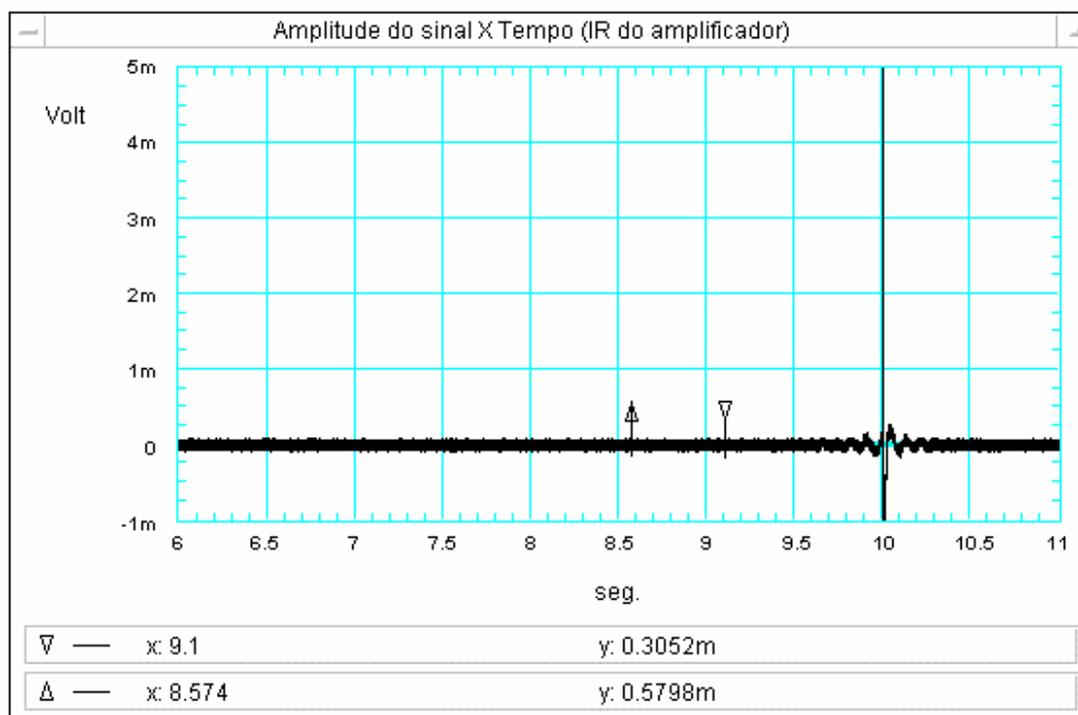


Figura 6.14 - Gráfico da resposta impulsiva em função do tempo. Detalhe para os primeiro e segundo harmônicos que surgem, respectivamente, 0,9s e 1,42s antes da resposta impulsiva sem distorção.

Pode-se avaliar, então, a distorção harmônica total na faixa de frequência testada (10Hz – 22KHz) a partir da amplitude de cada uma destas respostas.

Como resultado, chegou-se ao valor de aproximadamente 0,065% de distorção, valor este um pouco abaixo daquele medido em 1KHz, o que indica que a distorção em outras frequências deva ser menor que na frequência usual de teste.

O tempo de espaçamento entre as diversas respostas dos harmônicos, calculado a partir da equação (113), pode ser observado tanto na Figura 6.14 quanto no sonograma da Figura 6.15.

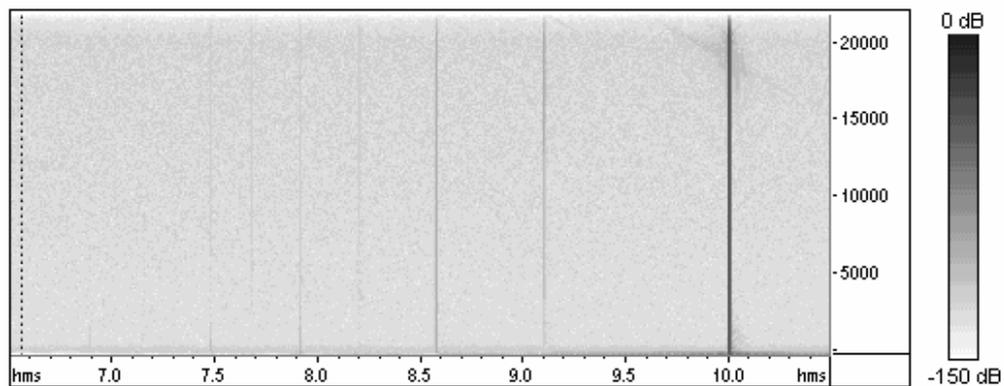


Figura 6.15 – Sonograma da resposta impulsiva do amplificador.

A distorção por intermodulação (IMD) foi calculada baseada no método padronizado pela SMPTE. Como resultado, chegou-se a um valor de *IMD* igual a 0,32%, considerado um pouco acima daquele previsto para este tipo de equipamento [Valle, 2003]. O fabricante não especifica nenhum valor de *IMD* para o seu produto.

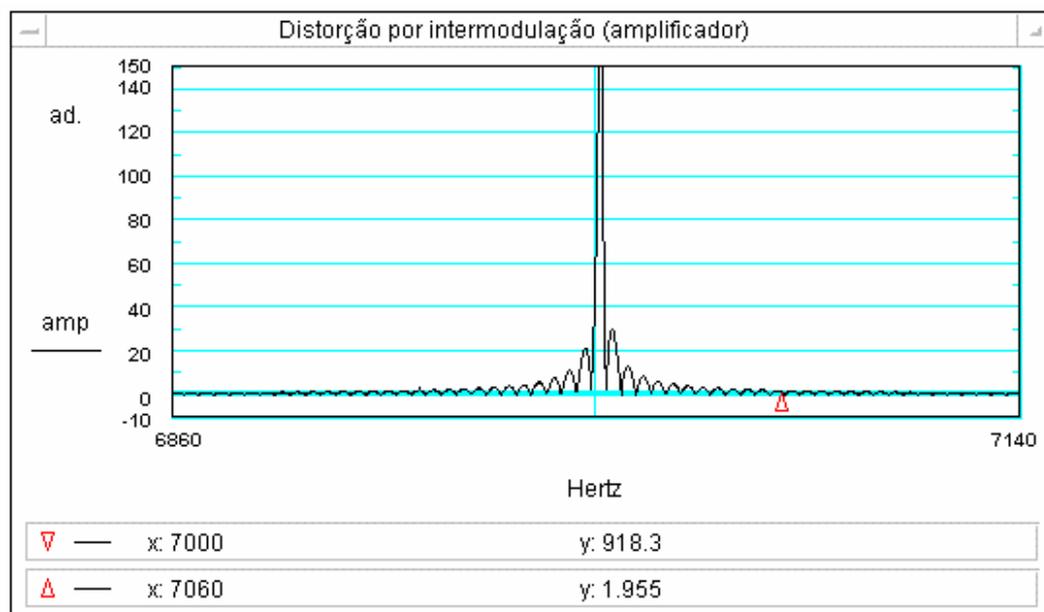


Figura 6.16 - Gráfico da FFT da resposta do amplificador quando submetido a um sinal de 7KHz e 60Hz, mixados numa proporção de 4:1 para avaliação da distorção por intermodulação (IMD).

A Figura 6.16 mostra a amplitude (adimensional) do sinal em 7KHz e a amplitude da amplitude modulada em 7060Hz. Para o cálculo, foi usado a primeira e segunda modulação das duas bandas laterais do sinal de maior frequência.

A relação sinal/ruído existente nesta configuração não foi testada devido a inclusão indispensável do *DI* na cadeia de medição. Nesta caso, o seu ruído interno somar-se-ia ao ruído interno do amplificador, provocando erros na medição.

6.10 Análise do cabeamento

Os cabos que levam o sinal de amplificador de potência até as caixas de som no palco foram testados através de duas montagens onde foi possível isolar os seus efeitos dos demais equipamentos nelas envolvidos. O resultado desta medição pode ser visto na Figura 6.17.

Observa-se, através da análise espectral, que o cabeamento não interfere significativamente no circuito do sinal de áudio.



Figura 6.17 - Gráfico da resposta em frequência dos cabos que levam o sinal de áudio da cabine de som (house mix) até o palco do Salão de Atos.

6.11 Análise das caixas acústicas

Foram realizados testes nos dois conjuntos de caixas acústicas existentes nas extremidades do palco, estando as caixas uma ao lado da outra conforme o posição usual de uso.

Os testes foram executados sobre o palco do salão de atos estando as caixas a serem analisadas montadas em um suporte metálico a uma altura de aproximadamente 1,95m, a partir do seu centro geométrico, conforme o esquemático da Figura 6.18. Dessa maneira, foi assegurado que a superfície refletora mais próxima das caixas fosse o chão. Assim foi possível,

através da análise da resposta impulsiva mostrada na Figura 6.19, separar o som direto das primeira e demais reflexões, isolando os efeitos referentes ao ambiente da resposta espectral das caixas.

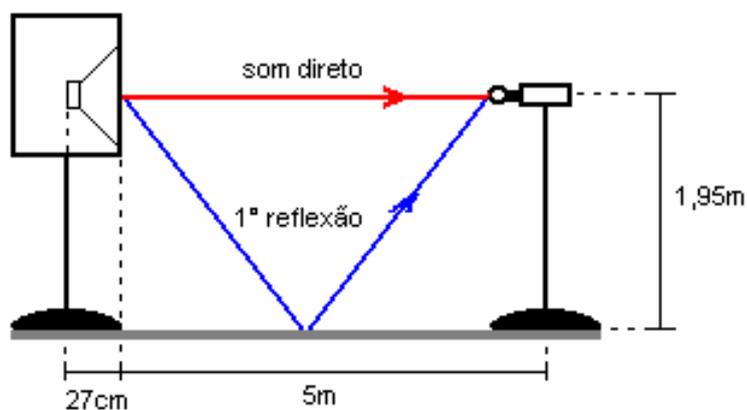


Figura 6.18 – Esquemático da captação do sinal de áudio para a análise das caixas acústicas (cluster).

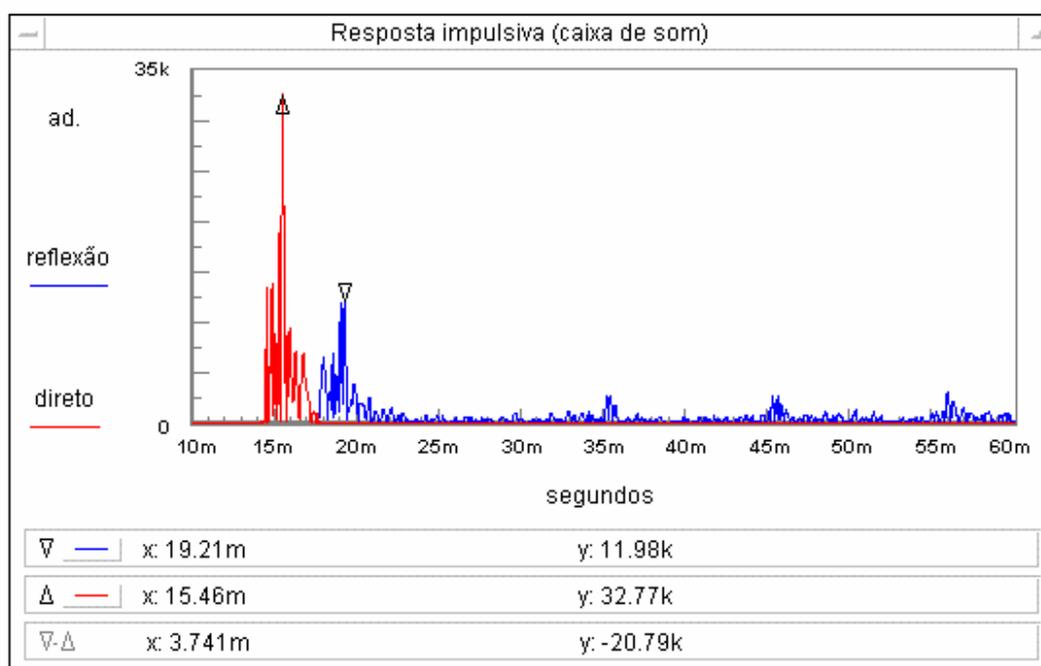


Figura 6.19 - Gráfico, em função do tempo, da resposta impulsiva adquirida na montagem da Figura 6.18. Em vermelho, a parte do sinal referente ao som direto e, em azul, às demais reflexões.

Este procedimento, utilizado em Suzuki et. al., 1994, surgiu como alternativa na ausência de uma câmara anecóica e da impossibilidade de transportar as caixas de som para um campo livre (não reverberante).

Um esquemático da montagem pode ser visualizado na Figura 6.20.

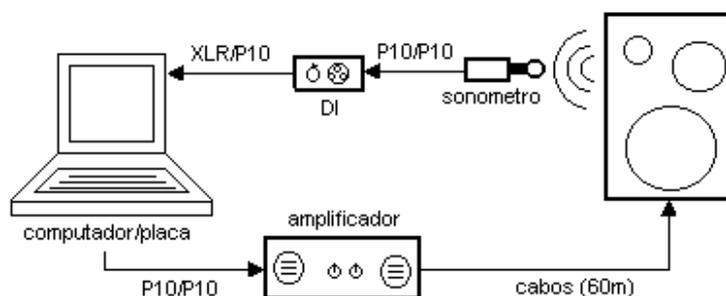


Figura 6.20 - Esquemático da montagem do sistema de medição para a análise do conjunto de caixas acústicas.

Os ajustes do sinal de excitação foram os mesmos daqueles utilizados na medição do amplificador, respeitando o nível de -17dBV de sinal de saída da placa para que não houvesse distorção/clipamento audível nas caixas de som. A resposta espectral do conjunto localizado à esquerda do palco pode ser vista na Figura 6.21.



Figura 6.21 - Gráfico da resposta em frequência do cluster esquerdo (L).

A amplitude relativa do gráfico da Figura 6.21, medida em dB SPL, teve como referência o nível de pressão sonora medido na posição de teste para um sinal de 4KHz com o mesmo nível

do sinal de varredura. A partir de uma média de 4 amostras, chegou-se ao valor de 83,0 dB SPL como referência.

Visualizando os gráficos da Figura 6.21 e da Figura 6.23, pode-se notar que o nível máximo de pressão sonora é atingido em torno das frequências de 700Hz e 1,7KHz o que, fazendo uma média entre as duas caixas acústicas, resulta em aproximadamente 93,0dB SPL.

Com base neste resultado, pode-se estimar a sensibilidade axial do conjunto como sendo aproximadamente 93,0 dB / @ 5,27m / 3,0 dBW ou, 107,0 dB / @5,27m / 0dBW ou ainda, de acordo com os valores preferenciais de distância e potência, 104,0 dB / @ 1m / 0,0 dBW.

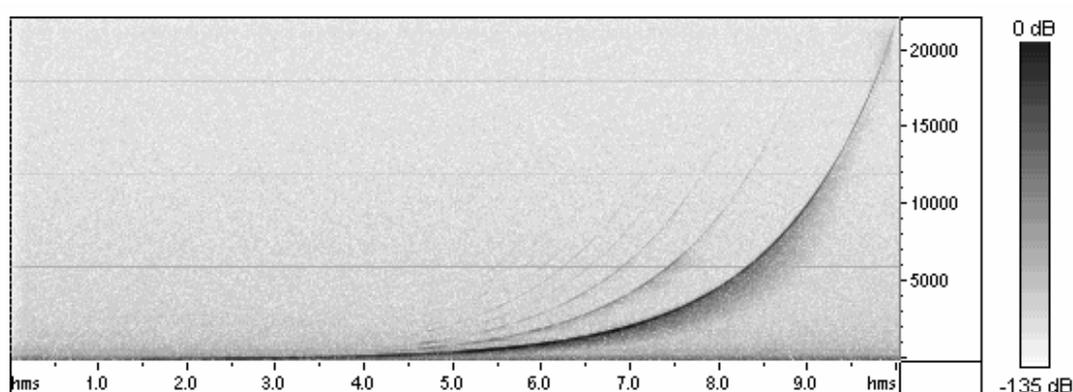


Figura 6.22 – Sonograma da resposta do cluster esquerdo (L).

O gráfico da Figura 6.22 mostra o sonograma do conjunto de caixas da extremidade esquerda do palco.

Pode-se observar no gráfico da Figura 6.22 a existência de 3 linhas paralelas ao eixo do tempo. Foi verificado, através deste e de outros gráficos, que este ruído, composto das frequências de 6KHz (fundamental), 12KHz e 18KHz (harmônicos), é proveniente do sonômetro e/ou da conexão deste com o cabo P10/P10.

Observa-se, também, uma distorção harmônica bem mais acentuada que àquela medida nos outros dispositivos, caracterizada pelas linhas adjacentes à curva logarítmica mais à direita do gráfico. A THD, medida na faixa de 10Hz – 22KHz conforme exposto na item 6.9 é de aproximadamente 1%, 15 vezes maior que a do amplificador. Este resultado vem de encontro ao exposto no item 5.7 onde é discutido a distorção gerada no transdutor eletromecânico devido às não-linearidades inerentes deste sistema.

Da mesma forma que o conjunto de caixas da extremidade esquerda do palco foi ensaiada, o conjunto da extremidade direita também foi. A resposta em frequência deste conjunto de caixas pode ser visto na Figura 6.23.

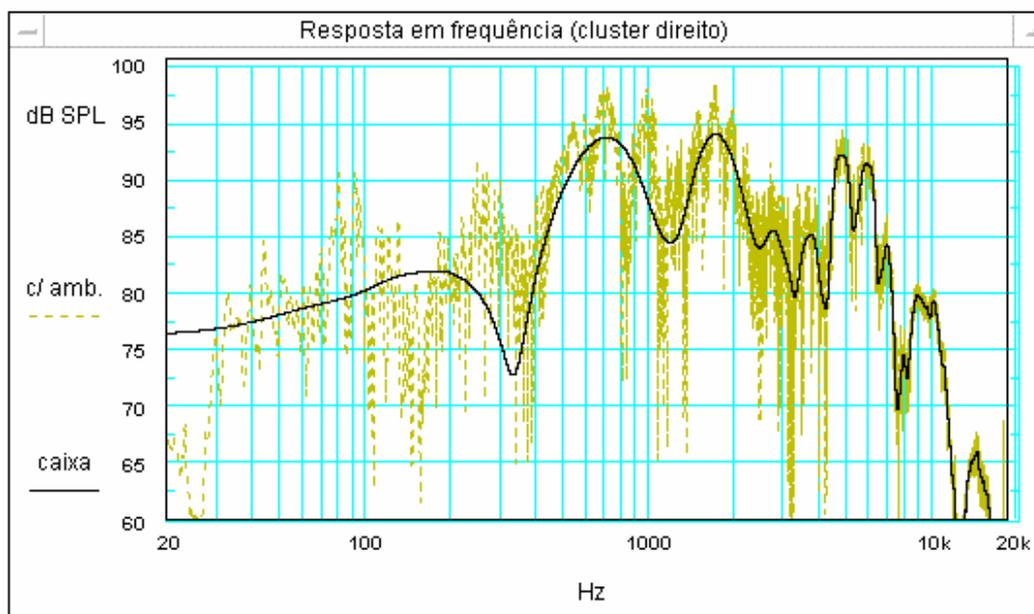


Figura 6.23 – Gráfico da resposta em frequência do cluster direito (R).

Em ambas medições não foram utilizadas as curvas de calibração para correção da resposta em frequência pois a diferença entre a curva calibrada e não calibrada não é significativa.

Observa-se nas curvas das Figuras Figura 6.21 e Figura 6.23 que as respostas das caixas variam muito com a frequência. Ambos conjuntos de caixas têm uma redução de ganho bastante significativo abaixo dos 500Hz e acima dos 7KHz, sendo que atenuação acima dos 10KHz e abaixo dos 40Hz é de aproximadamente 10dB/oitava. Portanto, pode-se afirmar que a resposta em frequência dos *clusters* é de aproximadamente 40Hz – 10KHz.

Os diagramas polares das Figuras Figura 6.24 e Figura 6.25 apresentam o ângulo de cobertura horizontal de uma das caixas do *cluster* direito (R) utilizadas no ambiente.

As medições foram realizadas a uma distância de 1 metro da fonte (caixa acústica), com o sonômetro na altura do seu centro geométrico; aproximadamente 1,95m. A partir de um círculo imaginário inscrito neste plano, foi-se variando a posição do sonômetro em relação ao eixo

normal à caixa (eixo axial) em incrementos de 10° . A partir de 90° , este incremento foi aumentado para 20° .

Os ensaios foram realizados apenas para o quadrante direito e, por simetria, lançados no quadrante esquerdo na elaboração dos gráficos

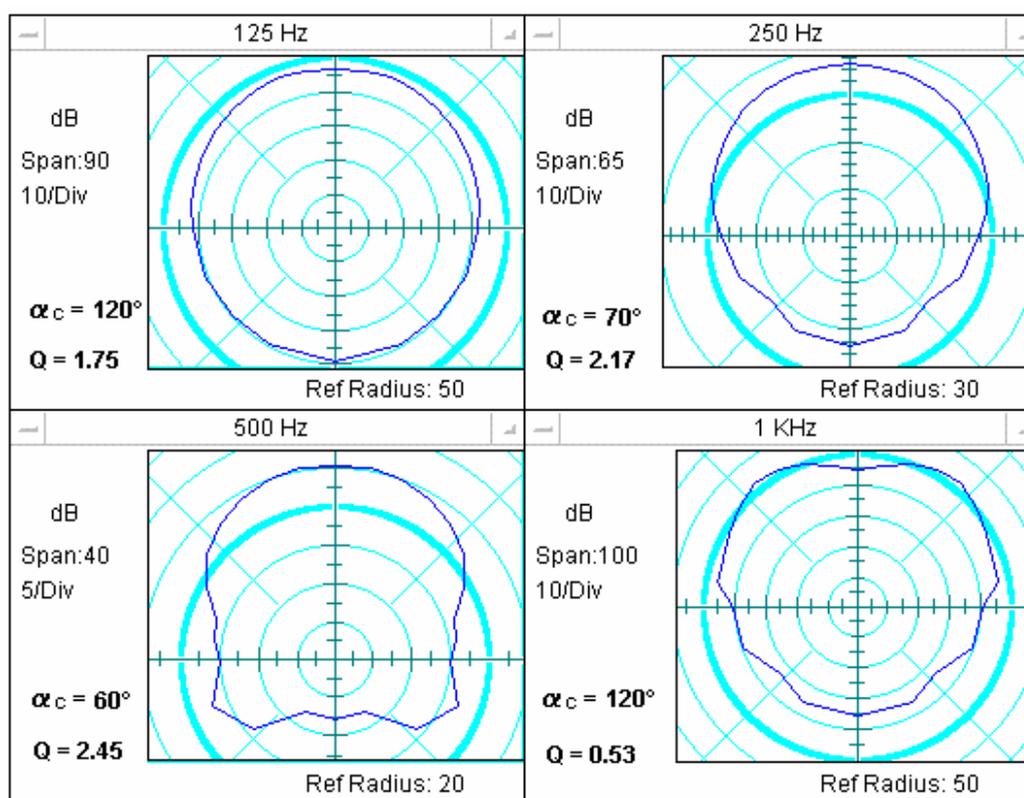


Figura 6.24 - Diagramas de cobertura horizontal para as frequências de 125Hz a 1KHz. α é o ângulo de cobertura e Q a relação de diretividade.

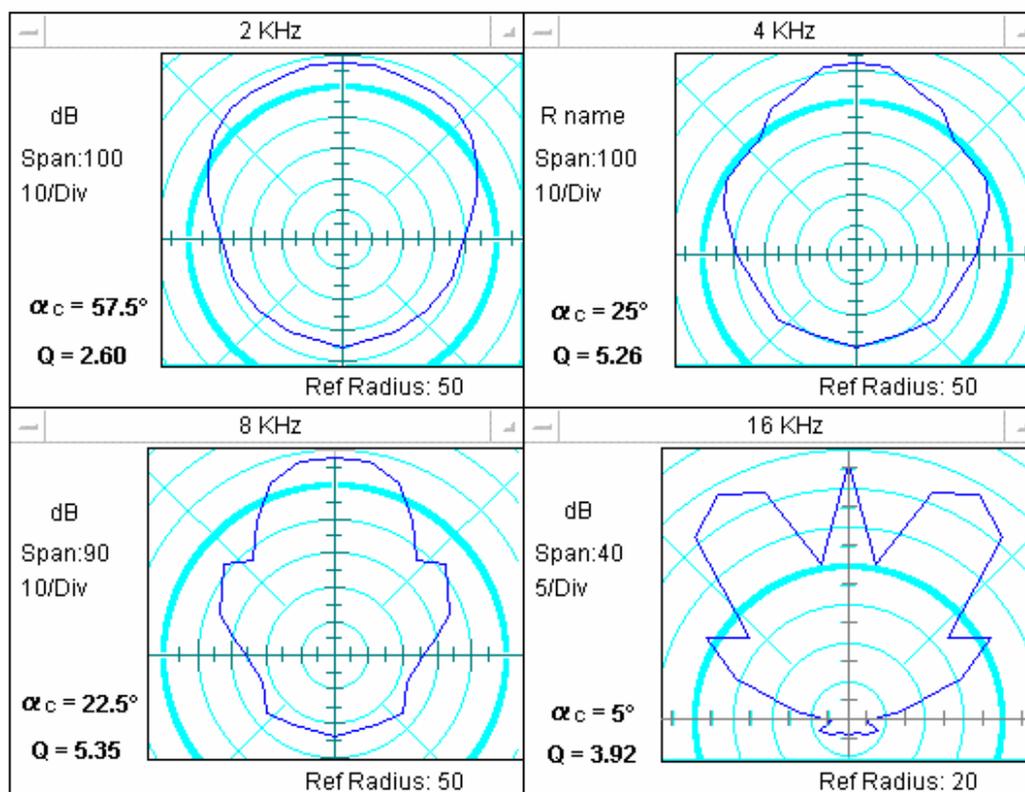


Figura 6.25 - Diagramas de cobertura horizontal para as frequências de 2KHz a 16KHz. α_c é o ângulo de cobertura e Q a relação de diretividade.

Analisando os gráficos, pode-se observar que a fonte torna-se mais direcional à medida que aumenta a frequência. Isto fica mais claro quando se verifica o aumento do parâmetro Q (relação de diretividade) e a redução do ângulo de cobertura (α_c) apresentada nos gráficos.

6.12 Análise acústica do Ambiente

Para esta análise, foram realizadas medições no ambiente com o objetivo de se obter alguns parâmetros de qualidade acústica. As medidas foram tomadas na área da platéia que foi dividida em 11 setores conforme a Figura 6.26. Dentro destes setores, foi escolhida uma posição central representativa de onde foram gravados os sinais de excitação emitidos pelas caixas acústicas existentes nas extremidades do palco.

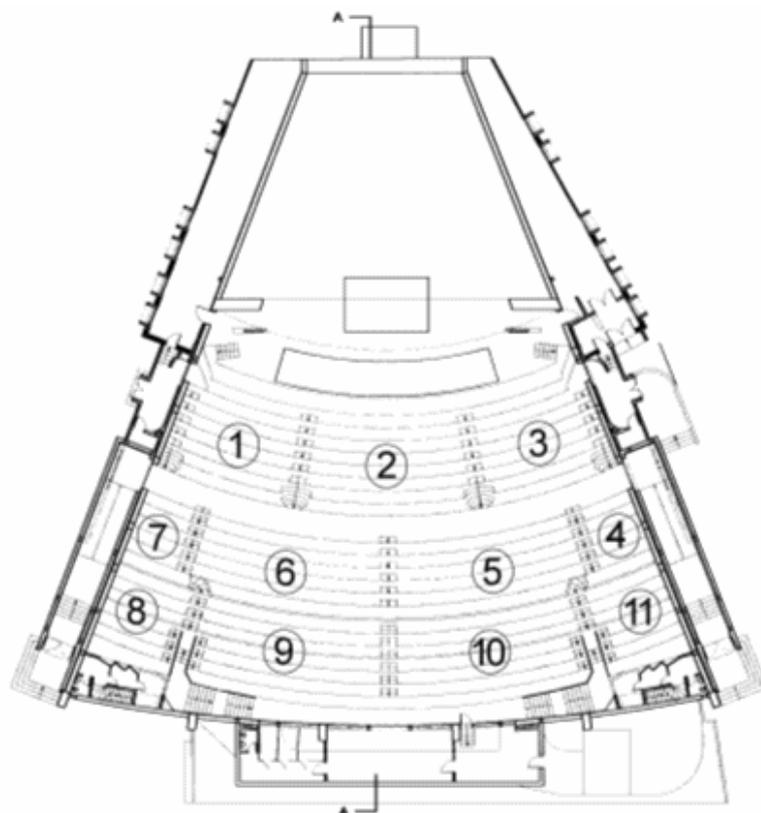


Figura 6.26 – Planta baixa do Salão de Atos da UFRGS. Platéia dividida em setores.

Um esquemático da montagem para a geração e captação do sinal é apresentado na Figura 6.27.

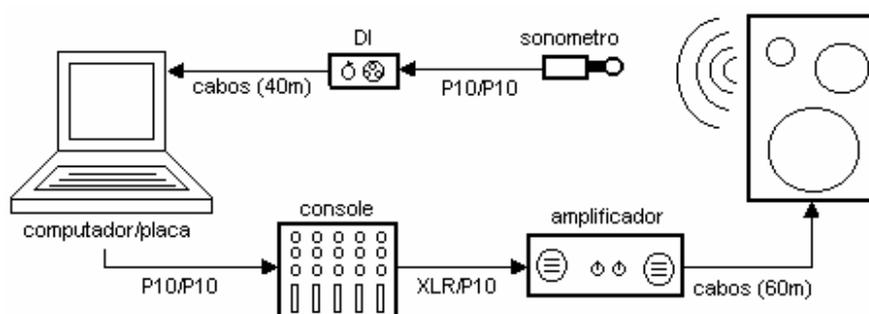


Figura 6.27 – Esquemático da montagem do sistema de medição para a análise acústica em cada posição (setor).

O sonômetro foi colocado a uma altura de 1,20m do chão no lugar de uma cadeira na platéia com o assento retraído. Em cada setor, foi escolhida uma cadeira numa região central, conforme a Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Relação entre as posições de medida (setores) e a numeração das cadeiras.

Setor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fila	E	E	E	N	N	N	N	U	U	U	U
Cadeira	37	01	38	52	20	19	51	55	23	24	56

Nesta análise, foram utilizados dois tipos de sinal de excitação: O *mls* e o *log sine sweep*. Os resultados apresentados neste item referem-se aos sinais obtidos com a técnica de varredura logarítmica de seno. No final desta análise é apresentado um quadro comparativo com os resultados de ambas medições.

O sinal de varredura foi gerado com as seguintes características: Mono, -3dbV, 3 repetições de 10s cada com intervalo de 3s entre elas, 10Hz – 22Khz, 44.1KHz/32bits e gravado nesta mesma taxa de amostragem/bits. O sinal *mls* gerado é de ordem 17 (17A), mono, com 20 repetições totalizando 59,442s.

Para a análise dos parâmetros de qualidade acústica, no caso do sinal de varredura, foi elaborada uma média dos resultados fornecidos pelos três sinais gerados, isto é, das três repetições. Na análise em frequência, apenas o primeiro dos três sinais foi utilizado.

O sinal de varredura foi gravado de três formas: 1) Apenas o *cluster* esquerdo ligado; 2) Apenas o *cluster* direito ligado; 3) Os dois *clusters* ligados. Nos gráficos a seguir, os itens 1, 2 e 3 são indicados por L, R e ST. O sinal *mls* foi adquirido apenas da última forma.

Os controles do console foram colocados nas mesmas posições que no teste do item 6.8. A única diferença ficou por conta do nível de saída (controle *master*) que foi ajustado próximo à -17dBV que, como dito anteriormente, é o nível limite de entrada de sinal no amplificador para que não haja distorção no *cluster*.

Dentre os 11 setores analisados, três foram escolhidos para uma análise mais aprofundada por apresentarem características específicas bem marcantes, quais sejam, os setores 1, 2 e 11.

6.13 Análise do Setor 1

Primeiramente, é traçada a resposta em frequência na posição da cadeira E37 com o sinal de excitação provenientes das caixas esquerda, direita e das duas caixas, respectivamente, como mostra o gráfico da Figura 6.28.

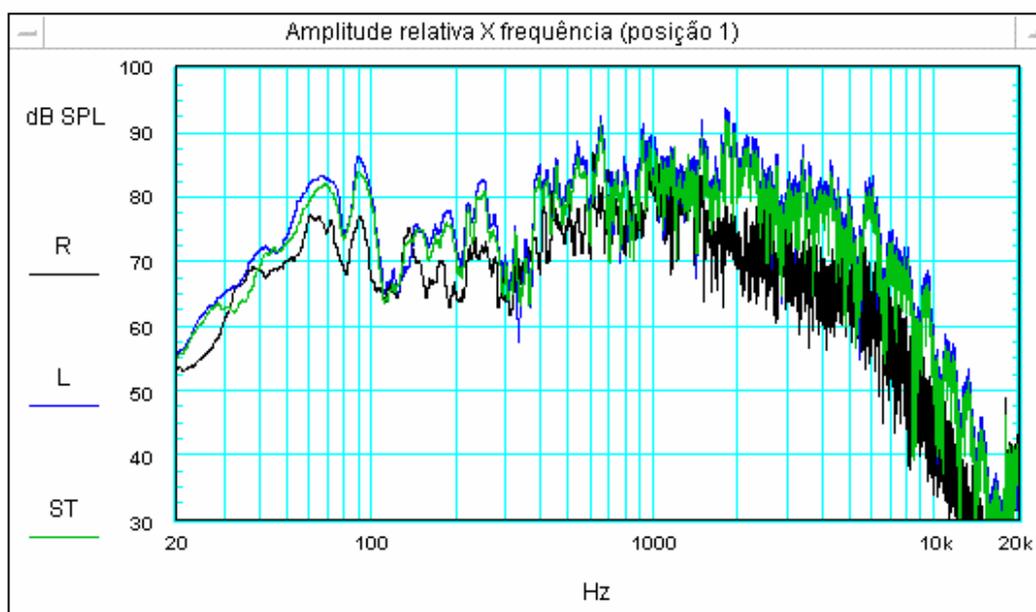


Figura 6.28 - Gráfico da resposta em frequência medida no setor 1 (cadeira 37E). L, R e ST indicam o cluster esquerdo, direito e ambos emitindo o sinal de excitação, respectivamente.

Nota-se, de uma maneira geral, uma deficiência na resposta em baixas e em altas frequências, conseqüência da resposta em frequência das caixas acústicas, com redução de ganho maior ou igual a 10db abaixo de 500Hz e acima de 6KHz.

A resposta referente ao *cluster* direito (curva R) apresenta, como era de se esperar, um nível de sinal de 8 a 12dB (teórico 10dB) menor que a do *cluster* esquerdo (curva L), devido a diferença entre a distância do ponto de tomada do sinal em relação a cada uma das caixas. Acima de 1,5 KHz há um decréscimo adicional de nível, em torno de 5dB. Esta redução pode ser entendida analisando os diagramas polares da caixa de som da Figura 6.24 e Figura 6.25 onde as frequências mais altas tornam-se mais direcionais.

Somado a este, existe o fato de que as altas frequências são mais facilmente absorvidas pelos materiais existentes no ambiente (cortinas, carpetes, poltronas, etc), portanto, chegam no ponto de medição com um nível menor que aquele em baixas frequências. Este efeito pode ser verificado no gráfico da Figura 6.29 que apresenta o “ganho” acústico do ambiente.

O gráfico da Figura 6.29, que apresenta o ganho alcançado na posição 1, é elaborado a partir da subtração, em dB, da resposta do ambiente da resposta da caixa de som referenciada a 1m, no domínio frequência.

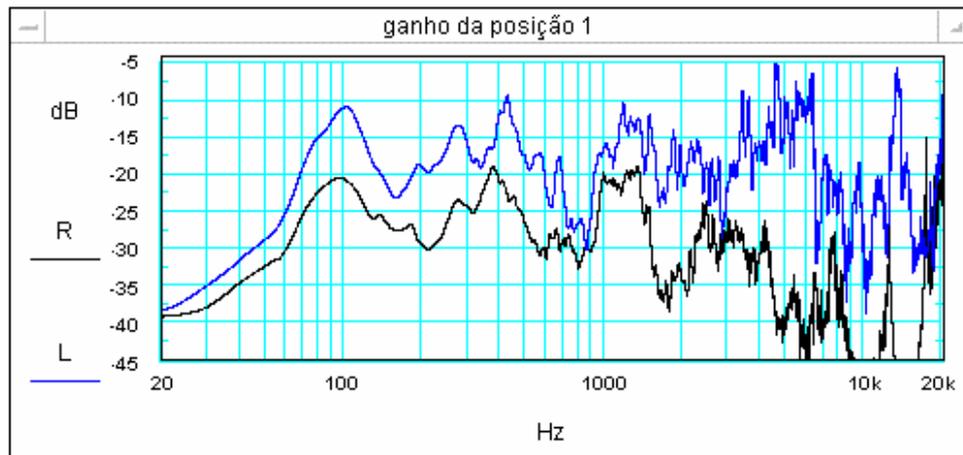


Figura 6.29 – Ganho acústico do setor 1 (cadeira 37E).

A figura (30) abaixo, apresenta a resposta temporal tomadas no setor 1 para as caixas funcionando cada uma separadamente (a) e as duas juntas (b), isto é, os casos L, R e ST.

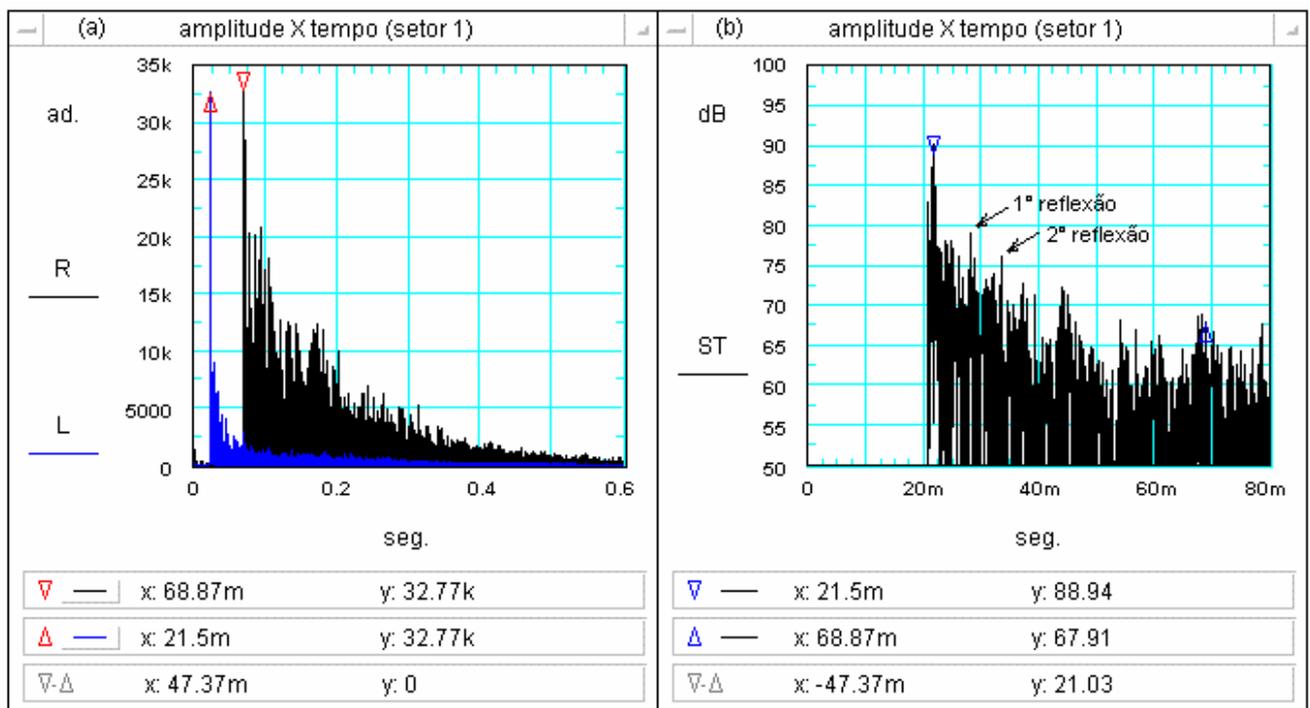


Figura 6.30 - Gráfico da resposta impulsiva medida no setor 1, em função do tempo, para as configurações (a) L, R e (b) ST.

As curvas L e R do gráfico (a) foram normalizadas para uma melhor visualização de cada uma delas.

Observa-se nestes gráficos que a diferença de tempo entre o som vindo da caixa L e da caixa R é de 47,37ms e que a diferença de nível entre estes dois sinais é de 21,03dB. Se for considerado que o sistema de áudio está executando um programa em *estéreo*, onde dois canais executam áudios diferentes, estes valores resultariam numa imagem estéreo muito pobre e, portanto, não desejável. Se, entretanto, o programa é executado em *mono* (fala, instrumento musical separado, fontes mixadas em mono, etc) este resultado, segundo o gráfico da Figura 2.7, resultará numa sensação de espaciosidade, contribuindo para a audição do programa.

Ainda, no gráfico (b), temos a indicação das 1ª e 2ª reflexões, que ocorrem no tempo e com o nível abaixo do nível do som direto de, respectivamente, 6,6ms com 9,85dB a menos e 11,79ms com 12,8dB a menos. Verificando no gráfico da Figura 2.7, estes valores também contribuem para a sensação de espaciosidade da fonte.

Continuando com a análise no domínio tempo, é apresentado na Figura 6.31 abaixo, os gráficos de decaimento da resposta impulsiva para este setor a partir do *cluster* esquerdo (L), filtrada em bandas de 1/10 de oitava.

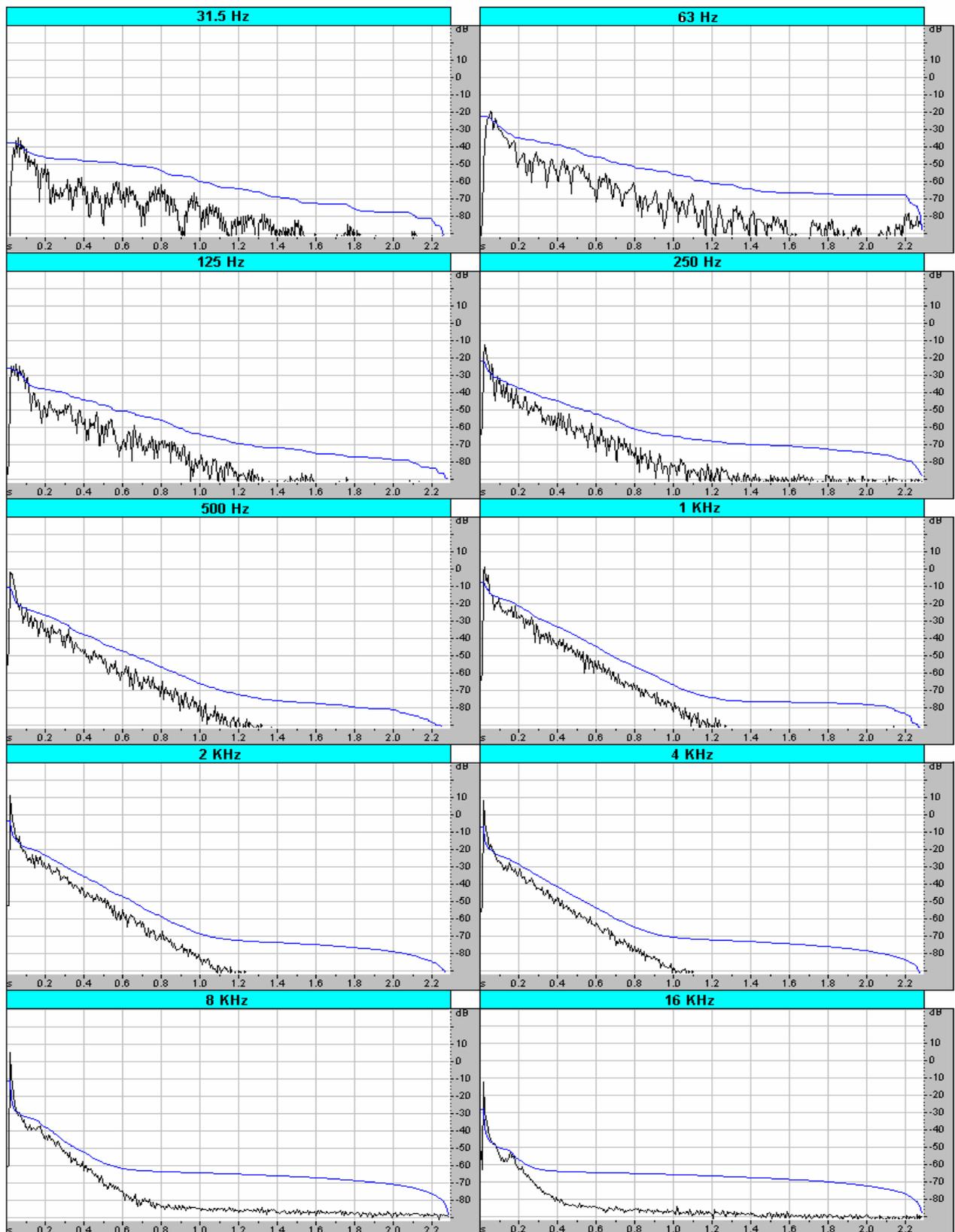


Figura 6.31 – Curvas de decaimento da resposta impulsiva para as bandas de 1/10 de oitava. Em vermelho, a curva quadrática da resposta impulsiva e em azul, a curva de tendência de decaimento.

Então, a partir da análise da resposta impulsiva são calculados alguns parâmetros de qualidade acústica do ambiente. Estes parâmetros são calculados através do programa AURORA e são discutidos em detalhe no final deste capítulo.

6.14 Análise do Setor 2

Como pode ser visto na Figura 6.32 e, de acordo com a Tabela 6.1, o equipamento de medição foi posicionado exatamente no centro da platéia baixa, de frente para o palco, numa posição simétrica entre os dois conjuntos de caixas. Os gráficos a seguir mostram o comportamento acústico do ambiente nesta posição.

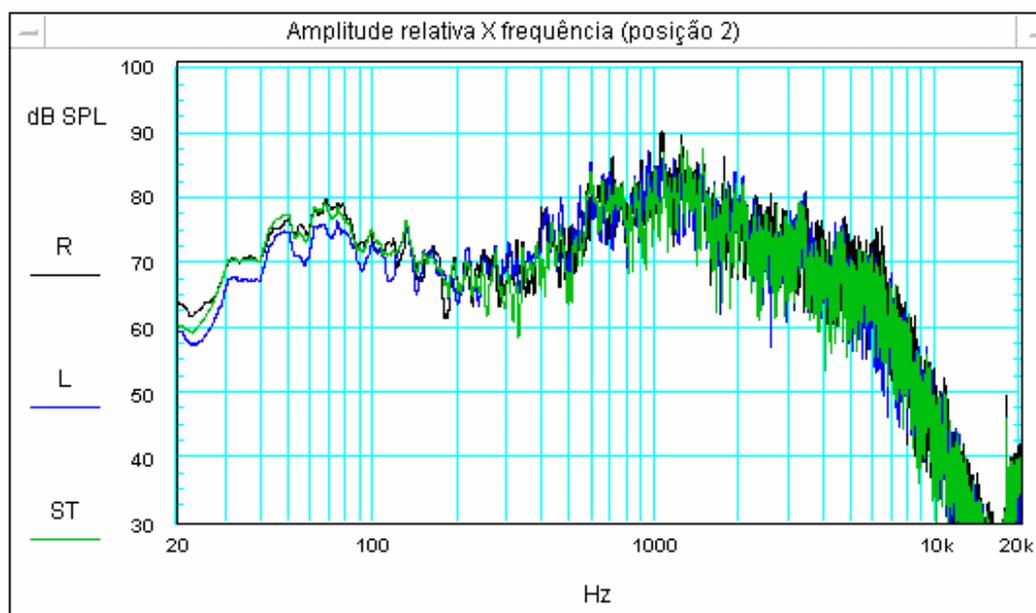


Figura 6.32 - Gráfico da resposta em frequência medida no setor 2 (cadeira 01E). L, R e ST indicam o cluster esquerdo, direito e ambos emitindo o sinal de excitação, respectivamente.

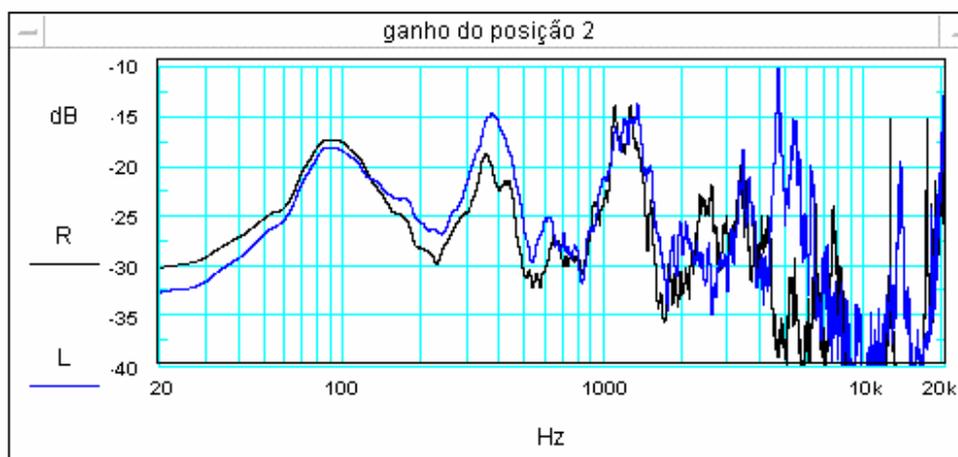


Figura 6.33 – Ganho acústico do setor 2 (cadeira 01E).

Aqui cabe as mesmas considerações feitas a respeito da resposta em frequência do setor 1, isto é, deficiência em baixas frequências (mais acentuadas entre 100 e 500Hz) e em altas frequências (acima de 7KHz). Como era de se esperar, devido à simetria da posição e principalmente devido à omnidirecionalidade das frequências baixas, as curvas de ganho dos conjuntos L e R são praticamente idênticas abaixo de 2 KHz. Ainda, analisando as curvas L e R dos gráficos da Figuras Figura 6.29 e Figura 6.33, observa-se que o ganho resultante no setor 2 é aproximadamente 5dB inferior ao ganho do setor 1, somadas as contribuições de ambos clusters.

O resultado do parâmetro de força, G , apresentado no gráfico da Figura 6.38, confirma esta diferença. Quando as contribuições de ambos clusters em cada setor são somadas, a diferença de G entre os setores é aproximadamente 4dB.

O gráfico da Figura 6.34 mostra a resposta temporal medida no setor 2.

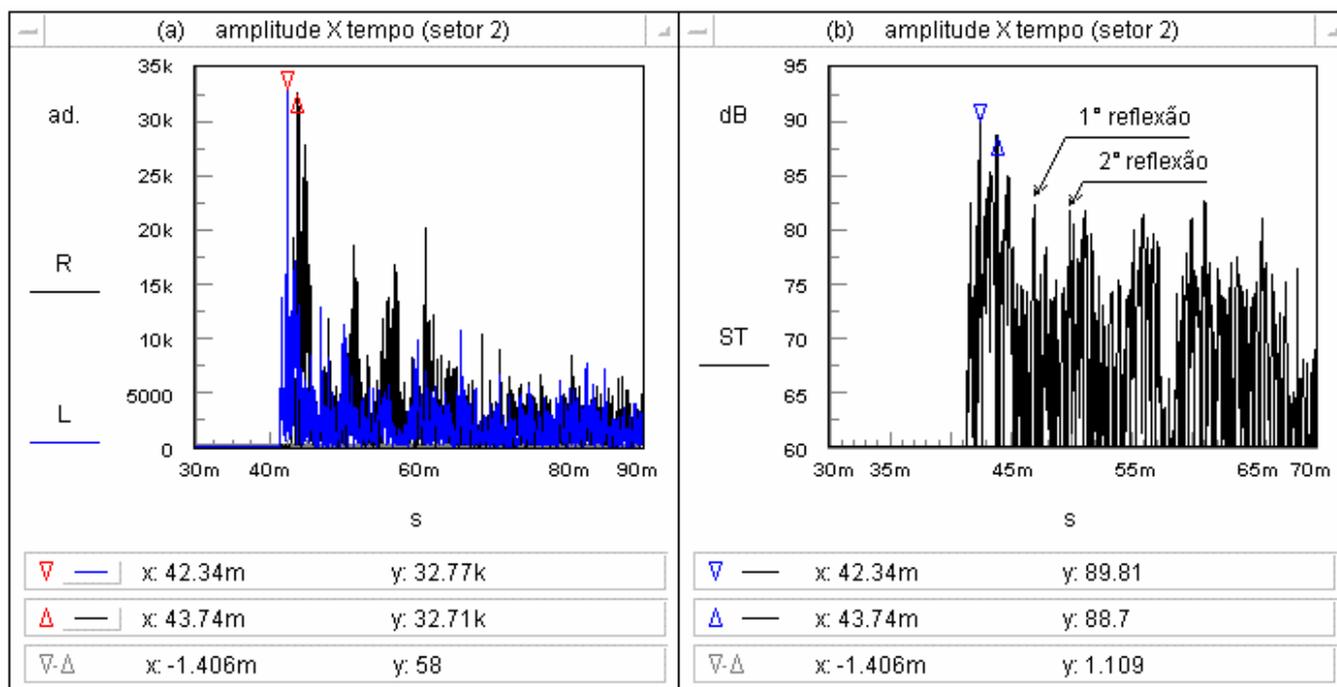


Figura 6.34 - Gráfico da resposta impulsiva medida no setor 2, em função do tempo, para as configurações (a) L, R e (b) ST.

Pode-se observar que os sons diretos dos conjuntos de caixas esquerda (L) e direita (R), chegam na posição de medida com uma diferença de tempo de 1,406ms e de nível de 1,109dB, que provoca, segundo o gráfico da Figura 2.7, o deslocamento da percepção da direção do som do *cluster* L para o *cluster* R, fazendo com que se perceba o som como se estivesse vindo do centro do palco.

As reflexões subsequentes, de acordo com o nível e tempo de chegada mostrados na Tabela 6.2, contribuem para a sensação de espacialidade do som.

Tabela 6.2 – Amplitude e tempo em que ocorrem as primeiras reflexões no setor 2.

Reflexão	Nível @ tempo. Conjunto (L)	Nível @ tempo. Conjunto R
1°	81,27dB @ 46,85ms	81,06dB @ 51,18ms
2°	81,76dB @ 49,82ms	79,57dB @ 56,64ms
3°	81,06dB @ 59,82ms	78,71dB @ 60,86ms

6.15 Análise do Setor 11

O setor 11 localiza-se na extremidade esquerda (visto a partir do palco) da platéia alta, e dista aproximadamente 26,0m do conjunto R e 36,0m do conjunto L.

Pode-se observar as características do som que chega nesta posição analisando os gráficos abaixo:

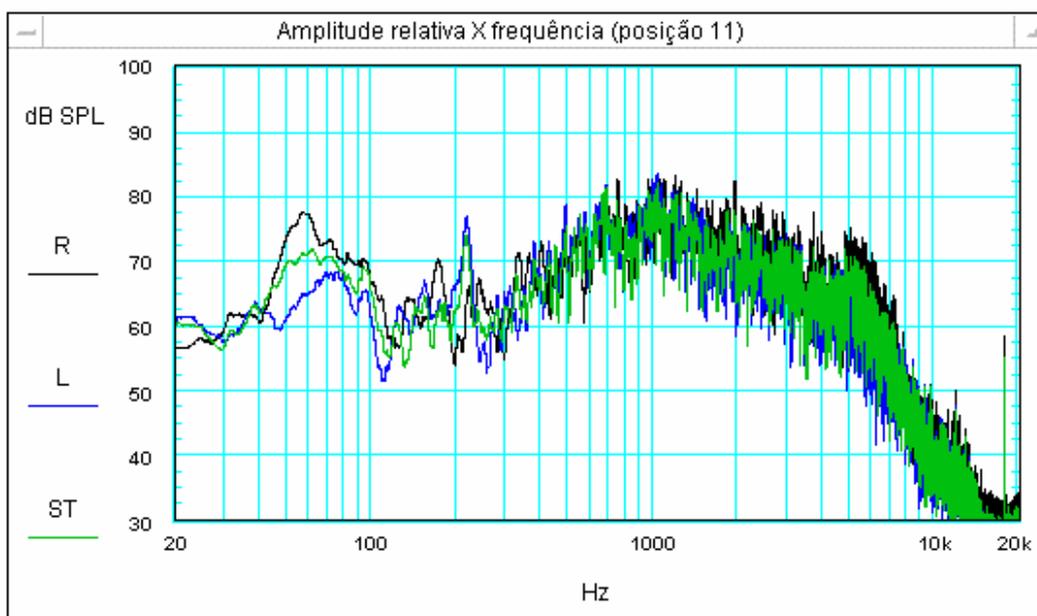


Figura 6.35 - Gráfico da resposta em frequência medida no setor 11 (cadeira 56U). L, R e ST indicam o cluster esquerdo, direito e ambos emitindo o sinal de excitação, respectivamente.

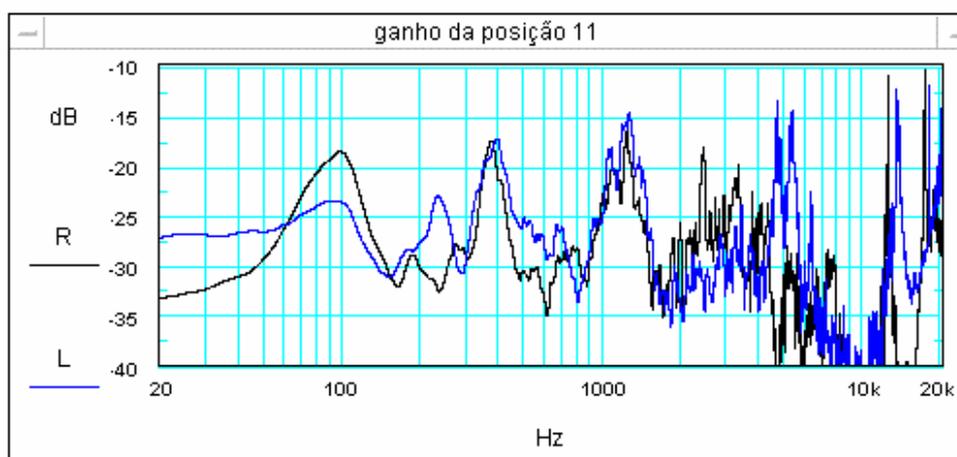


Figura 6.36 – Ganho acústico do setor 11 (cadeira 56U).

Pode-se observar um ganho médio em torno de $-25,0$ dB, com uma tendência de diminuição em altas frequências. Observa-se, também, que existe pouca diferença entre o ganho do *cluster* R e do *cluster* L, devido ao fato de esta posição estar bastante afastada das caixas acústicas e, portanto, no seu campo difuso.

Analisando o gráfico em função do tempo da Figura 6.37, verifica-se que o som vindo do conjunto de caixas esquerdo (L) chega nesta posição com um atraso de $43,56$ ms e uma diferença de nível de $-0,48$ dB, isto é, o som vindo daquele *cluster* chega com um nível ligeiramente maior que o conjunto direito (R). Este fato provoca o chamado “eco” que pode ser facilmente percebido ao se escutar o sinal gravado.

As primeiras reflexões vindas, provavelmente, das paredes lateral e traseira, contribuem para a sensação de espacialidade do som, dados os níveis e tempo em que ocorrem. No auditório, estas paredes possuem difusores acústicos de madeira que auxiliam nesta percepção.

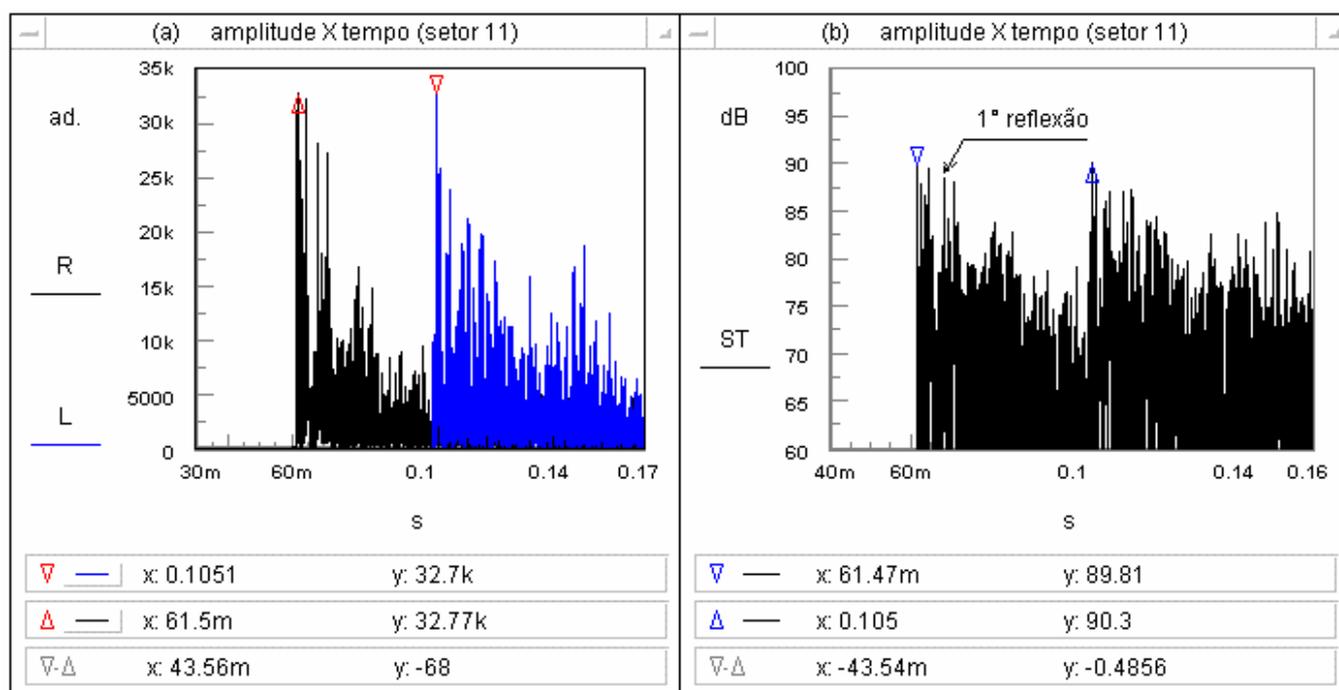


Figura 6.37 - Gráfico da resposta impulsiva medida no setor 11, em função do tempo, para as configurações (a) L, R e (b) ST.

6.16 Análise dos parâmetros de qualidade acústica do ambiente

Neste item, o ambiente é analisado a partir dos parâmetros medidos e calculados nos diversos setores e comparados com outros resultados encontrados na bibliografia.

6.16.1 Fator de força (G)

O gráfico abaixo mostra os valores de G medidos em cada setor em relação a cada um dos conjuntos de caixas (L e R).

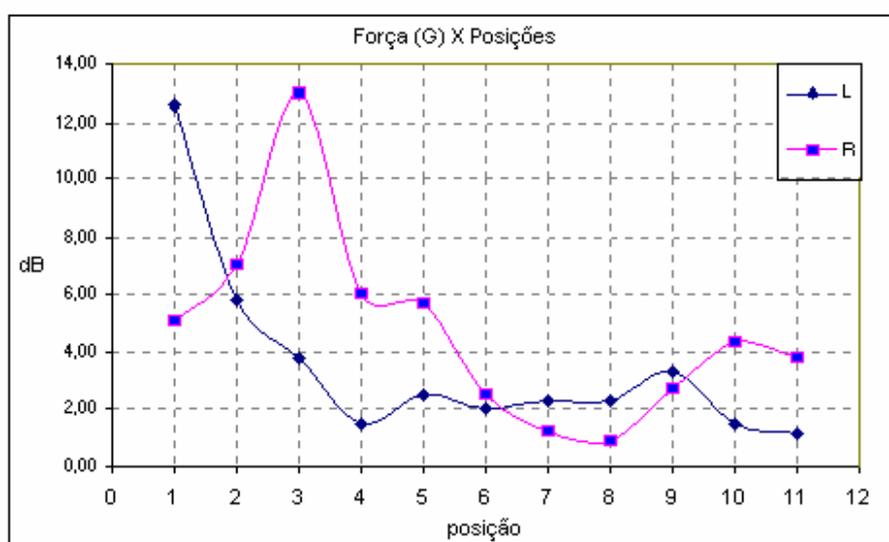


Figura 6.38 - Gráfico do parâmetro G em função das posições para as configurações L e R.

Como era de se esperar, o fator G é menor nos setores mais distantes do palco pois o nível de pressão sonora dentro do auditório decresce com a distância de acordo com o gráfico da Figura 2.6. Também era de se esperar que os valores de G nas posições 6, 7 e 8 fossem de 1,0dB a 2,0dB maiores que o valor apresentado, porém isto não se verificou.

É interessante verificar também que, na posição 2, o G resultante da soma de L e R é aproximadamente 4,0dB menor que o G resultante da soma de L e R nas posições 1 e 3. Em outras palavras, as posições centrais da platéia baixa são cobertas por níveis de pressão sonora menores que nas posições laterais. Nos outros níveis de platéia, a diferença de G entre os setores do mesmo nível (de platéia) não passa de 2,5dB.

O gráfico da Figura 6.39 mostra o fator de força, com referência ao *cluster* R, em função da frequência em alguns setores do auditório.

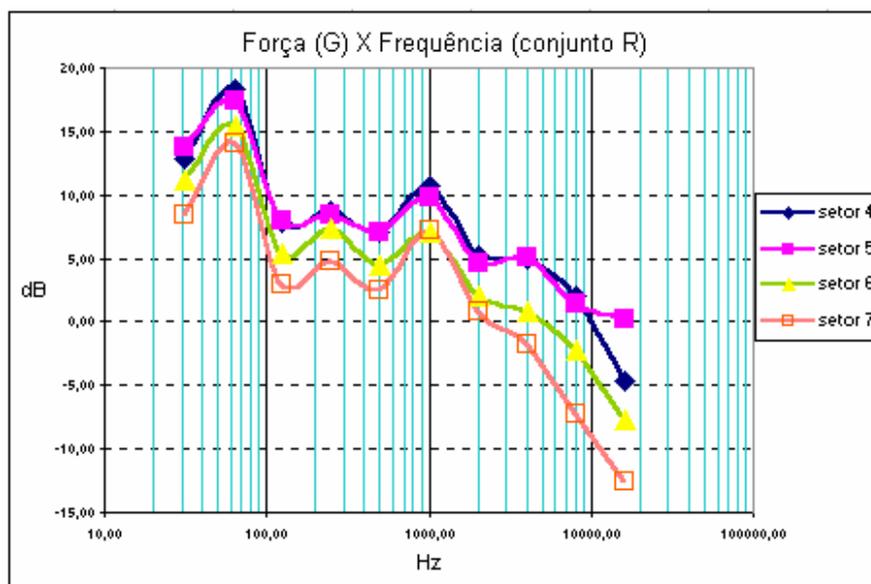


Figura 6.39 - Gráfico de G em função da frequência em alguns setores do auditório com referência ao conjunto R.

Este gráfico, de uma maneira geral, segue o contorno das respostas em frequência medidas no respectivo setor (ver Figuras Figura 6.28, Figura 6.32 e Figura 6.35). Nota-se uma perda de “força” em altas frequências devido a alta absorção destas no ambiente e um decréscimo de G entre 100Hz e 1KHz.

Apesar dos valores deste fator de força atingirem seu maior grau nas frequências abaixo de 100Hz, como mostra o gráfico, deve-se levar em consideração que o sinal de referência foi captado a uma distância de 5,27m da fonte. A esta distância, o instrumento de medida não tem a mesma sensibilidade para captar ondas de baixa frequência, isto é, comprimento de onda elevado, que a grandes distâncias. Isto faz com que o valor do sinal de referência, em baixas frequências, seja menor do que realmente é, elevando fator G nesta faixa.

6.16.2 Tempo de decaimento inicial (EDT)

O *EDT*, tempo de decaimento inicial, foi medido em cada um dos setores pré estabelecidos com relação a cada um dos conjuntos de caixas nas diversas bandas de frequências. Os gráficos das Figuras Figura 6.40 e Figura 6.41 apresentam estes resultados.

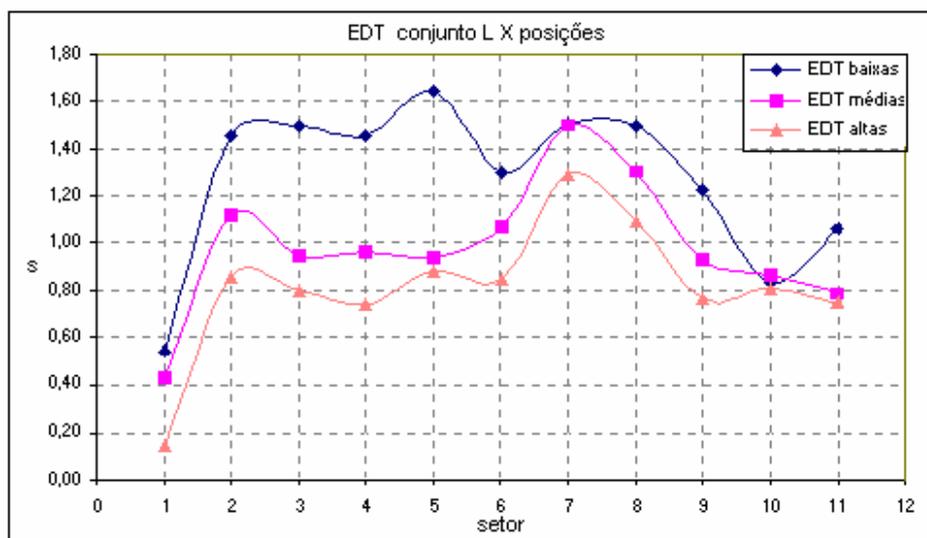


Figura 6.40 - Gráfico do EDT, em função dos setores, para as baixas, médias e altas frequências, com referência ao conjunto L.

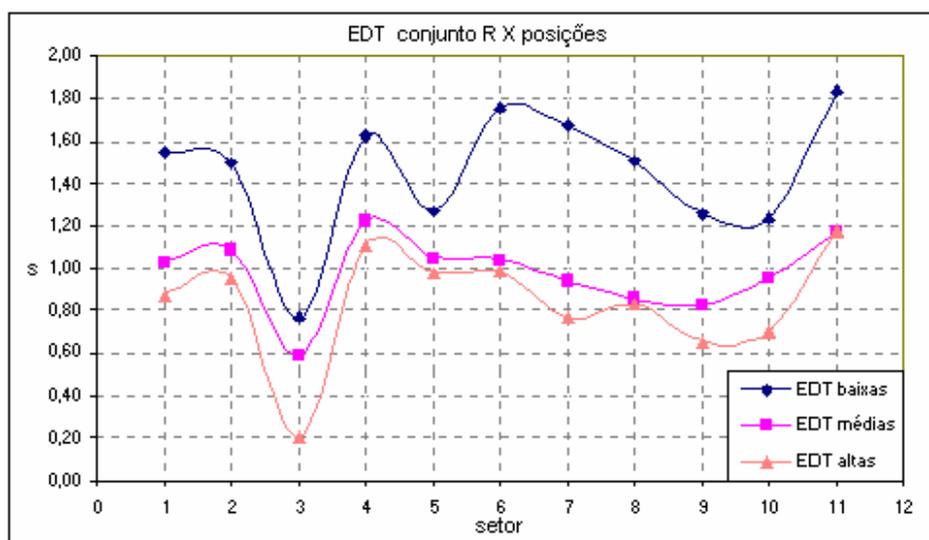


Figura 6.41 - Gráfico do EDT, em função dos setores, para as baixas, médias e altas frequências, com referência ao conjunto R.

As curvas *EDT* baixas, médias e altas correspondem, respectivamente, às médias do parâmetro medido nas frequências de 125Hz - 250Hz, 500Hz - 1 KHz - 2KHz e 4KHz - 8KHz.

As posições onde o *EDT* é notoriamente mais baixo, em qualquer banda de frequência, são aquelas onde o som direto predomina em relação ao som reverberante, o que resulta num decaimento abrupto logo após a sua passagem. Portanto, as posições 1 e 3 possuem o menor valor de *EDT* para os casos onde as referências são, respectivamente, os conjuntos L e R. Nas

outras posições, onde as demais reflexões (e o campo difuso) tem nível comparável ao do som direto, o valor de *EDT* é mais alto.

Em relação à frequência, pode-se observar que o tempo de decaimento é tanto menor quanto maior a frequência do sinal.

Sendo este comportamento independente do ganho em frequência dos *clusters*, tem-se, através destes resultados, mais um indicativo de que o ambiente absorve em maior grau as altas frequências em relação às outras faixas de frequência.

O *EDT* é considerado um parâmetro bastante robusto na avaliação da reverberação de um auditório quando comparado, por exemplo, ao *T60* (fórmula de Sabine). Por ser mensurado através do decaimento dos primeiros 10dB da resposta impulsiva, este parâmetro torna-se praticamente imune às alterações do campo difuso que é altamente modificado de acordo com a ocupação do teatro. Isto significa que os valores de *EDT* não sofrerão grandes modificação caso o auditório esteja vazio ou com a sua ocupação plena.

6.16.3 Tempo de reverberação (T60)

O gráfico da Figura 6.42 mostra o tempo de reverberação, *T60*, em cada um dos setores pré estabelecidos, dividido em faixas de frequência.

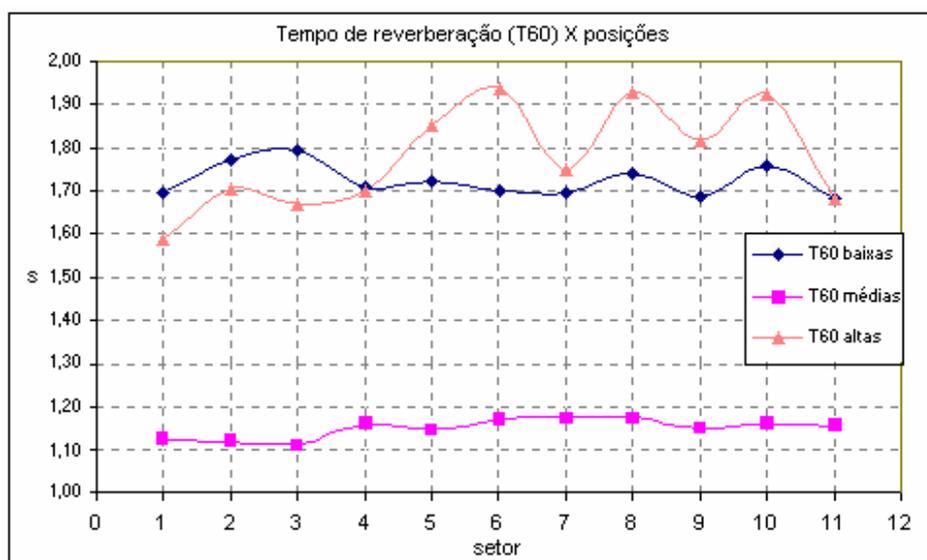


Figura 6.42 - Gráfico do *T60*, em função dos setores, para as baixas, médias e altas frequências, com referência aos conjunto L e R

Observa-se neste gráfico que o $T60$ em altas frequências é superior aos tempos de reverberação em médias e baixas frequências. Este resultado, entretanto, não corresponde a realidade uma vez que, seguindo a tendência de decaimento apresentadas através do parâmetro EDT , os sinais de altas frequência deveriam ser os primeiros a se extinguir, o que resultaria num $T60$ baixíssimo.

O que ocorre é que o programa não consegue traçar uma linha de tendência de decaimento que corresponda à tendência original do sinal. As possíveis explicações para este problema são

- 1) A existência, nesta faixa de frequência, de um modo de vibração predominante, com decaimento muito rápido nos primeiros 10 a 20dB, seguido de um ou mais modos, com decaimento mais lento em níveis mais baixos, constituindo num duplo padrão de decaimento (Figura 3.1) [Everest, 2001]. Observar, a título de exemplo, os gráficos de 8KHz e 16KHz da Figura 6.31.
- 2) Após o decaimento, o sinal se confunde com o ruído de fundo, predominantemente de baixa frequência, impedindo a convergência do resultado.

Os valores médios encontrados de $T60$ altas em torno de 1,90s coincidem com o tempo da amostra da resposta impulsiva em estudo, que é aproximadamente 2,0s. Em outras palavras, o resultado só converge porque o sinal é interrompido.

6.16.4 Fator de Baixo (BR)

A figura abaixo mostra o gráfico do fator de baixo, BR , em cada um dos setores, obtido a partir da média das 3 medições realizadas em cada setor.

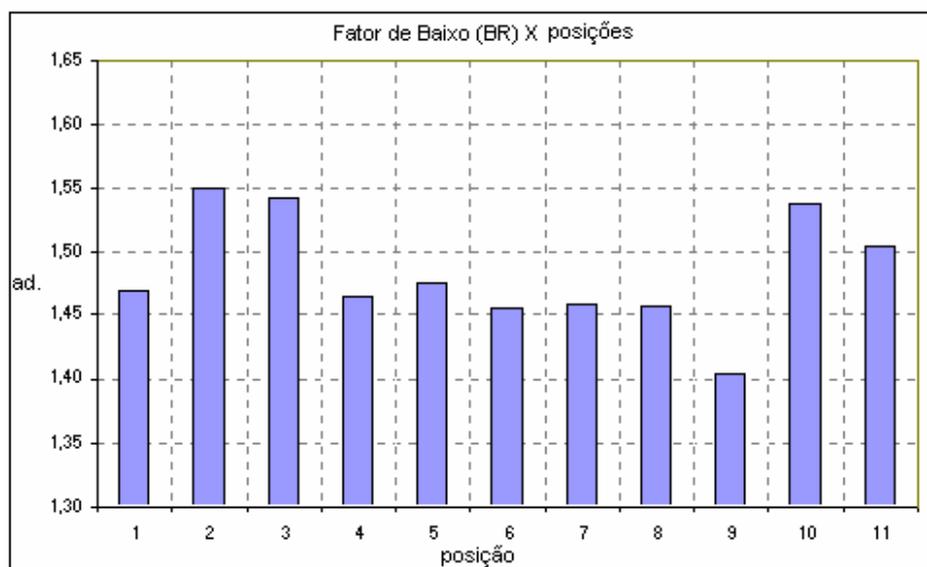


Figura 6.43 - Gráfico do fator de baixo (BR) em função das posições.

Parâmetro que quantifica a sensação de Calidez, o *BR* médio medido nos setores do auditório é de 1,48, sensivelmente acima dos valores de *BR* preferidos, segundo Valadares, 2002.

6.16.5 Clareza e Definição (C50, C80 e D50)

Estes parâmetros que verificam e quantificam a relação entre a energia inicial e reverberante no ambiente e suas implicações sobre a nitidez auditiva da música, foram medidos em cada um dos setores, com os conjuntos de caixas funcionando simultaneamente (ST,) e são apresentados nos gráficos das Figuras Figura 6.44, Figura 6.45 e Figura 6.46.

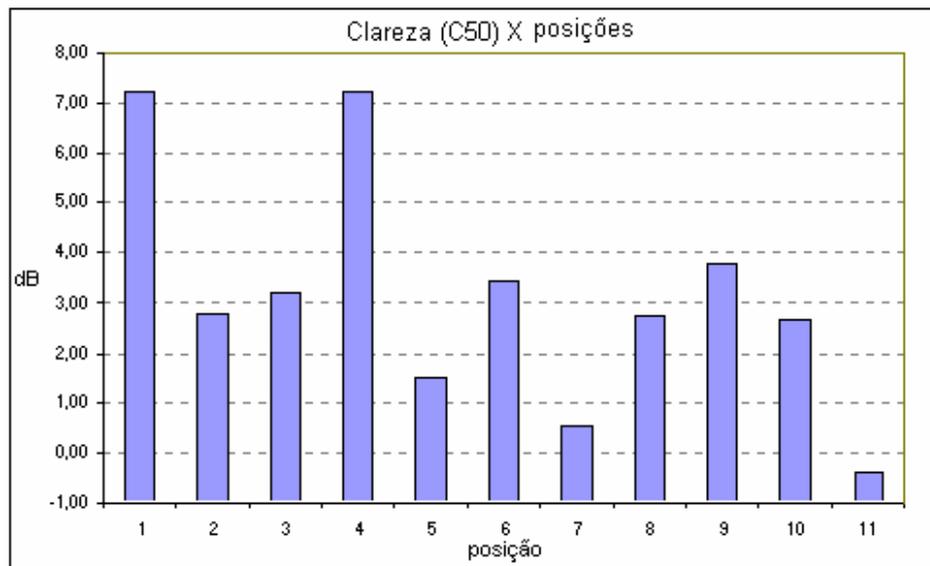


Figura 6.44 - Gráfico do C50 em função das posições, com referência a configuração ST.

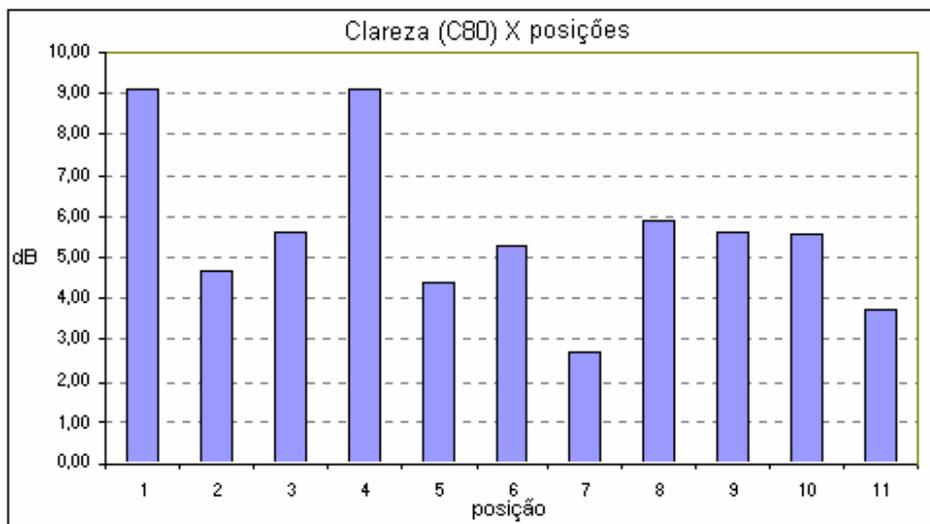


Figura 6.45 - Gráfico do C80 em função das posições, com referência a configuração ST.

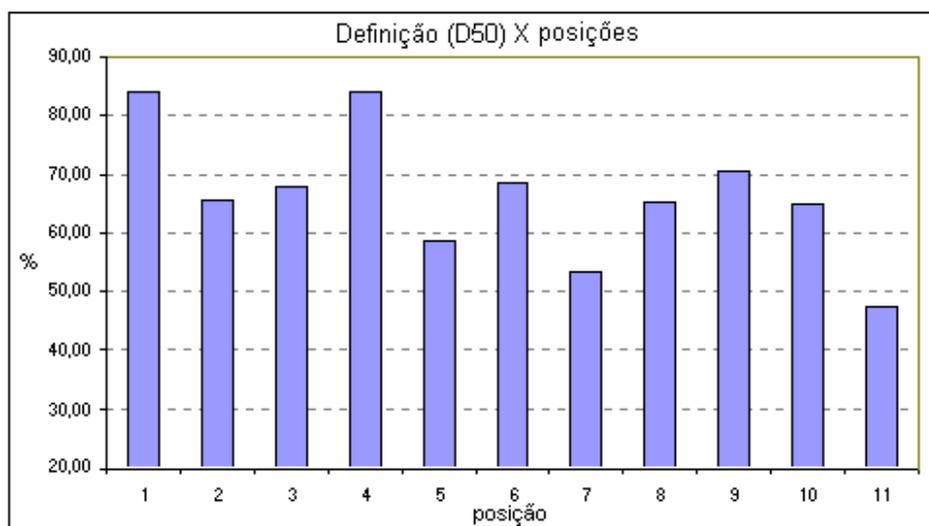


Figura 6.46 - Gráfico do D50 em função das posições, com referência a configuração ST.

Também foram traçados os gráficos destes parâmetros em função da frequência para alguns setores do auditório. Uma curva com os valores médios de todos os setores também foi incluída nos gráficos.

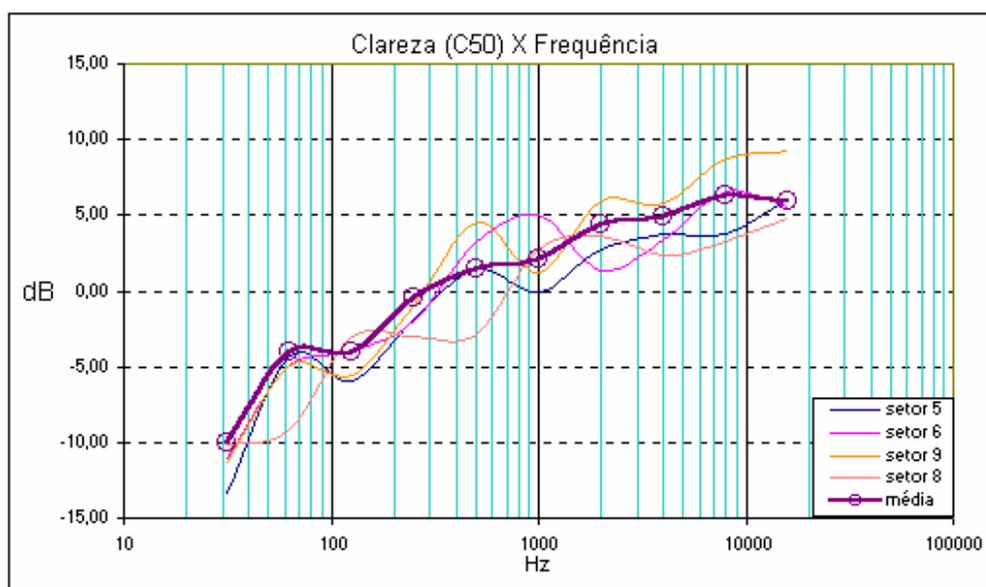


Figura 6.47 - Gráfico do C50 em função da frequência, com referência a configuração ST, em alguns setores do auditório.

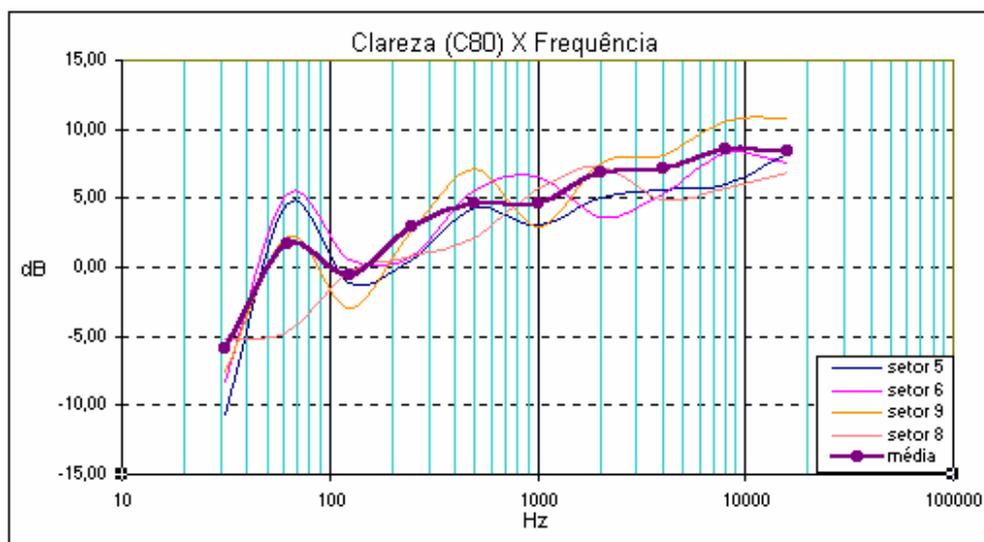


Figura 6.48 - Gráfico do C80 em função da frequência, com referência a configuração ST, em alguns setores do auditório.

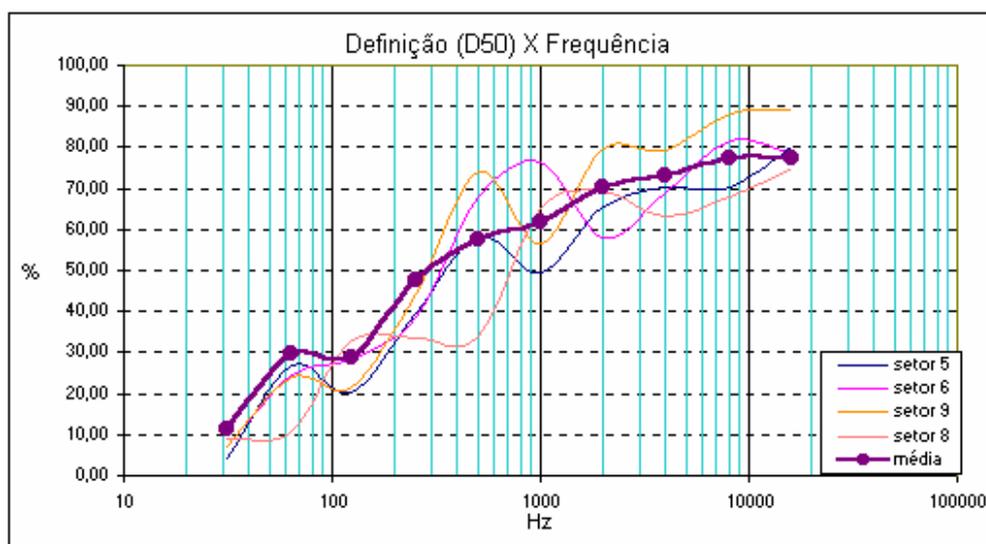


Figura 6.49 - Gráfico do D50 em função da frequência, com referência a configuração ST, em alguns setores do auditório.

6.16.6 Tempo central (*center time*) (T_c)

Também um indicativo de inteligibilidade, o *center time*, T_c , foi medido nos diversos setores do auditório estando os dois conjuntos de caixas emitindo simultaneamente o mesmo sinal (ST). O resultado em cada setor pode ser visualizado no gráfico da Figura 6.50 abaixo

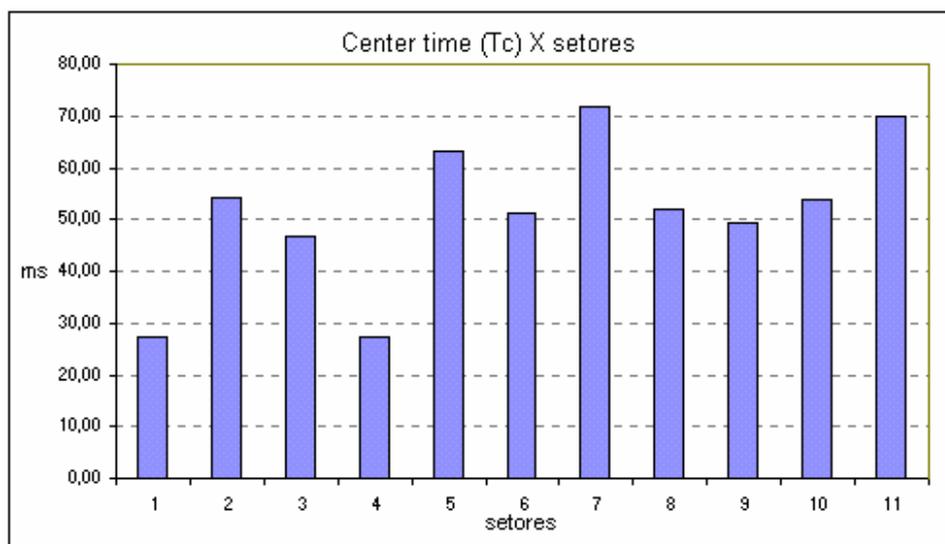


Figura 6.50 - Gráfico do Center Time em função das posições, com referência a configuração ST.

A variação do *center time*, com a frequência é apresentada no gráfico abaixo. Nele, são traçadas curvas medidas em alguns setores do auditório e uma curva média, resultado da média de todos os setores.

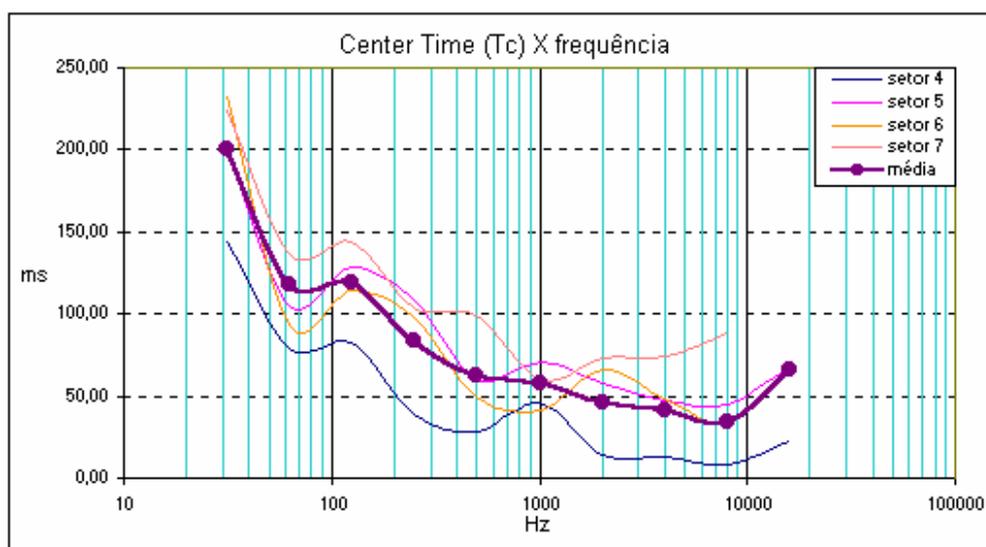


Figura 6.51 - Gráfico do Center Time em função da frequência, com referência a configuração ST.

Segundo Barron, 1993, o *center time* é altamente correlacionado com o EDT, com o coeficiente de correlação típico de 0,975, ocorrendo que, na maioria das vezes, ele não é mencionado nem medido em avaliações acústicas.

6.17 Ruído Ambiente

O ruído ambiente foi medido utilizando o sono-metro ajustado na escala de dBA. Foram feitas várias medidas, tanto na área da platéia quanto na área do palco, procurando cobrir toda a área do auditório. As medidas foram feitas com o auditório vazio e como o ar condicionado desligado, pois estava com problemas técnicos.

O valor médio aproximado encontrado nas medições de ruído de fundo no ambiente foi de 44,0dBA.

Norma, 1998, escreve que, segundo a NBR 10152, o ruído de fundo aceitável para uma sala de teatro vazia é da ordem de 35dBA. Portanto, o ruído de fundo medido no Salão de Atos encontra-se acima daquele nível recomendado.

6.18 Comparação – MLS X Sinesweep

Como dito anteriormente, duas técnicas de medição foram utilizadas na avaliação acústica do auditório; a técnica de MLS e a técnica de varredura logarítmica de seno. Os gráficos da Figura 6.52 e Figura 6.53, apresentam os resultados comparativos da relação sinal/ruído, *S/R*, quando da utilização de uma e outra técnica.

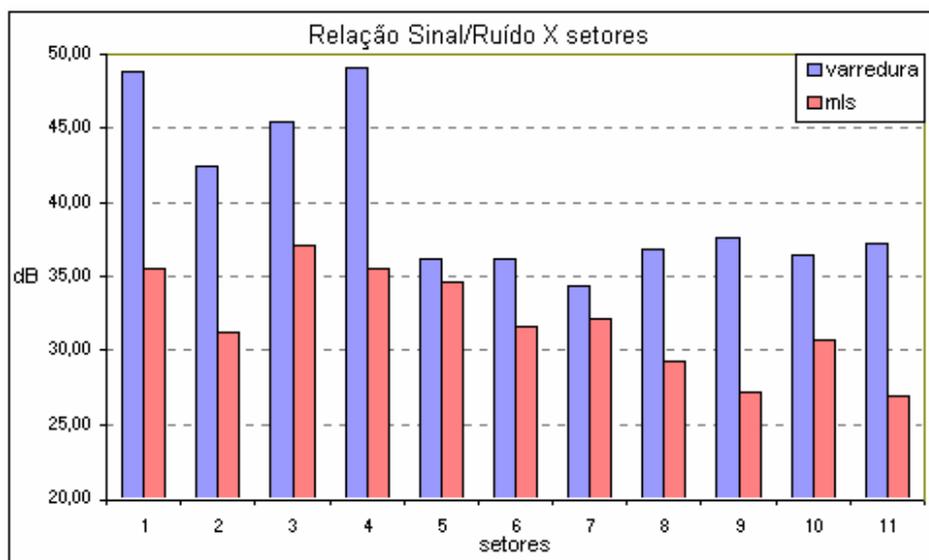


Figura 6.52 - Gráfico comparativo da relação Sinal/Ruído em função dos setores, entre as técnicas de varredura logarítmica de seno e MLS.

O gráfico da Figura 6.52 apresenta a relação sinal/ruído medida em cada setor, com os conjuntos em “ST”, para ambas as técnicas.

É ampla a vantagem da técnica de varredura em relação a MLS em se tratando deste parâmetro. É possível observar que, nos setores mais distantes do palco, a S/R da MLS tende a decair enquanto que a S/R da técnica de varredura mantém-se praticamente a mesma que em posições mais próximas ao palco. Isto introduz maior confiabilidade nos resultados obtidos em qualquer um dos setores da platéia.

O gráfico da Figura 6.53 apresenta o valor médio da S/R , na faixa de frequência, das medições realizadas em todas as posições, utilizando a configuração ST, para as duas técnicas.

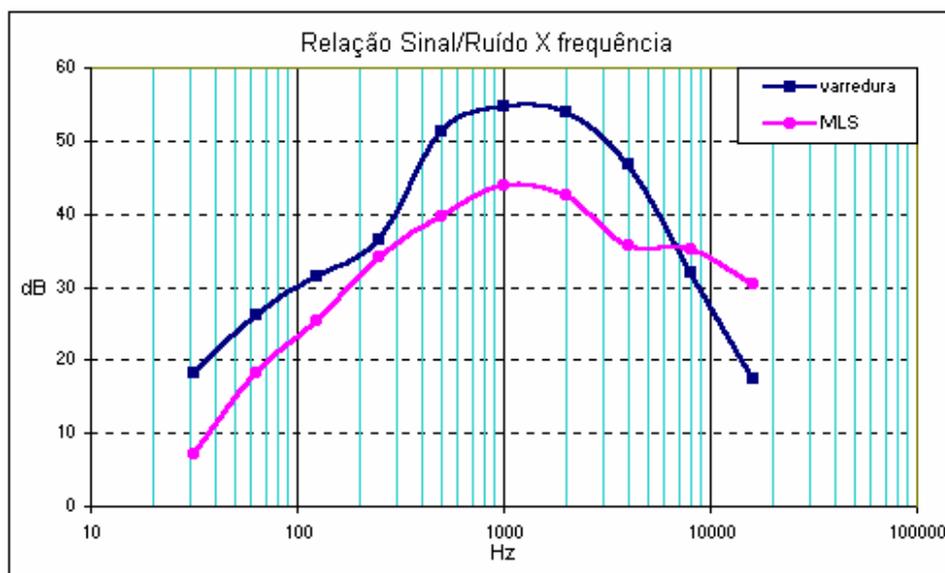


Figura 6.53 - Gráfico comparativo da relação sinal/ruído em função da frequência, entre as técnicas de varredura logarítmica de seno e MLS.

Observa-se que a relação sinal/ruído da técnica de varredura é aproximadamente 11dB superior em relação a outra técnica, na faixa de médias-altas frequências.

Por fim, um gráfico que apresenta a diferença porcentual dos parâmetros medidos com a técnica MLS em relação a técnica de varredura de seno, que pode ser visto na Figura 6.54.

No gráfico, por exemplo, o valor do parâmetro $C80$ medido com a MLS é aproximadamente 4% maior, em dBA, que o resultado de $C80$ medido com a técnica de varredura de seno, na frequência de 100Hz.

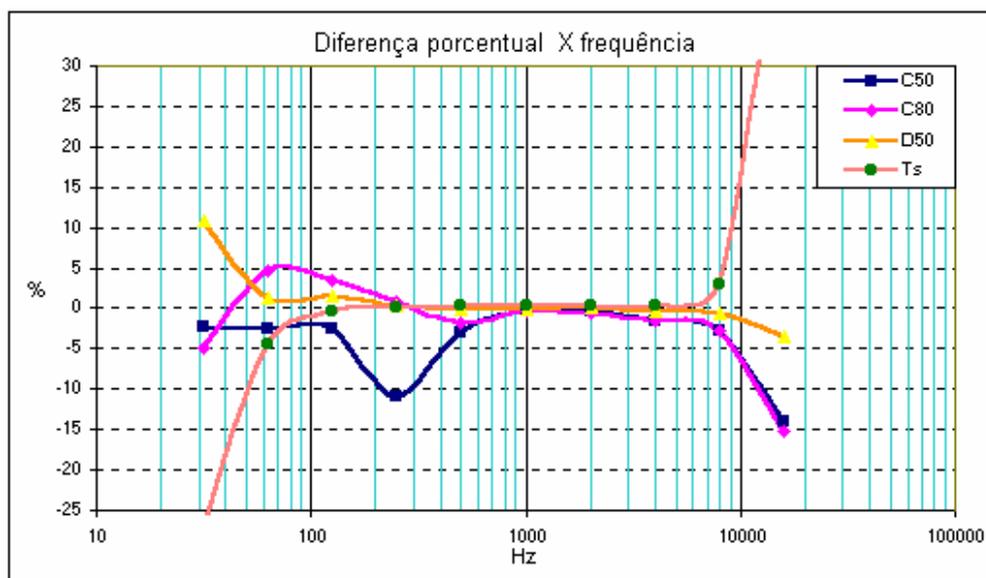


Figura 6.54 - Gráfico da diferença percentual, em função da frequência, dos parâmetros medidos com a MLS em relação aos parâmetros medidos com a varredura logarítmica de seno.

6.19 Comparação dos parâmetros acústicos – Salão de Atos X outros auditórios

A seguir é apresentado um quadro comparativo com os resultados médios dos parâmetros obtidos nas medições no salão de atos e em outros auditórios de múltiplo uso, presentes na bibliografia, bem como a faixa de valores preferidos para cada parâmetro [Barron, 1993, Gomes, 1998 e Creder, 1996].

Tabela 6.3 - Tabela comparativa entre os parâmetros acústicos medidos em diversas salas no mundo e faixa de valores ótimos. Fonte: Barron, 1993, Creder, 1996 e Gomes, 1998.

Salas	Vol. m ³	lugares	EDT(s)	T60(s)	C80(dB)	G (dB)	D50 (%)	Tc (s)	C50 (dB)	BR (ad)
SAU	9950	1300	m = 0,98 σ = 0,26	m = 1,15 σ = 0,02	m = 5,6 σ = 1,88	m = 4,13 σ = 3,23	m=66,39 σ =10,62	m=51,54 σ =13,77	m = 3,16 σ = 2,26	m = 1,48 σ = 0,04
CIC	--	--	m = 1,07 σ = 0,03	--	m = 4,1 σ = 1,17	--	m=54,75 σ =9,4	--	--	--
WCC	24000	2503	m = 1	m = 1,3	m = 3,03 σ = 1,44	m = 0,18 σ = 1,78	--	--	--	--
CH	7000	1064	m = 1,30	m = 1,35	m = 3,58 σ = 0,44	m = 4,84 σ = 1,22	--	--	--	--
BH	12100	1269	m = 2,52	m = 2,57	m = 0,35 σ = 0,84	m = 4,47 σ = 0,8	--	--	--	--

AR	8070	1478	$m = 1$	$m = 1,1$	$m = 1,07$ $\sigma = 1,33$	$m = 3,31$ $\sigma = 1,8$	--	--	--	--
TH	5720	960	$m = 1,32$	$m = 1,37$	$m = 2,8$ $\sigma = 0,82$	$m = 3,88$ $\sigma = 1,75$	--	--	--	--
ECT	6200	814	$m = 1,12$	$m = 1,15$	$m = 3,91$ $\sigma = 0,96$	$m = 3,11$ $\sigma = 1,12$	--	--	--	--
TR	6490	1271	$m = 0,82$	$m = 1,0$	$m = 4,14$ $\sigma = 0,62$	$m = 1,04$ $\sigma = 1,92$	--	--	--	--
DC	7180	1151	$m = 2,0$	$m = 1,95$	$m = 0,57$ $\sigma = 0,99$	$m = 4,14$ $\sigma = 1,54$	--	--	--	--
TDA	9800	1500	$m = 0,65$ $\sigma = 0,3$	$m = 1,2$ $\sigma = 0,15$	$m = 9$ $\sigma = 3$	--	--	--	--	--
OL	6500	1200	$m = 1$ $\sigma = 0,2$	$m = 1,3$ $\sigma = 0,15$	$m = 5$ $\sigma = 2$	--	--	--	--	--
DAV	5200	976	$m = 1,2$ $\sigma = 0,2$	$m = 1,9$ $\sigma = 0,1$	$m = 4$ $\sigma = 2$	--	--	--	--	--
POV	3300	100	$m = 2,7$ $\sigma = 0,5$	$m = 3,3$ $\sigma = 0,5$	$m = -0,5$ $\sigma = 2,5$	--	--	--	--	--
CMR	2400	421	$m = 1,4$ $\sigma = 0,3$	$m = 1,1$ $\sigma = 0,2$	$m = 6$ $\sigma = 3$	--	--	--	--	--
OLM	2200	320	$m = 1,6$ $\sigma = 0,3$	$m = 1,6$ $\sigma = 0,2$	$m = 2,5$ $\sigma = 2$	--	--	--	--	--
Valores ótimos	--	--	--	1,0 a 2,2	-2 a 2	> 0	50 a 65	--	> 0	0,9 a 1,3

Na Tabela 6.3 acima, m refere-se a média dos valores do referido parâmetro e σ o desvio padrão do conjunto amostrado.

Ainda nesta mesma tabela, a legenda SAU refere-se ao Salão de Atos da UFRGS, em Porto Alegre, objeto do presente trabalho e CIC refere-se ao Teatro do Centro Integrado de Cultura, estudado por Gomes, 1998.

Os 6 últimos teatros da Tabela 6.3 foram transcritos da Tabela II, presente em Creder, 1996 e não possuem referência quanto ao nome dos teatros.

As salas estudadas por Barron, 1993, legendadas na tabela acima, são apresentadas a seguir junto com um breve comentário a respeito das características subjetivas encontradas em cada uma delas:

- WCC – *Wembley Conference Center*: O som musical foi julgado como sendo seco, constricto, remoto e fraco ainda que a clareza seja razoável. A qualidade do som também foi dita como sendo áspera e com pouco senso de calidez.
- CH – *Central Hall, University of York*: Tem uma característica de som brilhante e limpo. Realata-se uma sensação de intimidade não só perto do palco mas em outras posições mais afastadas. O som é alto, geralmente com um bom balanço e rico em tons de cordas. Baixo senso de reverberação.
- BH – *Butterwoth Hall, University os Warwick Arts Centre*: O julgamento geral da acústica foi caracterizado como “bom”, com um grande grau de uniformidade. O balanço entre a clareza e a reverberância é particularmente apropriado com o senso de que o som está chegando de várias direções. Apenas alguns criticos notaram uma carência de força (Loudness) nas cadeiras mais afastadas.
- AR – *Assembly Rooms, Derby*: Foi sentida com uma acústica seca e clara, mas não reverberante. O som também não foi sentido alto (forte) e nem envolvente, com o senso de intimidade decrescendo à medida que se afasta do palco.
- HR – *The Hexagon, Reding*: Os ouvintes foram mais entusiásticos nas cadeiras próximas do palco do que nos balcões. O julgamento geral ficou entre “razoável” e “bom”; o som foi julgado limpo mas não reverberante, com intimidade, envolvimento e força (loudness) média.
- ECT – *Eden Court Theattre, Inverness*: Este auditório não foi testado subjetivamente mas, segundo o autor, “o cliente está bem satisfeito”.
- TR – *Theater Royal, Plymouth*: O teatro foi modelado em escala para checar a inteligibilidade da fala, considerada boa. Entretanto, outras informações quanto a performance subjetiva deste teatro não foram coletadas.
- DC – *Derngate Center, Northampton*: Foi notada um deficiência de clareza na área dos balcões. O som foi julgado tanto não reverberante quanto tendo uma média intimidade mas com um som bastante alto (forte). De uma maneira geral, foi classificado com uma boa acústica, bom envolvimento e força (loudness).

6.20 Fator de Mérito do Salão de Atos da UFRGS

A partir dos resultados obtidos através dos parâmetros de qualidade acústica medidos no Salão de Atos, pode-se calcular o fator de mérito global do ambiente, que quantifica a qualidade acústica do mesmo.

Este Fator de Mérito Global, proposto por Arau, 1999, é composto pelos diversos fatores de mérito correspondentes a cada parâmetro objetivo que se quer incluir na análise. O resultado final é a média aritmética desses parâmetros.

O Fator de Mérito Global (FM_{Global}) do Salão de Atos, bem como os fatores de mérito dos respectivos parâmetros, são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 6.4 - Fatores de mérito e Fator de Mérito Global para o Salão de Atos da UFRGS.

M_{T60}	$M_{calidez}$	M_{EDT}	M_{D50}	M_{C80}	M_G	FM_{Global}
0,7	0,28	0,904	1	0,933	0,413	0,7166

7. Análise dos resultados

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos nas medições eletroacústicas realizadas no Salão de Atos da UFRGS, descritas no capítulo anterior. Como consequência desta análise, o autor sugere algumas modificações que julga serem apropriadas para a melhora do desempenho tanto do sistema de áudio instalado quanto da acústica do recinto.

7.1 Console

Os resultados obtidos na análise do console apresentaram-se muito bons para o tipo de aplicação a que está endereçado. Tanto a faixa de frequência (20Hz – 20KHz) quanto a relação sinal/ruído (66dB) encontrados com a console operando nas condições descritas no item 6.8 estão dentro do esperado para um console que é utilizada para reforço de voz e reprodução de música pré-gravada.

Como as eventuais gravações que utilizam o console têm, ao que tudo indica, um caráter apenas de registro (de uma palestra, por exemplo) e são realizadas em fita K7 que, pela própria natureza possui qualidade de gravação inferior se comparado com um sistema digital, as especificações da console são adequadas. Entretanto, se o objetivo é uma gravação profissional, deve-se optar por outra console com, dentre outras coisas, maior relação sinal/ruído.

Ainda a respeito da relação sinal/ruído, vale citar um estudo realizado por Fielder, 1982, a respeito da faixa dinâmica necessária para que a reprodução de áudio seja subjetivamente considerada livre de ruído. Seus estudos revelam a necessidade de até 118,0 dB de faixa dinâmica para que isto ocorra, o que reforça a necessidade de equipamentos de gravação com alta relação *S/R*.

7.2 Amplificador

Quanto ao amplificador, as especificações de resposta em frequência, *THD* e *IMD* estão dentro do esperado para um amplificador destinado à sonorização. Com resposta bastante plana entre 20Hz – 20KHz, *THD* baixo (0,08% @ 1KHz), *IMD* de 0,32%, um pouco acima do valor considerado baixo, *S/R* muito boa de 90,0 dB, somados aos seus recursos de equalização e possibilidades de entrada, este amplificador adequa-se bem para a sua aplicação.

A observação fica por conta da subutilização deste equipamento, tendo em vista os seguintes aspectos:

- 1) A potência máxima que o conjunto de caixas pode suportar antes da distorção foi aferida como sendo 2,0 W RMS, muito longe dos 150,0 W RMS disponíveis no amplificador.
- 2) Cada conjunto de caixas está conectado em apenas um canal de saída (esquerdo ou direito) em cada um dos dois amplificadores do auditório. Portanto, dada a potência máxima de 2,0 WRMS, é possível, e ainda com folga, utilizar os dois canais de saída de apenas um amplificador para alimentar os dois conjuntos de caixas, tornando o outro amplificador sobressalente.

Entretanto, isto não significa que o amplificador está super-dimensionado.

Através da equação (86), considerando $EPR = 150,0 \text{ W}$, $D_2 \cong 30,0 \text{ m}$, referente à maior distância entre um ouvinte e um conjunto de caixas (ver planta baixa presente no APÊNDICE A), uma TPM de 10 dB, pode-se calcular o nível de pressão de programa, NPD , possível de ser alcançado na distância D_2 com este sistema.

Para tanto, utilizou-se a atenuação em campo difuso, dada pela equação (23) com um valor médio de $Q = 3,0$ (média nas frequências de 250Hz, 500Hz, 1KHz, 2KHz, 4KHz, 8KHz e 16KHz) e $S_{a_n} = 1384,0 \text{ m}^2$. Este último fator foi calculado baseado na equação de Sabine (36), com $V = 9950,0 \text{ m}^3$ e $T60 = 1,15$, que é valor médio encontrado nas medições na faixa de médias frequências (ver Figura 6.42). O valor encontrado para atenuação, $aten(D_2)$, é de aproximadamente 25,0 dB.

$$NPD = 10 \log 150 - 10 + 104 + 10 \log \left(\frac{3,0}{4p(30)^2} + \frac{4}{1384} \right)$$

$$NPD \cong 90,0 \text{ dB}$$

Portanto, se for utilizado a potência nominal do amplificador, é possível obter uma pressão sonora em D_2 de aproximadamente 90,0dB, podendo chegar a 100,0dB na reprodução de picos e transientes. Analisando a Tabela 4.6, observa-se que este nível atende a maioria dos estilos musicas deixando de fora apenas aqueles referentes à música eletrônica.

Com a potência de 2,0W que o conjunto de caixas acústicas permite utilizar, somente é possível alcançar à distância D_2 um nível máximo de pressão sonora igual a 82,0 dB.

Isto posto, conclui-se que é necessário aumentar a sensibilidade axial do *cluster* para proporcionar maior pressão sonora em D_2 , caso a programação exija maior nível de pressão sonora.

No caso do sistema ser utilizado para reforço de voz, que representa a maioria das aplicações no auditório, pode-se calcular os valores de *EAD*, *NAG* e *PAG*, para uma situação comum de formatura, por exemplo, onde o orador geralmente se encontra na posição indicada na planta baixa do APÊNDICE A. Considerando, ainda, o nível médio de ruído ambiente aferido no local de 44,0dBA, o nível médio de pressão sonora a 1m do orador de 70dB, estimado de acordo com a Tabela E 1, $D_0 \cong 28,5\text{m}$, $D_1 \cong 4,7\text{m}$, $D_2 \cong 30\text{m}$, $D_s \cong 0,2\text{m}$, e que apenas um microfone está “aberto” calcula-se.

$$EAD = 10^{\frac{70-44-25,0}{20}} = 1,1\text{m}$$

$$NAG = 20 \log 28,5 - 20 \log 1,1 = 28,0\text{dB}$$

$$PAG = 20 \log 28,5 + 20 \log 4,7 - 20 \log 0,2 - 20 \log 30 - 10 \log 1 - 6,0 = 21,0\text{dB}$$

Pode-se concluir dos resultados apresentados acima que o ouvinte localizado em D_2 necessitará de um nível de pressão sonora igual a 44,0dB + 25,0dB para que as condições de audibilidade em *EAD* sejam reproduzidas. Como o sistema, mesmo operando a 2,0W, fornece 82,0dB, o *NAG* é alcançado com facilidade considerando a situação mencionada.

Observa-se também que o *NAG* supera o *PAG* em 7,0dB, isto é, o sistema entra em realimentação regenerativa antes que seja possível alcançar em D_2 as condições de audibilidade presentes em *EAD*. Na prática isto não acontece pois são utilizados microfones direcionais junto com periféricos supressores de microfonia. Entretanto, o projeto bem elaborado deve considerar o microfone como sendo omnidirecional e sem a ajuda de nenhum periférico. Neste caso, duas alternativas são viáveis para resolver esta questão: A primeira consiste em reduzir a distância entre o orador e microfone, D_s , e a outra em aumentar a distância entre o microfone e o *cluster*, D_1 . As distâncias D_s e D_1 para que $NAG \leq PAG$ são $D_1 \geq 10,55\text{m}$ e $D_s \leq 8,9\text{cm}$.

Em relação a distância D_1 , a menos que se queira colocar o orador nos fundos do palco, a solução seria suspender ambos *clusters* para evitar a microfonia. Esta ação, além resolver o problema da microfonia, torna a cobertura mais uniforme na área da platéia, evitando que os

ouvintes mais próximos as caixas acústica sejam expostos a altos níveis de pressão sonora. Este tipo de sistema suspenso é chamada de *fly PA*.

7.3 Cabeamento

O cabeamento mostrou-se muito bom, sem introdução de ruído significativo.

7.4 Caixas Acústicas

Analisando os resultados realizados nas caixas acústicas do auditório, percebe-se que se está diante do elo mais fraco dentro desta cadeia de áudio.

A distorção harmônica gerada é altíssima, cerca de 15 vezes maior que a do amplificador. Mas é na especificação de resposta em frequência que está a maior dificuldade. Aqui, observa-se uma queda de 10 a 15dB,0 de ganho nas frequências abaixo de 500Hz e acima de 7KHz, sendo que a sua faixa de frequência é da ordem 40Hz – 10KHz. Esta resposta em frequência, apesar de bem balanceada ($40 \times 10000 = 400000$) é bastante irregular, o que leva a resultados sônicos inferiores. Além disto, estas irregularidades não permitem utilizar todo o potencial de ganho do sistema de reforço.

A melhor maneira de contornar este problema é resolvendo-o em sua origem, isto é, alterando as características de resposta da caixa acústica. Isto pode ser feito de várias formas, dentre elas, otimizando (ou alterando) o seu divisor de frequência interno, ou usando um crossover externo para distribuir a potência nas diversas bandas de frequência para cada elemento da caixa (alto-falante, *midrange* e *tweeter*).

De qualquer maneira, algumas medidas corretivas podem ser tomadas utilizando os recursos disponíveis do sistema existente:

- 1) Utilizar o equalizador gráfico da saída da console, ajustando os controles de forma que resulte num decréscimo de 10,0dB a 15,0 dB na faixa de 500Hz a 4KHz e, subsequentemente, aumentar a saída do controle de *master*, ou diminuir a atenuação de entrada do amplificador, ambos na mesma proporção do decréscimo.
- 2) Utilizar o equalizador gráfico da saída da console, ajustando os controles de forma que resulte num aumento de 10,0dB a 15,0 dB nas frequências abaixo de 400Hz e acima de 4KHz.

Entretanto, qualquer uma destas medidas deve respeitar a potência que o cluster pode suportar antes da distorção que, logo após a correção, deve ser novamente avaliada.

De outra forma, fornecer potência em frequências localizadas fora da faixa de frequência que o *cluster* consegue operar, além de inútil em termos de resultado sônico, pode sobrecarregar o amplificador.

Em qualquer uma destas correções, a potência do amplificador será melhor aproveitada e, conseqüentemente, o ganho final do sistema se tornará mais linear.

Em relação à relação de diretividade, pode-se calcular um valor médio de Q nas bandas de frequência medidas, o que resulta em $Q = 3,0$.

A partir daí, é possível determinar $AL_{CONS}\%$ e verificar se Q é suficiente para garantir boa inteligibilidade. Para isso é necessário estipular α_m e α_p para determinar o fator M , presente na equação (88). Para tanto, foi realizada uma média dos valores de coeficiente de absorção presentes na Tabela E 3 baseado nos materiais de acabamento interno do auditório, conforme descrito no item 6.2.

Como resultado, chegou-se aos valores de $\bar{a} = 0,342$ e $\bar{a}_p = 0,13$ e, conseqüentemente, $M = 1,32$. Substituindo os valores de $D_2 = 30,0$ m, $T60 = 1,15$ s, $N = 2$, $V = 9950$ m³, $Q = 3,0$ e $M = 0,946$ na equação (88), tem-se que $AL_{CONS}\% = 12,06\%$.

Este resultado indica que o valor de $Q = 3,0$ é suficiente para se alcançar boa inteligibilidade mesmo nas posições mais distantes do palco.

7.5 Resposta em frequência do ambiente

O sistema de sonorização bem projetado é aquele dimensionado para operar a um nível de SAG tal que $NAG = PAG$, em todo o espectro de frequência. Entretanto, o som captado num determinado ponto do recinto sofre os efeitos naturais de filtragem devido à interação do som com o ambiente durante o seu processo de propagação, que modificam o som emitido pelo sistema de reforço, atenuando ou reforçando certas frequências. Conseqüentemente, o nível de PAG pode ser alcançado em determinadas frequências, enquanto que em outras ainda exista ganho disponível antes de chegar a este nível.

Deve-se, então, proceder à equalização (ou linearização) do sistema som-ambiente para que se possa aproveitar todo o potencial de ganho do sistema de reforço, em todo o espectro de frequência, antes da microfonia.

Como cada posição da audiência tem sua própria resposta em frequência, deve-se escolher uma posição representativa para se fazer a linearização da resposta som-ambiente, ou fazer uma média das curvas obtidas em várias posições [Cysne, 2000].

Pelo fato de que as variações em frequência são resultado da interação do som com o ambiente, a maneira correta de se equalizar a resposta de ganho do recinto é através de medidas acústicas corretivas, aplicadas ao ambiente.

De outra forma, pode-se utilizar um equalizador gráfico, de maior número de bandas possível, para executar esta tarefa. Entretanto, as variações em frequência decorrentes de efeitos de filtragem tipo “pente” (*comb filtering*) e de ondas estacionárias não serão possíveis de serem corrigidas pelo equalizador.

A análise dos gráficos de ganho dos setores 1, 2 e 11 (Figuras Figura 6.29, Figura 6.33 e Figura 6.36) sugere a utilização de absorvedores acústicos sintonizados (ressonador de Helmholtz, por exemplo) nas frequências de 100Hz, 400Hz e 1400Hz, bem como a redução de material absorvente de alta frequência do recinto.

7.6 Análise dos resultados dos parâmetros de qualidade acústica

Tendo em vista os resultados apresentados na Tabela 6.4 e de acordo com o exposto no item 3.4 conclui-se que os parâmetros que prejudicam a performance acústica do recinto são aqueles relacionados à calidez e a audibilidade, representados pelo fator de Baixo, BR , e o pelo fator de força, G , respectivamente.

Observa-se que o fator $M_{calidez}$ é penalizado devido a uma calidez excessiva ($BR = 1,48$), decorrente da falta de persistência dos sons de média-alta frequência no recinto enquanto que o M_G é penalizado devido a baixa audibilidade ($G = 4,13$), principalmente encontrada nas posições mais distantes da platéia. Os valores de BR e G estão presentes na Tabela 6.3.

A consonância destes dois resultados indica a existência de absorção excessiva em médias-altas frequências que acabam por aumentar o valor de BR ao mesmo tempo que prejudica a audibilidade, pois reduz o nível de pressão sonora principalmente nas posições mais afastadas do palco. Este último efeito já foi observado no item 7.2.

Por outro lado, tem-se os valores de M_{D50} e M_{C80} dentro dos seus limites preferenciais indicando boa inteligibilidade que é proporcionada, principalmente, pelas reflexões originadas

dos painéis refletores suspensos existentes no teto. O valor de $AL_{CONS}\% = 12,06\%$ encontrado no item 7.4 vem ao encontro deste resultado.

O valor de $T60 = 1,15s$, em médias frequência, também se encontra dentro dos limites esperados. De acordo com a Figura E 3 este valor de $T60$ é aquele recomendado para ambiente com programação de Teatro.

Abaixo segue algumas sugestões para melhorar a performance acústica do recinto

- 1) Reduzir a quantidade de material absorvente de média-alta frequência presente no recinto para proporcionar melhor balanço entre a reverberação em baixas e médias frequências e, conseqüentemente, melhorar a audibilidade. Entretanto, esta ação pode aumentar significativamente o tempo de reverberação, reduzindo a inteligibilidade (aumento de $AL_{CONS}\%$) o que sugere, portanto, dispor de um sistema de controle de $T60$ através da variação de volume (ver item 3.3.1).
- 2) Utilizar absorvedores sintonizados em baixa frequência (ressonador de Helmholtz), para reduzir o fator de baixo, BR, em conjunto com um sistema de reforço adequado para proporcionar maior audibilidade.
- 3) Dispor um sistema de controle de $T60$ (ver item 3.3.1), tendo em vista que se trata de um auditório de múltiplo uso, para proporcionar diferentes valores de reverberação de acordo com o uso da sala (teatro, palestra, música, etc..)

ECO

Ouvindo as respostas impulsivas gravadas nas posições em que foram feitas as medições acústicas dentro do Salão de Atos, constata-se que em algumas delas está presente o efeito sonoro conhecido como eco, discutido no item 2.13, mais precisamente no material gravado nas posições 4, 7, 8 e 11.

Baseado no gráfico da Figura 2.7, fez-se o mapeamento da área da audiência onde é possível a incidência de eco. Para tanto, foi elaborado um programa, baseado em planilha eletrônica, que calcula a diferença de nível de pressão sonora e do tempo de chegada entre o som direto emitido pelo *cluster L* esquerdo e o emitido pelo *cluster R* direito, para qualquer posição da platéia.

O programa também permite movimentar os *clusters* livremente assim como alterar o nível de pressão sonora emitido por cada um deles.

As distâncias foram tomadas a partir da planta baixa do auditório, presente no APÊNDICE A, desconsiderando a inclinação da audiência por entender-se que esta não alteraria significativamente o resultado (diferença máxima de 1,5% na distância). Ainda, foi utilizado a propagação em campo livre pois, para efeitos da produção de eco, apenas o som direto é levado em consideração.

A partir dos valores retirados do gráfico da Figura 2.7, foi construída uma curva na planilha eletrônica para a realização dos cálculos. Esta curva foi aproximada por duas equações que são mostradas no gráfico da Figura 7.1.

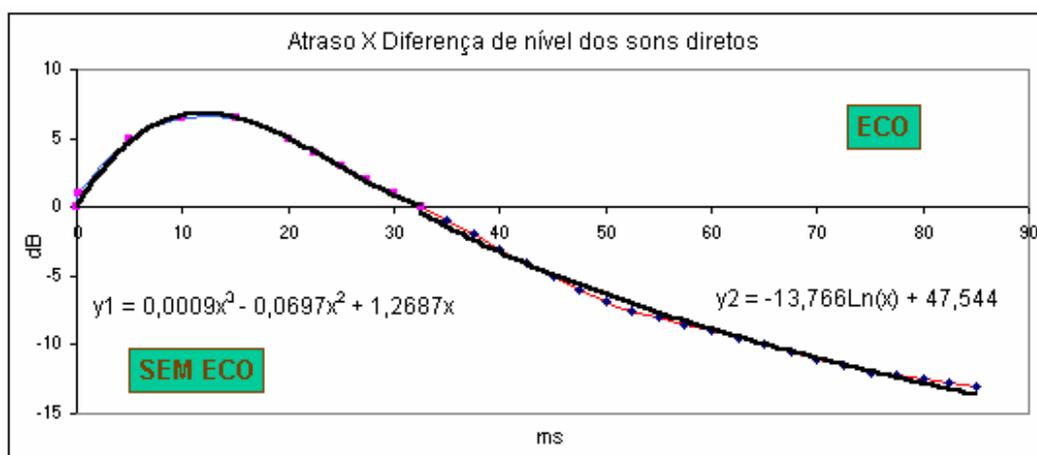


Figura 7.1 – Gráfico do atraso versus a diferença de nível de dois sons diretos, aproximado pelas equações $y1$ e $y2$, baseado no gráfico da Figura 2.7.

Neste gráfico, a equação dada por $y1$ calcula os valores de diferença de nível com atrasos de até 30,0ms. A partir de 30,0ms, a diferença de nível é calculada por $y2$. As posições cujo atraso e diferença de nível encontram-se acima desta curva são aquelas onde ocorre o efeito de eco.

O resultado, considerando a posição das caixas acústicas nas extremidades do palco emitindo sons de mesma intensidade, é mostrado na Figura 7.2 abaixo.

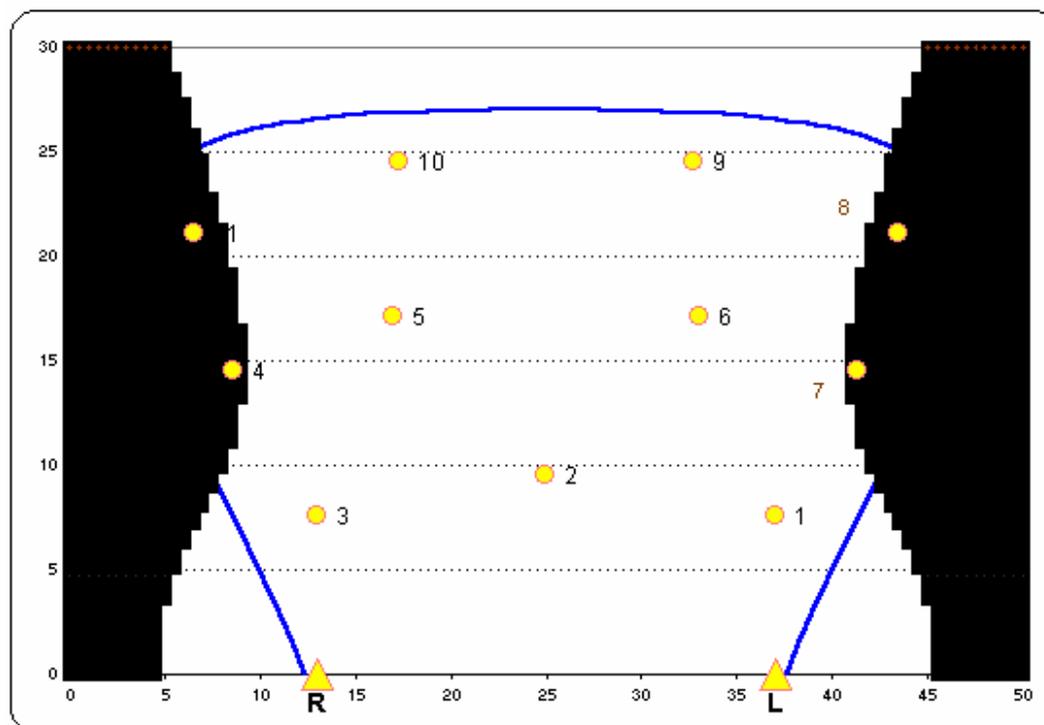


Figura 7.2 – Mapeamento do efeito de eco no Salão de Atos da UFRGS, considerando a disposição atual das caixas, ambas operando com mesmo nível de pressão sonora.

Na Figura 7.2, os círculos em amarelo indicam as posições de tomada de som, os triângulos em amarelo a posição dos *clusters* e a área em preto indica a área propensa ao efeito de eco. A linha azul marca o contorno aproximado da área da platéia e os valores dos eixos são distâncias dadas em metros.

Observa-se que as posições 4, 7, 8 e 11 encontram-se dentro da área de eco, assim como aquelas localizadas próximas às paredes laterais.

Algumas alterações em relação ao posicionamento e nível de pressão sonora (@ 1m) dos *clusters* foram feitas e os resultados são apresentados na Figura 7.3, Figura 7.4 e Figura 7.5.

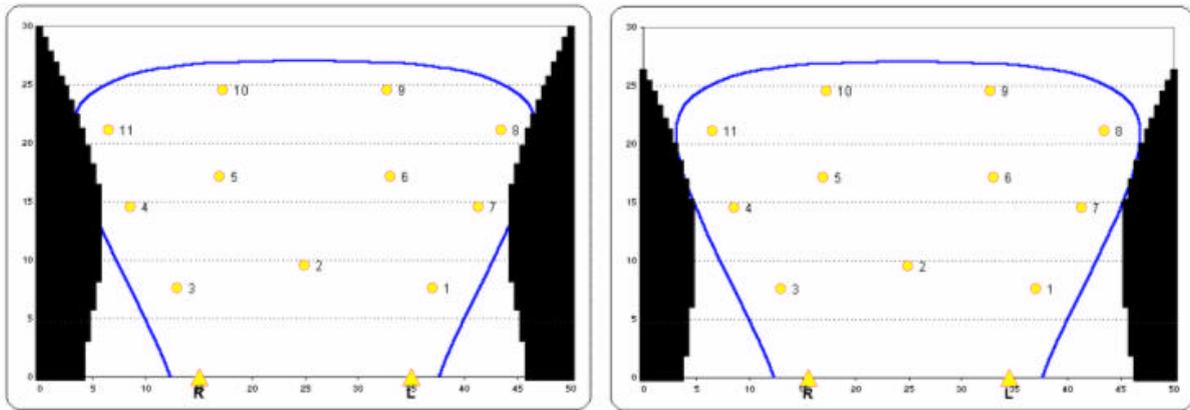


Figura 7.3 – Mapeamento do efeito de eco no ambiente com os clusters aproximados em 2m (esquerda) e 2,5m (direita) em relação a disposição original.

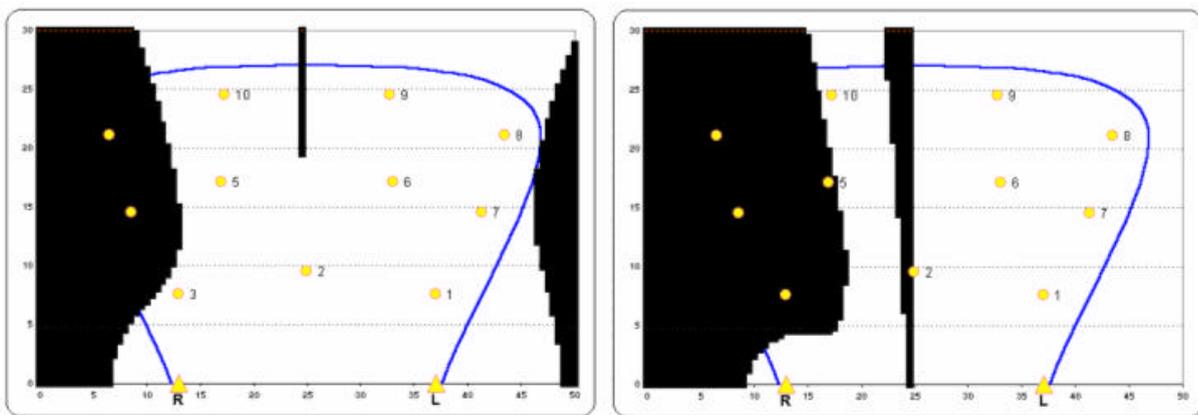


Figura 7.4 – Mapeamento de efeito de eco com os clusters na posição original. (esquerda) o nível do cluster L é 2,0 dB maior que o nível do cluster R e na (direita) é 6,0 dB maior.

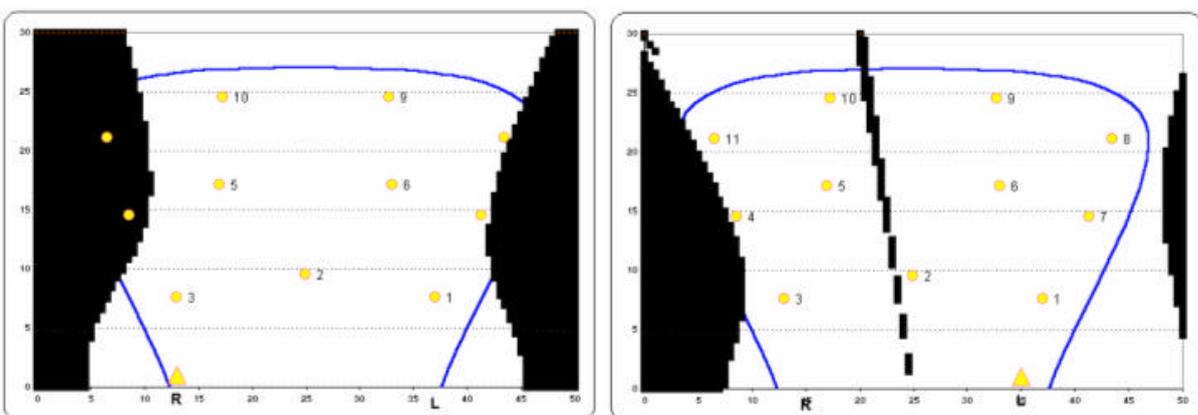


Figura 7.5 – Mapeamento do efeito de eco. (esquerda) cluster L está disposto 1m para trás e o cluster R 1m para frente em relação a posição original.(direita) o cluster L é posicionado 2m à frente com aumento de nível de 2,0 dB.

Nas Figura 7.3, os clusters são movimentados 2,0m e 2,5m cada um em direção ao centro, respectivamente. Figura 7.4 esquerda e direita, o nível do *cluster L* é 2,0dB e 6,0 dB maior que o *cluster R*, respectivamente e na Figura 7.5 esquerda, o *cluster R* é movimentado 1m para frente e o *cluster L* 1m para trás enquanto que na esquerda o *cluster R* é movimentado 1m para trás e o *cluster L* 2m para frente e o nível deste último é 3,0dB superior ao do outro.

Os resultados acima, portanto, mostram que a maneira mais simples para tornar a área da platéia livre do efeito de eco é aproximar ambos os *clusters* de 2,0 a 2,5m em direção ao centro do palco.

Outra maneira de livrar o ambiente deste efeito, além de aumentar o nível de pressão sonora total, é instalando um *cluster* central suspenso. Assim, as fontes monofônicas, tais como a voz e instrumentos solo, podem ser a ele endereçadas deixando para os *clusters* laterais a programação em estéreo. O amplificador “sobressalente” poderia ser utilizado para alimentar este *cluster*.

Por fim, sugere-se a utilização de sistemas de reforço suspenso, tipo *fly PA*, para os *clusters* laterais também com o objetivo de uniformizar o nível de pressão sonora na área de cobertura.

8. Considerações Finais

8.1 Conclusões

O presente trabalho apresentou os principais procedimentos, conceitos e técnicas relacionados ao projeto e à análise acústica de ambientes e de sistemas de áudio e, de forma a concretizar estes conceitos, analisou sob a ótica eletroacústica o Salão de Atos da UFRGS.

Nele, foram tratadas as questões da qualidade acústica de salas que, a partir de Beranek [Beranek, 1962], passam a ser definidas segundo critérios subjetivos de percepção podendo ser quantificadas através de parâmetros objetivos, ampliando a forma de avaliação acústica de ambientes que, até então, era baseada apenas em suas condições de reverberação.

Também mostrou que o dimensionamento de sistemas de áudio está intimamente relacionado às condições acústicas do recinto onde este será instalado e que, portanto, as questões acústicas e de áudio não devem ser tratadas separadamente no momento do projeto.

Mostrou ainda as diferentes técnicas de medição de resposta impulsiva e apresentou a conclusão que a técnica de varredura logarítmica de seno, elaborada por Farina, 2000, é aquela que melhor se adapta às medições acústicas pois apresenta a melhor relação sinal/ruído, principalmente em baixas frequências, e torna a medição livre de distorções que são inerentes aos transdutores eletromecânicos (alto-falantes).

Dos resultados obtidos da análise eletroacústica realizada no Salão de Atos, chegou-se às seguintes conclusões.

- O console utilizada no auditório, de acordo com as suas características e as especificações técnicas que foram levantadas, está adequada à sua aplicação.
- Os amplificadores possuem características técnicas adequadas ao tipo de aplicação e potência suficiente para cobrir a área da platéia. Entretanto, da forma como estão conectados às caixas acústicas e devido à potência máxima que estas podem dissipar antes da distorção, estão sendo subutilizados.
- O nível de pressão sonora que o sistema de reforço é capaz de produzir nas posições mais distantes do palco é suficiente para aplicações que envolvem voz e alguns tipos de música. Entretanto, para a maioria da programação musical este nível é insuficiente.
- O ganho do sistema de reforço em aplicações de voz é suficiente para oferecer boas condições de audição nas posições mais afastadas do palco. Entretanto, em situações

típicas de formaturas, nas quais o orador encontra-se muito próximo ao *cluster* esquerdo, existe a possibilidade de ocorrer microfonia, caso não sejam usados microfones direcionais e/ou periféricos supressores de microfonia.

- As caixas acústicas possuem resposta em frequência bastante irregular e limitada, com deficiências em baixas e altas frequências, que restringe seu uso a aplicações que não necessitam de larga faixa de frequências.
- De acordo com o resultado obtido no cálculo de Índice Percentual de Perda de Articulação Consonantal, $AL_{CONS}\%$, a relação de diretividade, Q , do *cluster* é suficiente para proporcionar boa inteligibilidade de voz na área de cobertura.
- De acordo com os resultados da avaliação dos parâmetros de qualidade acústica bem como os das respostas de ganho do ambiente, o recinto possui absorção excessiva em média-alta frequência, baixa audibilidade nesta mesma faixa de frequência, particularmente nas posições mais distantes da platéia, reforço em algumas bandas na faixa de baixas frequências e boas condições de inteligibilidade.
- Existem posições na área da platéia que são inevitavelmente atingidas pelo efeito de eco devido à localização atual dos *clusters*.

8.2 Sugestões para desenvolvimentos futuros

- Levantar os parâmetros referentes às condições de espaciosidade e largura da fonte
- Realizar um estudo subjetivo através de uma pesquisa de opinião com público especializado para levantar as qualidades subjetivas do auditório e compará-las com os resultados encontrados no presente trabalho [Bradley et. al., 1995, Barron, 1988].
- Fazer uma análise acústica do recinto a partir do palco para verificar as condições de reprodução de música ao vivo sem a necessidade de sistema de reforço.
- Reavaliar parâmetros realizando medições com a presença de platéia.

9. Referências Bibliográficas

Ando, Y., 1985. “*Concert Hall Acoustics*”, Spring-Verlag, Berlim.

Aoshima, N., 1981. “*Computer-Generated Pulse Signal Applied for Sound Measurement*”, Journal of Acoustical Society of America, vol. 69, n°5, pp.1484-1488.

Arau, H., 1999. “*ABC de la Acustica Arquitectonica*”, Ceac, Barcelona.

Archambeau, D., Embrechts, J.J, Stan,G.B., 2002. “*Comparison of Different Impulse Response Measurement Techniques*”, Journal of the Audio Engineering Society, vol. 50, n° 4, pp. 249-262.

Barron, M., 1988. “*Subjective Study of British Symphony Concert Halls*”, Acústica, n°1, vol 66.

Barron, M., 1993. “*Auditorium Acoustics and Architectural Design*”, E & FN Spon, London.

Bendat, J. S. e Piersol, A.G., 1971 “*Random Data: Analysis and Measurement Procedures*”, Winley-Interscience, New York.

Beraneck, L.L, 1962. “*Music, Acoustics and architecture*”, Jonh Wiley & Sons, New York.

Beraneck, L.L., 1988. “*Noise and Vibration Control*”, Cambridge, MA.

Borwick, J., 1994. “*Loundspeaker and Headphone Handbook*”, 2° ed., editado por Jonh Borwick com contribuição de especialistas.

Bradley, J.S., e Soulodre, G.A., 1995. “*Subjetive Evaluation of New Room Acoustic Measures*”, Journal of Acoustical Society of America, n°1, vol.98.

Cipriano, R.C.R., 2002. “**Acústica para Ambientes de Análise Crítica de Áudio**”, UFMG, 1º SEMEA, Sessão plenária.

Creder, H., 1996. “**Qualidade Acústica das Salas**”, Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ, Departamento de Engenharia Mecânica.

Cysne, L.F.O., 2000. “**Áudio, Engenharia e Sistemas**”, Digital Tecnologia de Áudio e Vídeo, São Paulo.

Everest, F.A, 2001. “**Master Handbook of Acoustics**”, 4º ed., McGraw-Hill, New York.

Farina, A., 2000. “ *Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion With a Swept-Sine Technique*”, Apresentado na 108ª convenção da AES, Journal of the Audio Engineering Society (abstracts), vol. 48, pp. 350.

Fielder, L. D., 2003. “**Analisis of Traditional and Reverberation-Reducing Methods of Room Equalization**”, Journal of the Audio Engineering Society, vol.51, nº ½pp. 3-26.

Fielder, L.D., 1982. “ *Dynamic-Range Requirements for Subjectively Noise-Free Reproduction of Music*”, Journal of the Audio Engineering Society, vol. 30, nº 7/8, pp. 504-511.

Gomes, M. H. de A., 1998. “**Obtenção de Parâmetros Acústicos para a Avaliação da Qualidade Acústica de Salas Através da Técnica MLS e Acústica de Raios**”, Dissertação de Mestrado, UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica.

Guimarães, G. P. Herrera C. G., Medeiros, E. B. Yehia, H. C., 2002. “**Método para Avaliação Acústica de Salas Baseado em TSP**”, UFMG, 1º SEMEA, Sessão técnica 2: Acústica.

Isbert, A.C., 1998. “**Diseno acustico de espacios arquitectonicos**”, ed. UPC, Catalunya

Landome, C. e Sandler, M., 2000. “*Applications of Binaural Processing to Surround Sound Reproduction in Large Spaces*”, ISCAS 2000 – IEEE, vol. 3, pg. 217-220.

Martins, J., 2002. “**Sistema de Reforço Sonoro com Limitação Eletrônica de Volume**”, UFMG, 1º SEMEA, Sessão técnica 3: Sistemas de Áudio.

Massarani, P. e Müller, S., 2002. “**Criação de Varreduras com Ênfase Arbitrária**”, UFMG, 1º SEMEA, Sessão técnica 2: Acústica.

Mirol, V., 2002. “**Fisiologia da Audição: Revisão e Considerações**”, UFMG, 1º SEMEA, Workshop.

Müller, S. e Massarani, P., 2002 “ **Medições da Resposta em Frequência de Sistemas de Sonorização**”, UFMG, 1º SEMEA, Sessão técnica 2: Acústica.

Nepomuceno, L.X., 1968. “**Acústica Técnica**”, Etegil, São Paulo.

Norma, B. N. do, 1998. “**A importância do Projeto Acústico como um dos Parâmetros para Obtenção da Qualidade do Espaço Edificado**”, Dissertação de Mestrado, UFRJ, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.

Olson, H.F. 1967. ” *Music, Physics and Engineering*”, Dover, New York.

Parkin, P.H. e Morgan, K., 1965. “*Assisted Resonance in the Royal Festival Hall, London*”, Journal of Sound and Vibration, vol. 2, nº 1, pp.. 74-85.

Pompei, F.J., 1999. “*The Use of Airborne Ultrasonics for Generating Audible Sound Beams*”, Journal of Acoustical Society of America, vol.47, nº 9, pg. 726-731.

Rayleigh, J.W.W., 19 45. “*The Theory of the Sound*”, vol. 1, 2º ed. Dover, New York.

Reynolds, 1981. “*Engineering Principles of Acoustics*”, Allyn & Bacon Inc. Boston.

Schroeder, M. R., 1965. " *New Method for Measuring Reverberation Time*", Journal of Acoustical Society of America, vol. 37, p.409-412.

Sette, H. e Correia, C., 2002. "**Alto-falantes e Caixas Acústicas: Características e Utilização**", UFMG, 1º SEMEA, Sessão plenária.

Souza, .C.R. de, 1997. "**Previsão de Ruído em Salas por Raios Acústicos e Ensaio Experimentais**", Dissertação de Mestrado, UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica.

Staner, Manual do Amplificador Staner 200M.

Suzuki, Y. e Asano, F., 1994. "*An Optimum Computer-Generated Pulse Signal Suitable for the Measurement of Very Long Impulse Response*", Journal of Acoustical Society of America, vol. 97, nº 2, pp. 1119-1123.

Valadares, V. M., 2002. "**Acústica de Salas de Concerto**", UFMG, 1º SEMEA, Sessão plenária.

Valle, S. do., 2003. "**Amplificadores de Potência**", Revista Áudio Música e Tecnologia, 03/2003, pp. 62-70.

Yamaha, Manual da Console Yamaha MX12/4.

Figura A 1 – Planta baixa do Salão de Atos da UFRGS com indicação das distâncias das posições de medida (setores), parlatório (quadrado azul) e assento mais distante (circulo azul). Fonte: Arquivo, UFRGS.

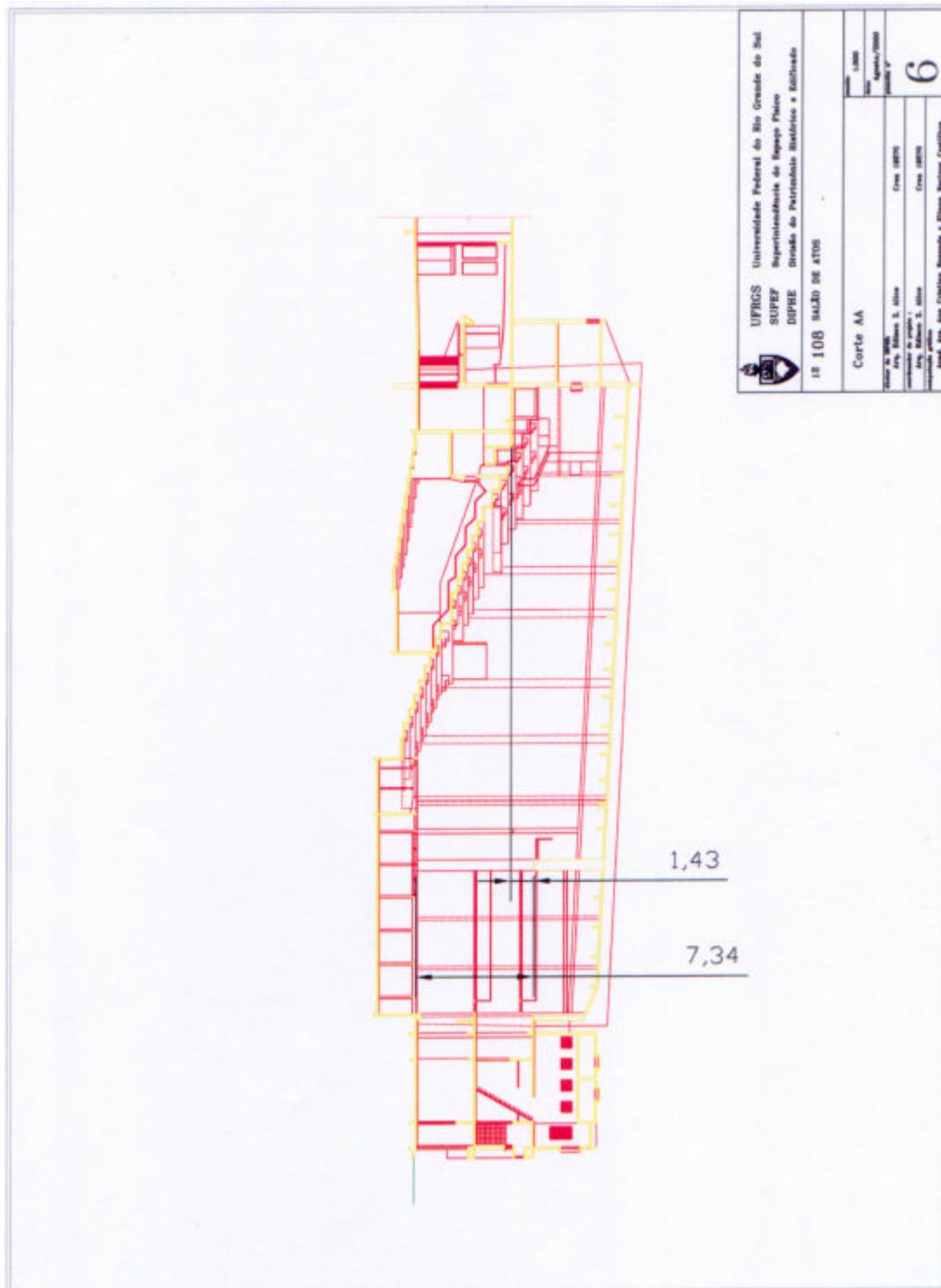


Figura A 2 – Corte AA. Fonte: Arquivo, UFRGS

APÉNDICE B

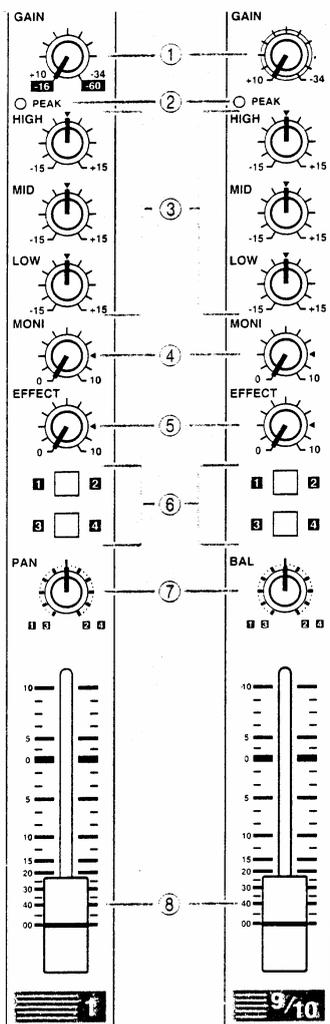
2 Panel frontal

Panel frontal

Sección de control de canales

Canales 1~8
(monoaurales)

Canales 9~12
(estéreo)



① Control de ganancia (GAIN)

Utilice este mando para ajustar la sensibilidad de acuerdo con el nivel de la señal de entrada a fin de conseguir el nivel de entrada apropiado.

Para obtener el mejor equilibrio de la relación señal/ruido y de la gama dinámica, ajuste este control de forma que el indicador de pico ② se ilumine ocasionalmente.

-60 ~ -16 indican el nivel de ajuste de entrada de MIC, y -34 ~ +10 indican el nivel de ajuste de entrada de LINE.

② Indicador de pico (PEAK)

Detecta el nivel de pico post-ecualización.

El indicador se encenderá en rojo 3dB antes del descrestamiento, advirtiendo que el nivel de descrestamiento está cercano.

③ Ecualizador

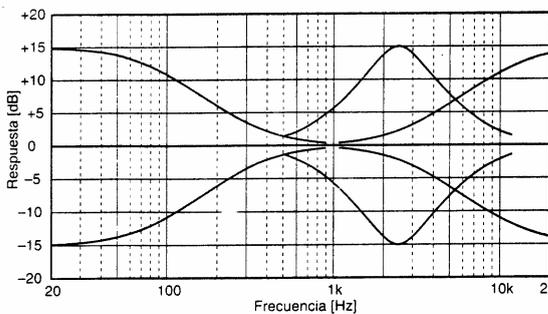
Proporciona ± 15 dB de control sobre las gamas alta, media, y baja en las frecuencias centrales siguientes.

HIGH (alta): 2kHz (aplanamiento)

MID (media): 2,5kHz (agudizamiento)

LOW (baja): 80Hz (aplanamiento)

La respuesta en frecuencia será plana cuando el control esté en la posición "▼".



④ Control de escucha (MONI)

Controla el nivel de la señal transmitida desde cada canal al bus MONI.

Como este control está situado antes del regulador de nivel de canal, regulará el nivel independientemente del ajuste del regulador de nivel de canal.

⑤ Control de efecto (EFFECT)

Controla el nivel de la señal que se transmite desde cada canal al bus EFFECT.

Especificaciones

■ Especificaciones generales

Respuesta en frecuencia	20 Hz-20 kHz, +1dB, -2dB a +4dB Control de ganancia al nivel mínimo (ST OUT, GROUP OUT, MONITOR OUT, EFFECT OUT @600Ω)	
Distorsión armónica total	<0,1 % a +14dB, 20 Hz-20 kHz (ST OUT, GROUP OUT, MONITOR OUT, EFFECT OUT @600Ω)	
Zumbido y ruido (Rs = 150Ω, 20 Hz-20 kHz)	Ruido de entrada equivalente de -128dB Ruido de salida residual de -95dB (ST OUT, GROUP OUT, MONITOR OUT, EFFECT OUT @600Ω)	
	-87dB (ST OUT/GROUP OUT)	Regulador de nivel principal al nivel nominal y reguladores de nivel de todos los canales al mínimo.
	-64dB (relación señal/ruido de 68dB) (ST OUT/GROUP OUT)	Regulador de nivel principal al nivel nominal y reguladores Regulador de nivel de un canal Control de ganancia: máximo Regulador de nivel: nominal
	-80dB (MONITOR1 OUT, EFFECT/MONITOR2 OUT)	Control de nivel principal al nivel nominal y controles de nivel de todos los canales al mínimo.
Ganancia máxima de tensión	84dB MIC IN a GROUP OUT 58dB LINE IN a GROUP OUT 90dB MIC IN a EFFECT/MONITOR2 OUT 80dB MIC IN a MONITOR1/OUT	
	-64dB (relación señal/ruido de 68dB) (MONITOR1 OUT, EFFECT/MONITOR2 OUT)	
Diatonía	Entrada adyacente de 70dB Entrada a salida de 70dB	
Control de ganancia	Variable en 44dB	
Ecuación de canal de entrada	+15dB como máximo HIGH (alta): 12 kHz (aplanamiento) MID (media): 2,5 kHz (agudamiento) LOW (baja): 80 Hz (aplanamiento) * Frecuencia de transición/atenuación progresiva de aplanamiento: 3dB por debajo del nivel variable máximo	
Medidores	LED de 12 elementos	
Indicadores de pico de canal	Cuando la señal del regulador de nivel previo al canal esté 3dB por debajo del nivel de descrestamiento, se encenderá un indicador para cada canal.	
Ecuador gráfico	7 bandas (125, 250, 500, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz) ±12dB como máximo	
Procesador de sonido digital (DSP) interno	3 tipos	
Alimentación fantasma	+48 V	
Opción	Juego para montaje en bastidor RK124	
Alimentación/consumo	EE.UU. y Canadá	120 V CA, 60 Hz, 30W
	General	220 V CA, 50 Hz, 40W
Dimensiones (An x Al x Prf)	436,2 x 83,1 x 401,2 mm	
Peso	7,0 kg	

MX12/4—Manual de instrucciones

Figura B 2 – Especificações gerais da console. Fonte: Yamaha, Manual da Console

■ Especificaciones de entrada

Conectores de entrada	Control de ganancia	Impedancia de entrada	Impedancia nominal	Nivel de entrada			Tipo de conector
				Sensibilidad ¹	Nivel nominal	Máx. antes del descrestamiento	
MIC INPUT (1-8)	MÁX MIN	5kΩ	50-600Ω	-90dB (24.5μV) -36dB (12.3mV)	-60dB (775μV) -16dB (123mV)	-40dB (7.75mV) +4dB (1.23V)	Tipo XLR3-31 ²
LINE INPUT (1-8)	MÁX MIN	50kΩ	600Ω, línea	-64dB (490μV) -10dB (245mV)	-34dB (15.5mV) +10dB (2.45V)	-14dB (155mV) +30dB (24.5V)	Toma telefónica (TRS) ²
ST INPUT (9-12)	MÁX MIN	10kΩ	600Ω, línea	-54dB (1.55mV) -10dB (245mV)	-34dB (15.5mV) +10dB (2.45V)	-14dB (155mV) +30dB (24.5V)	Toma telefónica ³
RTN (L•R)		10kΩ	600Ω, línea	-12dB (195mV)	+4dB (1.23V)	+20dB (7.75V)	Toma telefónica ³
TAPE IN (L•R)		10kΩ	600Ω, línea	-26dBV (50.1mV)	-10dBV (316mV)	+18dBV (7.75V)	Toma fono RCA
INS I/O (1-4)		10kΩ	600Ω, línea	-20dB (77.5mV)	0dB (775mV)	+20dB (7.75V)	Toma telefónica (I/O) ⁴

- Sensibilidad es el nivel más bajo que produce una salida de +4dB (1.23 V) o el nivel de salida nominal cuando la unidad está ajustada a la ganancia máxima.
- Los conectores de tipo XLR y las tomas telefónicas (TRS) (T: activo, R: pasivo, S: masa) están equilibrados.
- Las tomas telefónicas están desequilibradas.
- Las tomas telefónicas (I/O) (T: salida, R: entrada, S: masa) están desequilibradas.
 - 0dB = 0.775V de valor eficaz, 0dB V = 1V de valor eficaz

■ Especificaciones de salida

Conector de salida	Impedancia de salida	Impedancia nominal	Nivel de salida		Tipo de conector
			Nominal	Máx. antes del descrestamiento	
ST OUTPUT (L•R)	150Ω	600Ω, línea	+4dB (1.23V)	+24dB (12.3V)	Tipo XLR3-32 ¹
GROUP OUTPUT (1-4)	75Ω	600Ω, línea	+4dB (1.23V)	+20dB (7.75V)	Toma telefónica ²
MONITOR1 OUT	75Ω	600Ω, línea	+4dB (1.23V)	+20dB (7.75V)	Toma telefónica ²
SEND MONI1, EFFECT/MONI2	75Ω	600Ω, línea	+4dB (1.23V)	+20dB (7.75V)	Toma telefónica ²
C-R OUT	470Ω	10kΩ, línea	+4dB (1.23V)	+20dB (7.75V)	Toma telefónica estéreo ³
REC OUT (L•R)	600Ω	10kΩ, línea	-10dBV (316mV)	+10dBV (3.16V)	Toma fono RCA
PHONES	100Ω	40Ω, auriculares	3mW	100mW	Toma telefónica estéreo
INS I/O (1-4)	600Ω	10kΩ, línea	0dB (775mV)	+20dB (7.75V)	Toma telefónica ⁴

- Los conectores de tipo XLR están equilibrados.
- Las tomas telefónicas están desequilibradas.
- Las tomas telefónicas estéreo (T: canal izquierdo, R: canal derecho, S: masa) están desequilibradas.
- Las tomas telefónicas (I/O) (T: salida, R: entrada, S: masa) están desequilibradas.
 - 0dB = 0.775V de valor eficaz, 0dB V = 1V de valor eficaz

APÊNDICE C

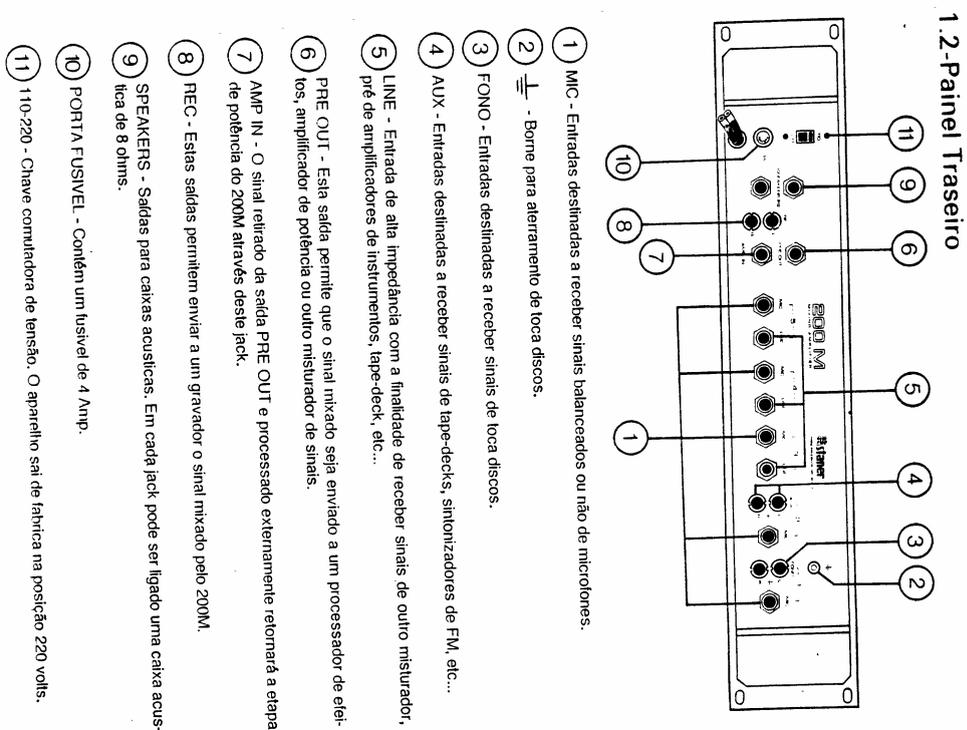
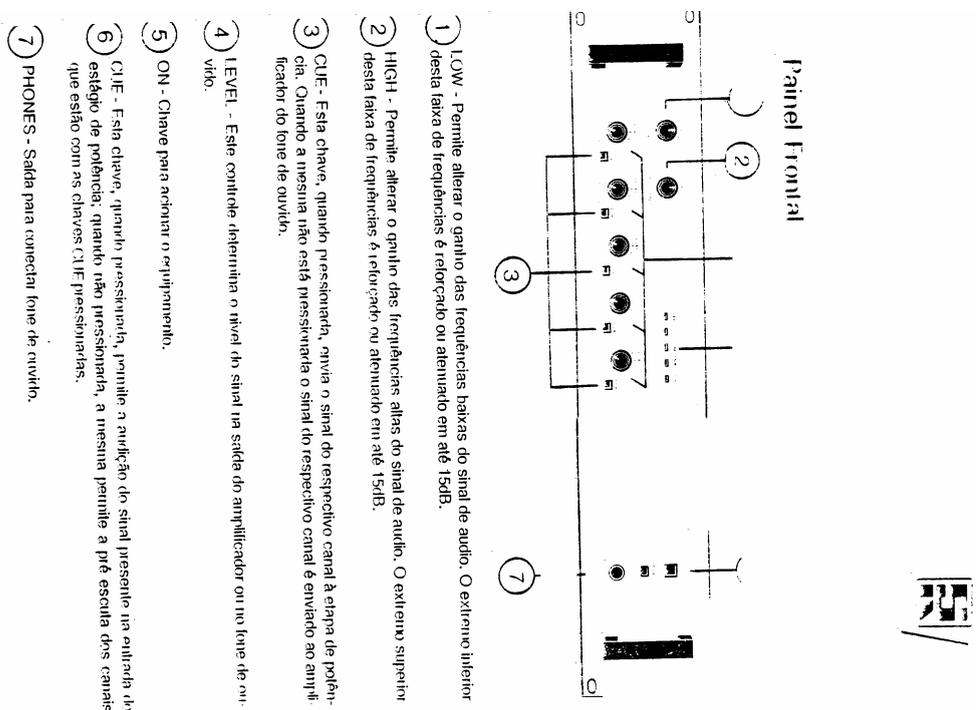


Figura C 1 – Funções dos painéis frontal e traseiro do amplificador. Fonte: Staner Manual do amplificador.



- Somente amplificador: 0,09% com 27 volts em carga de 8ohms.
- Entrada de Mic: 0,17% com as mesmas características acima.
- Somente amplificador: $\pm 0,5$ dB de 20Hz a 50KHz
- Entrada de Mic: ± 2 dB de 20Hz a 20KHz.
- 90db com canais fechados.
- 74db com 1 canal de Mic ligado.
- ± 15 dB (70Hz)
- ± 15 dB (13KHz)
- 150 WRMS - 4 ohms
- 101 WRMS - 8 ohms
- 210 mW - 8 ohms
- 482,6 x 88,5 x 275 mm
- Peso: 6,5 kgs

ESPECIFICAÇÕES DE ENTRADA			
	Impedância (ohms)	Sensibilidade	Nível Máximo sem Dist.
MIC	4K7	4,2mV/45,5dBV	82mV/ - 19,5dBV
LINE	140K	125mV/ - 16dBV	2,45V/ + 10dBV
AUX	140K	125mV/ - 16dBV	2,45V/ + 10dBV
FONO	47K	4mV - 46dBV	74mV/ - 20,5dBV
AMP IN	100K	1,55V/ + 6 dBV	1,55V/ + 6dBV

ESPECIFICAÇÕES DE SAÍDA		
	Impedância (ohms)	Nível Nominal
PRE OUT	1K	1,55V/ + 6dBV
REC	2K2	1,55V/ + 6dBV

Figura C 2 – Especificações técnicas do amplificador. Fonte: Staner, Manual do amplificador.

APÊNDICE D

Neste apêndice são apresentadas tabelas com o valor médio dos parâmetros de qualidade acústica obtidos nas medições realizadas no Salão de Atos da UFRGS.

D.1 Setor 1

Tabela D 1 – Parâmetros de qualidade acústica. Setor 1, cluster esquerdo.

CLUSTER ESQUERDO (L)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	10,87	21,38	12,04	15,42	12,10	12,21	12,38	14,10	13,16	6,95	12,58	12,72
C50 [dB]	-3,33	-0,01	0,48	8,57	10,26	6,70	12,97	13,69	16,89	11,73	9,88	10,66
C80 [dB]	2,68	4,32	5,83	9,79	11,73	8,29	14,74	15,46	18,62	14,15	11,58	12,27
D50 [%]	31,74	49,92	52,77	87,79	91,38	82,39	95,19	95,90	98,00	93,71	90,68	92,09
Tc [ms]	129,5	76,49	67,94	30,13	21,57	34,73	11,01	8,60	4,59	13,70	18,94	16,32
EDT [s]	0,00	0,69	0,57	0,51	0,23	0,88	0,18	0,14	--	0,20	0,38	0,33
T60 [s]	2,09	1,91	1,67	1,69	1,23	1,06	1,02	0,99	1,88	--	1,40	1,09
Br [ad.]											1,46	

Tabela D 2 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 1, cluster direito.

CLUSTER DIREITO (R)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	10,87	15,66	9,08	10,27	7,42	11,29	4,28	0,72	-4,89	-10,28	5,07	4,75
C50 [dB]	-10,40	-8,84	-2,58	-1,24	2,19	1,64	1,19	-1,21	0,13	2,27	0,86	0,89
C80 [dB]	-2,86	-6,47	-1,54	-0,11	4,10	4,35	3,20	1,40	3,02	5,55	3,35	3,42
D50 [%]	8,37	11,57	35,59	42,93	62,33	59,34	56,83	43,06	50,75	62,76	54,92	55,11
Tc [ms]	258,1	206,1	137,0	100,5	69,31	58,79	67,71	76,52	67,30	64,94	67,95	65,86
EDT [s]	3,77	2,11	1,70	1,39	1,16	0,93	1,00	0,93	0,83	0,72	0,99	0,95
T60 [s]	--	2,01	1,79	1,63	1,26	1,08	1,10	1,34	2,13	--!	1,60	1,34
Br [ad.]											1,454	

Tabela D 3 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 1, ambos clusters.

AMBOS CLUSTERS (ST)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
C50 [dB]	-4,59	-0,21	-1,55	6,11	7,46	4,16	10,76	11,00	12,78	8,34	7,24	7,81
C80 [dB]	1,05	4,73	3,13	8,18	10,22	6,28	12,44	12,58	14,40	10,58	9,11	9,58
D50 [%]	25,79	48,82	41,17	80,33	84,77	72,27	92,25	92,64	95,00	87,21	84,13	85,81
Tc [ms]	144,5	78,96	83,06	39,24	27,82	45,74	14,68	12,76	8,21	22,44	27,44	24,57
G [dB]	9,67	19,18	11,09	13,76	10,53	10,85	10,56	12,31	11,24	5,07	10,88	10,99
S/R [dB]	25,35	30,16	38,07	44,28	57,57	57,79	62,37	56,63	44,81	29,92	48,87	54,60

D.2 Setor 2

Tabela D 4 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 2, cluster esquerdo.

CLUSTER ESQUERDO (L)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	12,17	14,22	8,69	8,69	5,50	9,13	3,88	5,67	0,78	-6,06	5,83	5,70
C50 [dB]	-12,83	-0,90	-1,48	0,42	-0,16	3,68	2,52	4,62	4,23	5,52	2,56	2,78
C80 [dB]	-8,54	-0,29	2,46	2,57	2,53	4,91	4,98	6,96	6,42	7,55	4,55	4,81
D50 [%]	4,95	44,82	41,57	52,41	49,09	70,02	64,09	74,35	72,59	78,10	64,33	65,48
Tc [ms]	214,8	154,5	98,94	83,78	77,25	51,70	52,16	36,13	39,12	34,88	55,44	52,71
EDT [s]	1,95	2,66	1,56	1,35	1,21	1,17	0,98	0,90	0,80	0,87	1,08	1,05
T60 [s]	2,09	--	1,96	1,66	1,29	1,05	1,02	1,20	2,20	--	1,68	1,23
Br [ad.]											1,549	

Tabela D 5 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 2, cluster direito.

CLUSTER DIREITO (R)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	15,40	18,18	10,63	10,75	7,33	13,58	6,33	3,52	-0,79	-8,70	7,05	6,89
C50 [dB]	-12,39	-0,75	-2,75	0,43	-0,19	3,86	2,52	2,88	4,10	3,07	2,79	3,05
C80 [dB]	-8,63	0,69	0,57	1,78	1,69	5,83	4,67	4,83	6,03	5,23	4,78	5,08
D50 [%]	5,45	45,69	34,68	52,48	48,92	70,84	64,10	66,00	71,99	66,94	65,51	66,86
Tc [ms]	219,2	145,8	115,7	87,75	82,33	45,37	54,13	49,80	38,76	52,46	52,57	49,66
EDT [s]	1,89	2,39	1,52	1,47	1,25	1,01	1,01	1,02	0,89	0,83	1,07	1,03
T60 [s]	2,14	2,07	1,82	1,65	1,27	1,05	1,04	1,28	2,12	--	1,66	1,30
Br [ad.]											1,498	

Tabela D 6 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 2, ambos clusters.

AMBOS CLUSTERS (ST)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
C50 [dB]	-12,68	-1,02	-3,02	-1,49	0,80	3,23	3,29	4,11	4,94	5,45	2,78	3,12
C80 [dB]	-8,58	-0,21	0,72	1,22	2,21	4,91	5,59	6,53	6,82	7,51	4,68	5,11
D50 [%]	5,12	44,14	33,29	41,50	54,58	67,78	68,06	72,02	75,72	77,80	65,48	67,24
Tc [ms]	210,4	150,3	114,7	100,3	76,82	52,92	48,60	40,17	34,31	35,42	54,32	50,50
G [dB]	14,71	16,46	9,32	7,18	4,84	8,96	3,61	5,32	1,67	-6,35	5,63	5,53
S/R [dB]	24,71	26,79	32,97	37,44	53,16	59,38	57,21	50,40	35,59	18,82	42,41	50,07

D.3 Setor 3

Tabela D 7 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 3, cluster esquerdo.

CLUSTER ESQUERDO (L)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	7,62	12,30	7,45	5,92	5,85	7,03	1,40	1,65	-3,58	-6,51	3,76	3,39
C50 [dB]	-11,00	-12,06	-3,38	-2,62	2,47	0,77	1,79	-0,39	1,20	6,10	1,18	1,24
C80 [dB]	-2,15	-10,12	-1,22	-0,49	4,84	3,99	4,10	2,94	4,42	9,47	3,99	4,11
D50 [%]	7,41	5,86	31,49	35,34	63,86	54,41	60,16	47,76	56,88	80,28	56,77	57,07
Tc [ms]	206,8	220,7	124,0	108,5	57,79	63,15	59,69	69,13	58,49	40,63	63,84	62,16
EDT [s]	--	2,00	1,72	1,27	0,95	0,89	0,99	0,82	0,78	0,53	0,93	0,91
T60 [s]	--	2,02	1,86	1,69	1,24	1,06	1,03	1,30	2,25	--	1,60	1,28
Br [ad.]											1,541	

Tabela D8 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 3, cluster direito.

CLUSTER DIREITO (R)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	16,16	25,24	12,82	17,20	12,51	15,18	14,44	12,00	8,44	2,66	12,99	13,11
C50 [dB]	-4,08	-0,30	-0,52	7,45	7,65	7,04	11,78	11,94	13,57	13,17	8,97	9,71
C80 [dB]	1,95	5,48	3,69	9,76	9,87	8,28	13,49	13,57	15,66	14,84	10,70	11,37
D50 [%]	28,09	48,26	47,02	84,76	85,33	83,48	93,78	93,99	95,79	95,40	88,76	90,34
Tc [ms]	135,3	82,68	84,21	34,81	27,08	32,67	13,51	12,29	7,68	11,78	21,85	18,77
EDT [s]	2,34	1,12	1,06	0,47	0,64	0,94	0,21	0,21	--	0,15	0,49	0,40
T60 [s]	2,39	1,96	1,84	1,79	1,28	1,04	1,01	1,00	2,12	--	1,64	1,16
Br [ad.]											1,563	

Tabela D 9 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 3, ambos clusters.

AMBOS CLUSTERS (ST)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
C50 [dB]	-5,91	-1,36	-5,45	3,29	1,03	0,86	6,09	6,78	9,26	7,09	3,25	3,95
C80 [dB]	-0,46	3,69	-1,59	5,39	3,81	3,04	8,66	8,61	11,74	11,85	5,60	6,30
D50 [%]	20,42	42,25	22,19	68,05	55,91	54,91	80,25	82,63	89,41	83,67	67,87	71,29
Tc [ms]	173,0	101,7	125,1	56,44	60,85	65,11	29,21	25,60	14,31	24,83	46,58	41,19
G [dB]	10,25	18,73	8,88	10,59	7,19	8,71	6,89	9,37	8,00	1,05	8,00	8,03
S/R [dB]	16,97	32,30	32,50	34,83	55,74	58,59	60,22	54,10	41,51	25,81	45,50	52,05

D.4 Setor 4

Tabela D 10 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 4, cluster esquerdo.

CLUSTER ESQUERDO (L)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	5,14	9,88	1,83	3,70	1,28	4,90	-0,36	0,52	-3,87	-6,59	1,46	1,30
C50 [dB]	-13,57	-6,17	-7,03	-7,41	-0,06	1,52	0,73	-2,66	-0,71	2,61	0,05	0,11
C80 [dB]	-8,91	-2,49	-3,60	0,43	2,02	4,07	4,28	3,05	3,85	5,84	3,38	3,60
D50 [%]	4,21	19,45	16,55	15,37	49,64	58,64	54,20	35,16	45,90	64,57	50,30	50,61
Tc [ms]	268,7	160,6	156,5	105,8	77,43	60,83	65,82	71,91	64,12	84,33	70,06	68,25
EDT [s]	2,45	2,43	1,75	1,16	1,00	1,00	0,88	0,76	0,72	0,81	0,94	0,92
T60 [s]	--	2,18	1,84	1,64	1,29	1,09	1,14	1,50	--	--	1,69	1,54
Br [ad.]											1,464	

Tabela D 11 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 4, cluster direito.

CLUSTER DIREITO (R)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	12,82	18,35	7,86	8,72	7,00	10,77	5,25	4,91	2,02	-4,67	6,01	5,90
C50 [dB]	-8,77	-5,28	-0,78	1,26	5,81	4,66	4,55	6,91	10,20	7,85	5,31	5,50
C80 [dB]	-5,75	1,95	1,02	3,04	7,42	6,23	6,29	8,37	11,79	9,25	7,02	7,14
D50 [%]	11,72	22,86	45,52	57,21	79,20	74,52	74,05	83,07	91,27	85,89	77,26	78,00
Tc [ms]	183,5	118,7	121,3	75,27	40,54	45,16	46,04	27,39	14,39	42,35	39,22	37,71
EDT [s]	1,76	1,91	1,77	1,48	1,07	1,42	1,18	1,12	--	--	1,25	1,22
T60 [s]	1,98	1,88	1,73	1,62	1,27	1,09	1,10	1,33	2,26	--	1,57	1,44
Br [ad.]											1,425	

Tabela D 12 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 4, ambos clusters.

AMBOS CLUSTERS (ST)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
C50 [dB]	-4,56	-0,21	-1,55	6,11	7,46	4,16	10,76	11,00	12,78	8,34	7,24	7,81
C80 [dB]	1,07	4,73	3,13	8,18	10,22	6,28	12,44	12,58	14,40	10,59	9,11	9,58
D50 [%]	25,91	48,83	41,18	80,33	84,77	72,27	92,25	92,64	95,00	87,22	84,13	85,81
Tc [ms]	144,1	78,89	83,04	39,24	27,82	45,74	14,68	12,76	8,21	22,32	27,44	24,57
G [dB]	2,16	11,69	3,59	6,26	3,03	3,35	3,06	4,81	3,74	-2,44	3,38	3,49
S/R [dB]	25,46	29,94	38,62	44,06	57,59	58,08	62,53	56,75	44,95	29,97	49,10	54,77

D.5 Setor 5

Tabela D 13 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 5, cluster esquerdo.

CLUSTER ESQUERDO (L)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	7,92	11,48	2,72	4,95	3,27	5,24	0,67	1,77	-2,12	-5,09	2,49	2,33
C50 [dB]	-13,07	-2,91	-9,51	-1,21	0,44	0,56	2,17	1,22	2,47	3,97	0,69	0,90
C80 [dB]	-4,54	-0,29	-2,99	1,43	3,89	4,13	5,06	4,18	5,56	6,89	4,13	4,28
D50 [%]	4,71	33,85	10,08	43,08	52,58	53,25	62,23	57,00	63,84	71,37	53,96	55,13
Tc [ms]	198,3	141,3	173,5	94,50	62,02	64,89	53,25	58,12	49,81	71,14	63,97	61,93
EDT [s]	2,46	1,97	2,02	1,26	0,77	1,02	1,01	0,96	0,80	0,82	0,99	0,98
T60 [s]	1,92	1,76	1,82	1,62	1,26	1,07	1,06	1,32	2,28	--	1,52	1,34
Br [ad.]											1,479	

Tabela D 14 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 5, cluster direito.

CLUSTER DIREITO (R)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	13,83	17,42	7,92	8,48	7,01	9,77	4,61	5,09	1,48	0,21	5,69	5,52
C50 [dB]	-12,85	-2,84	-0,89	0,94	5,21	2,93	3,62	5,27	4,60	4,85	3,16	3,21
C80 [dB]	-7,76	3,12	2,59	3,79	6,71	5,57	6,07	7,02	6,66	6,31	5,47	5,60
D50 [%]	4,94	34,21	44,88	55,36	76,86	66,28	69,73	77,11	74,25	75,31	67,42	67,68
Tc [ms]	173,0	108,2	101,1	75,64	37,85	52,77	46,07	35,77	39,27	72,54	51,10	49,77
EDT [s]	1,23	1,64	1,35	1,18	1,06	1,09	1,00	1,02	0,94	1,21	1,05	1,03
T60 [s]	--	2,05	1,83	1,62	1,27	1,08	1,14	1,43	2,37	--	1,67	1,52
Br [ad.]											1,468	

Tabela D 15 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 5, ambos clusters.

AMBOS CLUSTERS (ST)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
C50 [dB]	-13,38	-4,31	-5,94	-1,83	1,47	-0,11	2,81	3,76	3,78	6,10	1,50	1,75
C80 [dB]	-10,68	4,69	-1,08	0,58	4,32	3,10	5,09	5,64	6,06	8,25	4,36	4,52
D50 [%]	4,40	27,06	20,29	39,63	58,35	49,38	65,60	70,39	70,49	80,31	58,55	59,92
Tc [ms]	199,9	105,0	129,0	108,0	60,37	71,34	57,34	47,37	45,36	68,05	63,19	61,24
G [dB]	7,16	14,04	4,07	3,68	3,26	4,79	0,23	3,82	1,80	-1,03	2,74	2,57
S/R [dB]	15,84	24,90	28,24	33,99	49,82	52,99	50,27	43,43	27,93	16,28	36,13	39,99

D.6 Setor 6

Tabela D 16 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 6, cluster esquerdo.

CLUSTER ESQUERDO (L)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	5,92	11,08	2,47	2,73	1,40	6,18	-2,11	1,84	0,65	-3,43	2,00	1,62
C50 [dB]	-11,73	-3,55	-2,04	1,75	5,98	6,32	1,87	5,34	7,72	5,28	4,61	4,31
C80 [dB]	-5,83	3,14	1,18	4,18	7,79	7,69	3,98	7,05	9,75	6,57	6,34	6,11
D50 [%]	6,29	30,65	38,50	59,93	79,84	81,09	60,62	77,38	85,55	77,13	74,30	72,98
Tc [ms]	170,3	105,0	101,2	72,09	36,03	32,30	61,10	37,57	24,53	79,00	42,08	43,76
EDT [s]	1,30	1,39	1,25	1,35	1,06	1,00	1,14	0,99	0,70	1,26	1,09	1,09
T60 [s]	1,92	--	1,82	1,58	1,28	1,06	1,10	1,41	2,46	--	1,59	1,43
Br [ad.]											1,458	

Tabela D 17 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 6, cluster direito.

CLUSTER DIREITO (R)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	11,11	15,38	5,43	7,37	4,47	7,12	2,11	0,81	-2,20	-7,70	2,48	2,26
C50 [dB]	-12,86	-3,18	-9,59	-1,51	0,73	0,37	1,06	2,54	5,85	4,40	1,10	1,27
C80 [dB]	-4,57	0,96	-4,81	2,02	3,84	3,51	4,10	5,46	8,18	7,27	4,02	4,23
D50 [%]	4,93	32,45	9,90	41,40	54,21	52,13	56,06	64,22	79,35	73,36	56,31	57,24
Tc [ms]	200,5	129,7	178,0	97,12	68,28	70,40	63,70	46,72	27,28	68,68	63,23	60,45
EDT [s]	2,23	2,12	2,13	1,37	1,00	1,06	1,06	1,00	0,98	0,99	1,05	1,04
T60 [s]	2,00	2,00	1,80	1,59	1,29	1,13	1,18	1,45	2,42	--	1,66	1,54
Br [ad.]											1,400	

Tabela D 18 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 6, ambos clusters.

AMBOS CLUSTERS (ST)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
C50 [dB]	-11,05	-4,93	-3,99	-1,96	3,21	5,05	1,38	3,41	6,54	5,52	3,40	3,21
C80 [dB]	-8,21	5,39	0,52	0,91	5,59	6,54	3,66	5,28	8,29	7,55	5,27	5,09
D50 [%]	7,27	24,31	28,53	38,88	67,70	76,20	57,89	68,68	81,83	78,10	68,65	67,71
Tc [ms]	232,0	93,02	113,8	97,45	49,36	40,73	66,43	48,73	32,85	70,14	51,26	52,48
G [dB]	5,56	13,77	4,54	4,03	2,31	6,68	-0,76	2,98	2,16	-2,66	2,87	2,53
S/R [dB]	16,03	21,79	30,75	32,82	49,58	54,69	49,29	42,82	28,49	14,80	36,18	40,11

D.7 Setor 7

Tabela D 19 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 7, cluster esquerdo.

CLUSTER ESQUERDO (L)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	7,47	13,00	4,50	4,79	0,70	6,35	-0,37	1,02	-4,74	-11,80	2,29	2,01
C50 [dB]	-9,12	-2,82	-1,56	0,93	0,76	4,16	2,00	2,96	1,65	-0,57	2,98	2,90
C80 [dB]	-6,28	4,12	-0,14	2,48	2,97	5,59	4,05	4,84	3,59	1,06	4,66	4,62
D50 [%]	10,93	34,32	41,14	55,32	54,37	72,27	61,30	66,43	59,39	46,72	66,52	66,11
Tc [ms]	188,1	111,8	119,4	81,71	79,82	46,64	62,64	54,79	67,34	204,4	56,52	56,39
EDT [s]	1,50	--	1,46	1,55	1,57	1,54	1,37	1,35	1,23	--	1,44	1,42
T60 [s]	2,18	2,22	1,81	1,68	1,31	1,07	1,15	1,55	--	--	1,71	1,58
Br [ad.]											1,458	

Tabela D 20 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 7, cluster direito.

CLUSTER DIREITO (R)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	8,42	14,02	3,03	4,72	2,55	7,26	0,86	-1,69	-7,25	-12,59	1,22	0,97
C50 [dB]	-12,99	-5,50	-6,41	-3,54	-3,70	1,07	1,16	-0,92	-1,97	-0,61	-0,08	0,16
C80 [dB]	-7,92	-0,47	-4,79	-0,59	1,67	4,08	4,78	3,61	3,78	3,32	3,57	3,79
D50 [%]	4,81	21,98	18,61	30,70	29,89	56,09	56,66	44,72	38,85	46,48	49,53	50,91
Tc [ms]	276,3	153,0	168,8	117,6	82,08	59,14	64,15	66,18	69,26	160,7	67,70	65,46
EDT [s]	2,87	2,05	1,83	1,51	0,90	1,01	0,91	0,82	0,71	--!	0,95	0,93
T60 [s]	1,86	1,90	1,75	1,54	1,24	1,09	1,18	1,41	2,30	--!	1,62	1,49
Br [ad.]											1,411	

Tabela D 21 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 7, ambos clusters.

AMBOS CLUSTERS (ST)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
C50 [dB]	-11,89	-5,15	-3,96	-2,03	-2,02	2,07	-0,24	-0,14	-2,37	-3,36	0,57	0,53
C80 [dB]	-9,72	-0,50	-2,18	0,54	-0,40	3,86	2,72	2,10	0,11	-0,25	2,72	2,81
D50 [%]	6,09	23,40	28,67	38,54	38,61	61,67	48,63	49,18	36,67	31,57	53,27	53,04
Tc [ms]	223,6	136,2	144,2	103,7	99,10	60,46	73,66	74,39	88,45	229,6	71,77	70,83
G [dB]	6,84	11,93	3,45	3,65	0,07	4,65	-1,84	0,11	-4,79	-11,91	0,84	0,55
S/R [dB]	13,87	22,48	27,31	34,51	48,90	51,76	48,21	39,56	21,02	4,98	34,34	37,60

D.8 Setor 8

Tabela D 22 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 8, cluster esquerdo.

CLUSTER ESQUERDO (L)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	5,17	10,77	1,24	2,65	-1,24	4,58	1,60	1,51	-1,92	-6,42	2,33	2,41
C50 [dB]	-6,87	-4,87	-1,00	-0,68	-1,04	4,76	6,66	5,45	7,33	6,85	5,28	5,65
C80 [dB]	-1,40	0,83	1,43	1,74	1,20	6,40	8,40	6,97	8,96	8,00	6,90	7,29
D50 [%]	17,04	24,59	44,30	46,10	44,04	74,94	82,26	77,79	84,39	82,87	77,13	78,59
Tc [ms]	186,4	132,2	101,2	95,73	91,19	47,53	33,57	40,96	30,75	59,14	42,14	39,53
EDT [s]	3,11	1,67	1,36	1,63	1,50	1,10	--	1,10	--	--	1,13	1,07
T60 [s]	2,00	2,01	1,82	1,58	1,26	1,08	1,07	1,41	2,45	--	1,61	1,45
Br [ad.]											1,456	

Tabela D 23 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 8, cluster direito.

CLUSTER DIREITO (R)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	6,15	13,99	1,21	6,78	1,27	6,79	1,25	-3,30	-7,34	-11,68	0,86	0,67
C50 [dB]	-14,45	-9,81	-2,53	2,36	3,29	5,76	4,64	1,12	1,82	2,15	4,15	4,28
C80 [dB]	-5,64	0,56	1,15	3,45	5,47	7,74	6,82	4,19	5,96	4,67	6,46	6,61
D50 [%]	3,49	9,46	35,81	63,25	68,10	79,02	74,43	56,40	60,35	62,13	72,21	72,82
Tc [ms]	272,2	132,5	129,3	63,86	56,14	35,83	43,25	63,54	55,74	128,7	46,53	44,81
EDT [s]	2,99	1,81	2,10	0,91	1,07	0,74	0,76	0,94	0,72	--	0,84	0,82
T60 [s]	--	1,98	1,89	1,66	1,32	1,12	1,20	1,48	2,39	--	1,73	1,58
Br [ad.]											1,455	

Tabela D 24 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 8, ambos clusters.

AMBOS CLUSTERS (ST)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
C50 [dB]	-10,12	-9,14	-3,05	-3,02	-2,84	2,70	3,59	2,35	3,22	4,73	2,72	3,07
C80 [dB]	-5,16	-4,68	-0,32	0,85	2,04	5,79	7,25	4,97	5,77	6,83	5,91	6,31
D50 [%]	8,87	10,87	33,11	33,29	34,19	65,04	69,57	63,23	67,73	74,79	65,17	66,98
Tc [ms]	220,5	148,1	117,2	107,7	89,17	54,89	42,90	54,78	48,19	83,80	51,89	49,11
G [dB]	5,16	11,58	-0,04	1,53	-2,39	3,42	-0,12	-0,07	-3,19	-8,02	0,84	0,88
S/R [dB]	17,69	24,57	26,24	31,79	45,49	52,11	51,01	41,09	24,51	10,24	36,84	39,85

D.9 Setor 9

Tabela D 25 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 9, cluster esquerdo.

CLUSTER ESQUERDO (L)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	5,29	9,93	2,97	4,89	4,30	4,10	2,87	3,79	1,96	-2,03	3,32	3,33
C50 [dB]	-8,37	-4,06	-1,15	1,56	5,99	2,35	7,13	7,21	9,77	9,11	4,63	4,92
C80 [dB]	-2,61	3,16	1,52	6,01	7,74	3,88	8,29	8,92	11,32	10,36	6,08	6,29
D50 [%]	12,76	28,23	43,39	58,87	79,88	63,23	83,80	84,03	90,47	89,07	74,39	75,63
Tc [ms]	177,9	110,8	105,6	63,91	35,86	61,88	29,57	28,80	20,08	36,01	43,72	42,00
EDT [s]	2,26	1,26	1,51	0,95	0,83	1,12	0,84	0,76	--	--	0,99	0,97
T60 [s]	--	1,98	1,68	1,57	1,24	1,07	1,02	1,26	2,23	--	1,45	1,30
Br [ad.]											1,403	

Tabela D 26 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 9, cluster direito.

CLUSTER DIREITO (R)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	9,53	13,17	4,56	7,08	3,80	7,52	1,62	1,62	-0,83	-6,01	2,74	2,52
C50 [dB]	-11,07	-7,64	-3,70	1,25	3,48	2,01	2,47	5,86	8,74	6,67	3,42	3,54
C80 [dB]	-3,87	-4,72	0,29	3,68	6,07	5,07	5,87	8,10	11,24	8,55	6,11	6,23
D50 [%]	7,27	14,70	29,91	57,17	69,01	61,37	63,86	79,42	88,20	82,30	68,71	69,34
Tc [ms]	188,3	149,7	105,6	72,91	53,41	54,60	51,89	33,32	18,67	58,45	47,63	46,28
EDT [s]	2,21	1,71	1,29	1,23	0,92	0,76	0,82	0,74	0,58	0,93	0,79	0,79
T60 [s]	--	1,99	1,85	1,64	1,29	1,13	1,17	1,41	2,36	--	1,65	1,51
Br [ad.]											1,443	

Tabela D 27 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 9, ambos cluster s.

AMBOS CLUSTERS (ST)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
C50 [dB]	-11,31	-4,97	-5,53	-0,99	4,57	1,17	5,90	5,80	8,75	9,19	3,79	4,03
C80 [dB]	-7,58	2,20	-2,97	2,71	7,11	2,92	7,56	8,15	10,69	10,80	5,59	5,81
D50 [%]	7,00	24,17	21,87	44,35	74,10	56,71	79,55	79,16	88,24	89,25	70,54	71,68
Tc [ms]	204,3	121,2	125,9	81,80	43,65	68,82	35,51	36,26	26,52	46,73	49,47	47,61
G [dB]	4,20	10,50	1,55	3,43	2,79	3,38	1,02	2,97	1,94	-3,22	2,13	2,07
S/R [dB]	14,11	24,19	29,74	34,21	49,57	50,77	51,83	43,15	28,79	14,51	37,59	40,21

D.10 Setor 10

Tabela D 28 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 10, cluster esquerdo.

CLUSTER ESQUERDO (L)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	6,45	9,63	3,20	5,88	0,64	4,05	0,33	1,49	-3,05	-4,08	1,48	1,41
C50 [dB]	-12,08	-7,88	-0,34	1,24	-0,12	1,09	3,88	4,40	3,65	8,48	2,33	2,75
C80 [dB]	-4,89	-5,67	4,05	3,39	3,70	4,86	7,09	6,69	6,77	10,36	5,67	6,00
D50 [%]	5,85	14,02	48,06	57,12	49,29	56,25	70,95	73,36	69,87	87,56	63,09	65,31
Tc [ms]	191,5	159,5	76,90	68,58	71,28	58,98	42,47	39,80	42,66	38,49	52,13	49,28
EDT [s]	2,08	1,52	0,82	0,84	1,08	0,71	0,80	0,85	0,77	--	0,81	0,79
T60 [s]	--	2,04	1,92	1,64	1,25	1,07	1,07	1,39	2,42	--	1,62	1,44
Br [ad.]											1,537	

Tabela D 29 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 10, cluster direito.

CLUSTER DIREITO (R)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	9,46	13,14	6,85	8,09	3,84	8,78	3,75	3,89	0,83	-2,45	4,32	4,33
C50 [dB]	-8,94	-3,80	-0,59	0,34	2,36	4,30	5,43	7,29	9,79	9,90	5,05	5,49
C80 [dB]	-3,69	2,38	1,88	5,40	4,65	7,12	6,97	9,33	11,83	11,30	7,19	7,50
D50 [%]	11,37	29,40	46,63	51,97	63,29	72,93	77,71	84,29	90,51	90,72	76,20	77,95
Tc [ms]	200,7	133,3	98,59	66,78	58,94	42,94	39,48	25,88	17,35	31,50	39,15	36,53
EDT [s]	2,51	2,63	1,53	0,94	1,16	0,79	0,94	0,71	--	--	0,87	0,86
T60 [s]	--	2,01	1,81	1,65	1,30	1,12	1,16	1,43	2,46	--	1,70	1,56
Br [ad.]											1,430	

Tabela D 30 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 10, ambos clusters.

AMBOS CLUSTERS (ST)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
C50 [dB]	-14,24	-5,61	-3,28	-1,61	0,60	1,20	3,27	5,08	7,42	9,84	2,66	3,01
C80 [dB]	-10,01	0,49	-1,52	2,16	3,43	4,70	6,32	7,24	9,89	11,79	5,55	5,92
D50 [%]	3,63	21,56	31,96	40,85	53,45	56,86	68,01	76,29	84,67	90,60	64,83	66,66
Tc [ms]	208,2	130,2	115,7	82,62	69,42	60,90	51,23	38,41	25,85	38,95	53,66	51,04
G [dB]	5,73	10,10	2,21	4,81	0,25	3,54	-0,68	2,65	1,06	-2,79	1,31	1,26
S/R [dB]	11,60	24,38	31,59	34,42	47,95	52,42	50,37	43,48	28,64	15,61	36,42	40,08

D.11 Setor 11

Tabela D 31 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 11, cluster esquerdo.

CLUSTER ESQUERDO (L)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	2,76	6,56	0,42	5,89	2,35	4,99	-1,95	0,50	-5,51	-7,46	1,17	0,89
C50 [dB]	-12,04	-12,60	-4,25	3,10	3,78	5,52	2,88	3,37	2,80	6,43	4,31	4,29
C80 [dB]	-4,43	-3,50	-0,12	5,73	6,70	7,85	5,58	6,42	6,00	8,46	6,69	6,73
D50 [%]	5,89	5,22	27,30	67,13	70,50	78,12	65,99	68,49	65,59	81,48	72,94	72,88
Tc [ms]	231,5	184,6	118,0	57,89	51,54	40,74	54,21	45,22	50,68	63,69	46,39	45,84
EDT [s]	2,79	2,32	1,32	0,80	0,80	0,72	0,84	0,74	0,75	0,81	0,79	0,78
T60 [s]	--	2,10	1,88	1,58	1,24	1,06	1,16	1,46	--	--	1,66	1,50
Br [ad.]											1,503	

Tabela D 32 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 11, cluster direito.

CLUSTER DIREITO (R)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
G [dB]	8,99	15,23	3,98	6,44	3,33	8,63	4,56	2,20	-2,99	-7,19	3,81	3,83
C50 [dB]	-6,86	-5,24	-3,40	1,22	1,30	3,96	5,61	6,22	6,36	7,20	4,44	4,83
C80 [dB]	-1,09	0,31	-0,94	2,97	3,35	6,68	7,16	7,64	8,14	8,19	6,41	6,76
D50 [%]	17,08	23,03	31,37	57,00	57,40	71,31	78,43	80,72	81,23	83,98	73,55	75,27
Tc [ms]	198,1	137,1	138,5	91,51	69,80	49,04	40,17	35,19	32,71	55,48	46,31	43,42
EDT [s]	3,55	1,73	2,04	1,64	1,24	1,08	1,19	1,14	1,21	--	1,19	1,16
T60 [s]	1,94	1,86	1,74	1,52	1,28	1,10	1,10	1,38	2,21	--	1,58	1,46
Br [ad.]											1,369	

Tabela D 33 - Parâmetros de qualidade acústica. Setor 11, ambos clusters.

AMBOS CLUSTERS (ST)												
Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	Lin	A
C50 [dB]	-10,74	-7,92	-7,32	-6,92	-4,89	-0,86	0,21	0,88	2,90	3,99	-0,40	-0,16
C80 [dB]	-5,87	-2,78	-3,50	1,21	1,85	3,72	3,79	4,56	6,03	7,36	3,71	3,94
D50 [%]	7,80	13,90	15,64	16,89	24,49	45,03	51,19	55,05	66,12	71,47	47,71	49,04
Tc [ms]	248,1	155,6	159,8	101,4	84,76	71,64	65,97	58,42	46,97	79,32	69,94	67,55
G [dB]	5,59	10,48	0,20	4,47	1,22	4,41	-1,22	1,53	-2,38	-6,88	1,19	1,04
S/R [dB]	19,95	27,08	29,65	38,51	49,94	53,06	49,54	41,78	24,87	10,72	37,18	39,46

APÊNDICE E

Tabela E 1 – Nível sonoro alcançado em determinadas atividades. Fonte: Cysne, 2000.

Nível sonoro [dBA]	ATIVIDADE
0	Límiar de audição para jovens (entre 1KHz e 4KHz)
35	Suspiro suave
40	Música funcional em ambiente silencioso
60	Música de fundo (ambiente)
60	Nível de conversa
75	Nível de conversa preferido para máxima inteligibilidade
90	Concerto Musical
93	Picos de contrabaixo acústico a 2 metros
94	Picos de clarineta a 3 metros
95	Picos de piano na posição do músico
96	Picos de trompete a 3 metros
105	Nível de monitoração durante gravação de música pop
110	Música em volume muito alto
115	Níveis de picos durante concertos de rock

Tabela E 2 – Tempo de exposição máximo a um determinado nível sonoro. Fonte: Cysne, 2000.

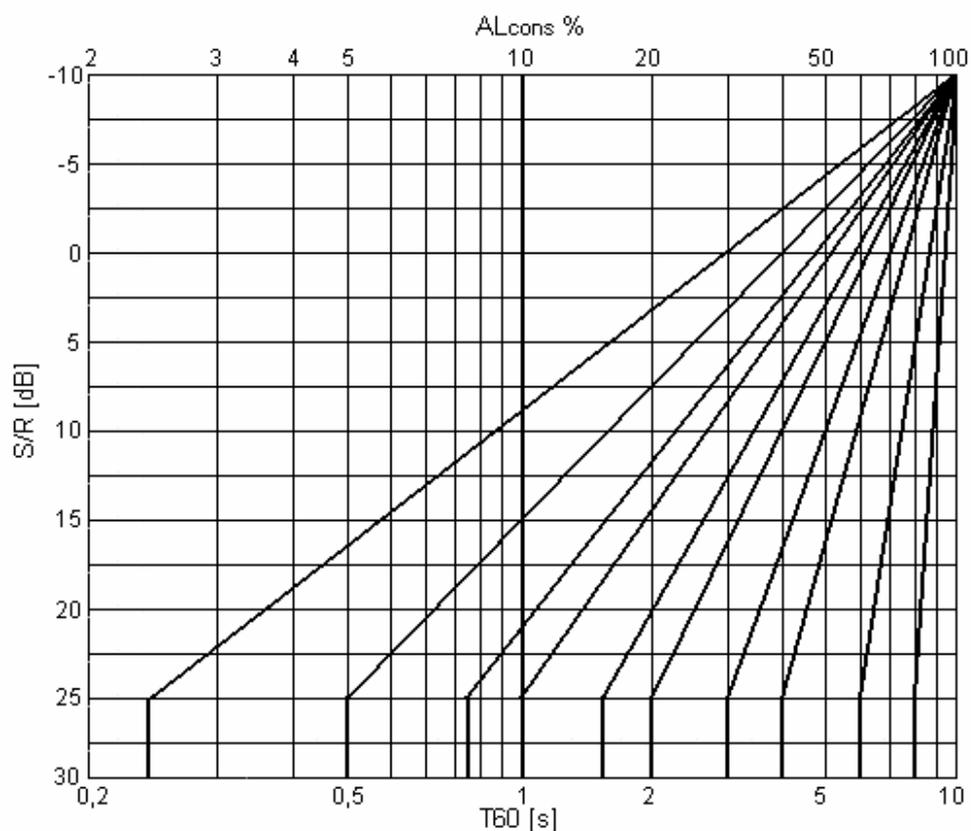
Nível de ruído, [dBA]	TEMPO MÁXIMO DE EXPOSIÇÃO
Inferior a 90	Sem limites
90 a 92	6 horas
92 a 95	4 horas
95 a 97	3 horas
97 a 100	2 horas
100 a 102	1,5 horas
102 a 105	1 hora
105 a 110	30 minutos
110 a 115	15 minutos
Superior a 115	Nenhuma exposição

Tabela E 3 – Valores do coeficiente de absorção, α para alguns materiais. Fonte: Cysne, 2000.

Produto	Descrição	α @ 500Hz	α @ 1KHz
Platéia	Sentada em banco estofados	0,33	0,37
Carpete	Não forrado de uso geral	0,15	0,20
Madeira	Espessura de 10mm	0,17	0,09
Gesso acústico	Zenolite 25mm	0,78	0,92

Tabela E 4 – Correspondência entre STI / RASTI e %ALcons. Fonte: Isbert, 1998.

%ALcons	STI	Qualidade subjetiva
1,4% - 0%	0,88 - 1	Excelente
4,8% - 1,6%	0,66 - 0,86	Boa
11,4% - 5,3%	0,50 - 0,64	Aceitável
24,2% - 12%	0,36 - 0,49	Pobre
46,5% - 27%	0,24 - 0,34	Ruim

Figura E 1 – Relação entre AL_{CONS} %, o tempo de reverberação, $T60$, e a relação sinal/ruído, S/R . Fonte: Cysne, 2000.

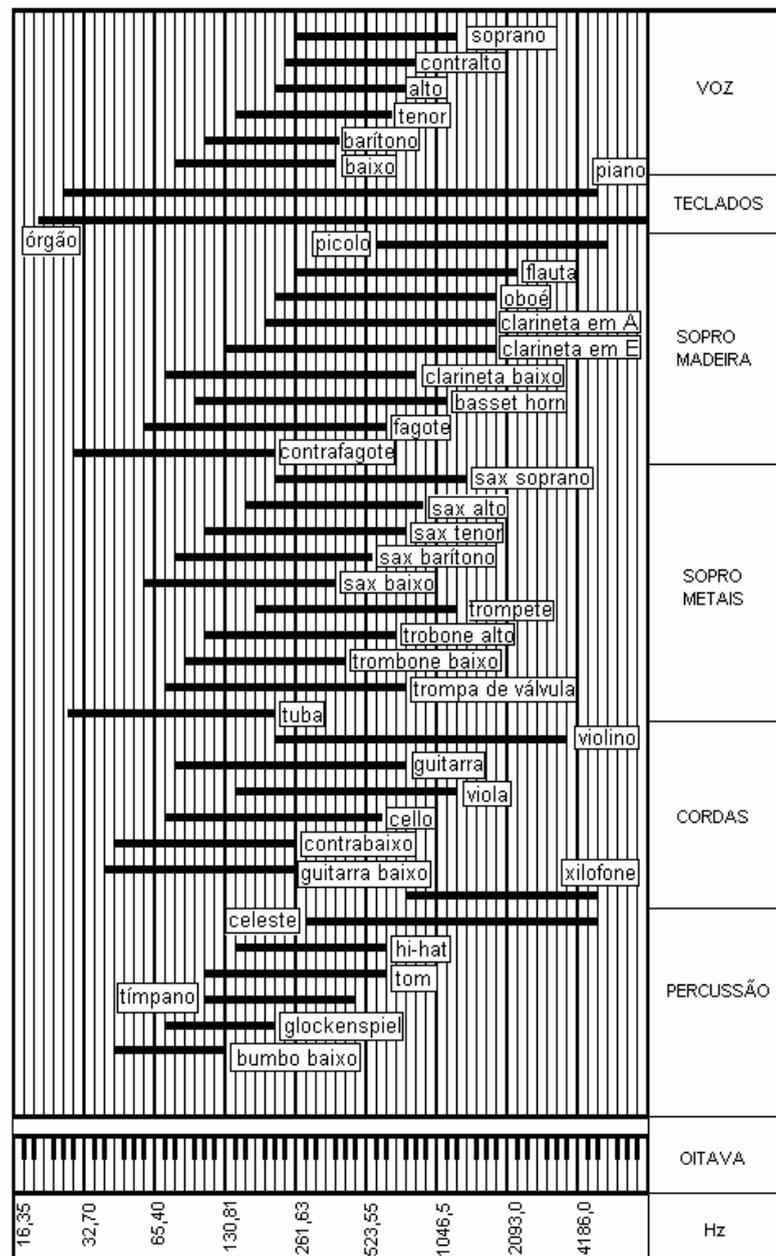


Figura E 2 – Respostas de frequência naturais de instrumentos musicais e vozes humanas. Fonte: Cysne, 2000.

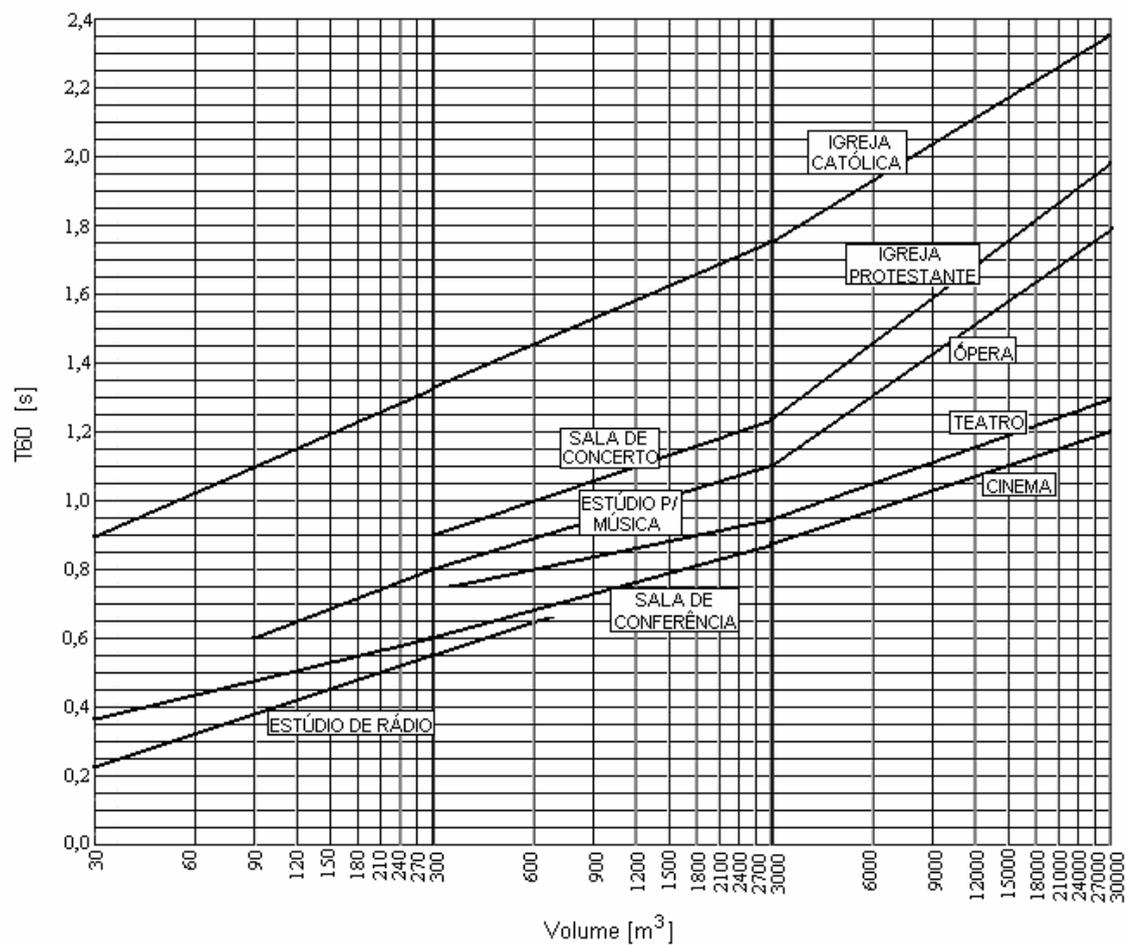


Figura E 3 – Tempo de Reverberação ótimo de acordo com o volume do ambiente. Fonte: Norma, 1998



Figura E 4 – Foto da platéia alta do Salão de Atos da UFRGS com detalhe ao equipamento de medida a frente e a cabine de som (house mix) ao fundo.



Figura E 5 – Foto tirada do palco do Salão de Atos da UFRGS, com detalhe do cluster esquerdo e platéia baixa mostrando os difusores acústicos instalados nas paredes.



Figura E 6 – Foto tirada na cabine de som (house mix) mostrando os equipamentos de áudio a frente e o palco ao fundo.

APÊNDICE F

O decibel é uma unidade que exprime uma relação entre dois níveis de potência. É muito comum, e sempre possível, estabelecer um desses níveis como referência e expressar os decibéis em função da mesma. Dessa forma, é possível aferir um determinado resultado contra uma dada referência.

A partir deste fato, são criados rótulos para a unidade decibéis que indica qual a referência que está sendo utilizada. A Tabela F 1 abaixo, apresenta alguns destes rótulos.

Tabela F 1 – Conjunto de decibéis rotulados indicando a referência e a quantidade aferida. Fonte: Cysne, 2000.

Decibel rotulado	Referência	Quantidade aferida
dBm	1 miliwatt (775 mV @ 600Ω)	Potência elétrica
dBW	1 watt	Potência elétrica
dBf	1 fentowatt	Potência elétrica
dBK	1 quilowatt	Potência elétrica
dBm	-90 dBm @ 1KHz	Ruído de referência
dBj	1000 microvolts	Voltagem
dBu	0,775 volts	Voltagem
dBv	0,775 volts	Voltagem
dBV	1 volt	Voltagem
dBmA	1 miliampere	Corrente elétrica
dB NPS (SPL)	20 μN/m ²	Pressão sonora