

**Universidade Federal de Santa Catarina**  
**Programa de Pós-Graduação em**  
**Arquitetura e Urbanismo**

**Antonio Katsushi Fujimoto**

**ESTUDO DA QUALIDADE ACÚSTICA DE**  
**SALAS RESIDENCIAIS PARA USO DE**  
**SISTEMAS DE ÁUDIO E VÍDEO**

**Dissertação de Mestrado**

**Florianópolis**

**2004**

**Antonio Katsushi Fujimoto**

**ESTUDO DA QUALIDADE ACÚSTICA DE  
SALAS RESIDENCIAIS PARA USO DE  
SISTEMAS DE ÁUDIO E VÍDEO**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Arquitetura e Urbanismo da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
para obtenção do grau de Mestre em  
Arquitetura e Urbanismo

**Orientador: Prof<sup>a</sup>. Elvira Barros Viveiros da Silva, Dr. Eng.**

**Florianópolis**

**2004**

FUJIMOTO, Antonio Katsushi. **Estudo da Qualidade Acústica de Salas Residenciais para uso de Sistemas de Áudio e Vídeo.** 2004. 98 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFSC, Florianópolis.

F961e Fujimoto, Antonio Katsushi  
Estudo da qualidade acústica de salas residenciais para uso de sistemas de áudio e vídeo / Antonio Katsushi Fujimoto; orientadora, Elvira Barros Viveiros da Silva. – Florianópolis, 2004.  
98 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, 2004.

Inclui bibliografia.

1. Acústica arquitetônica. 2. Sistema de áudio e vídeo. 3. Home theater. 4. Home cinema. 5. Eletroacústica. I. Silva, Elvira Barros Viveiros da. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

CDU: 72

*Catálogo na fonte por: Onélia Silva Guimarães CRB-14/071*

Antonio Katsushi Fujimoto

**ESTUDO DA QUALIDADE ACÚSTICA DE SALAS RESIDENCIAIS  
PARA USO DE SISTEMAS DE ÁUDIO E VÍDEO**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 16 de Fevereiro de 2004

Prof<sup>a</sup>. Sonia Afonso, Dra.  
Coordenadora do Programa

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Arcanjo Lenzi, PhD  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof<sup>a</sup>. Elvira Barros Viveiros da  
Silva, Dr.Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Orientadora

---

Prof. Sylvio Reynaldo Bistafa, PhD  
Universidade de São Paulo

---

Prof. Fernando Oscar Ruttkay  
Pereira, PhD.  
Universidade Federal de Santa Catarina

À minha esposa Márcia  
pelo apoio e incentivo de sempre.  
Aos meus filhos Mauro, Daniel e Thiago.

## **AGRADECIMENTOS**

*A Deus, o Criador de todos nós e do Universo, que permite ao homem através do seu esforço conhecer gradativamente as suas leis sábias, agradeço pela oportunidade deste humilde estudo.*

*À Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.*

*À Arquitetura e Urbanismo da UFSC – Laboratório de Conforto Ambiental.*

*À Engenharia Mecânica da UFSC – Laboratório de Acústica e Vibrações.*

*À prof<sup>a</sup>. Elvira Barros Viveiros, minha orientadora e professora das disciplinas da Pós UFSC, a quem devo a oportunidade desta realização.*

*Ao prof. Arcanjo Lenzi, meu professor das disciplinas da Pós UFSC, pelo incentivo nos estudos.*

*Ao prof. Sylvio R. Bistafa, professor da USP, pela preciosa contribuição nesta pesquisa.*

*À Kauffmann Consultoria de Imóveis S/A pelos impressos e informações dos empreendimentos.*

“O sentimento e a sabedoria são as duas asas com que a alma se elevará para a perfeição infinita”. Emmanuel

## RESUMO

O principal foco desta pesquisa é o ambiente onde um sistema de áudio e vídeo é usado, conhecido também como *home theater* ou *home cinema*. O avanço das tecnologias em efeitos especiais de imagem e de som, como também dos equipamentos eletrônicos, trouxe ao usuário uma melhor sensação de realismo no ambiente de reprodução. A acústica de salas residenciais, uma questão pouco abordada pelos arquitetos e engenheiros em projetos de edificações, tem se tornado um ponto de preocupação aos especialistas devido a sua influência e importância no desempenho do sistema como todo.

A característica básica desta pesquisa está em reunir os conceitos de acústica de salas de pequeno porte, os sistemas eletroacústicos, o processamento digital de sinais de áudio utilizados em gravações de filmes e o conceito de qualidade acústica de salas. A faixa de frequência audível é dividida em duas partes para análise, isto é, a baixa e a média/alta frequência. A primeira, devido aos efeitos de baixas frequências presentes nas trilhas sonoras de filmes e a segunda, pelos efeitos de ambiente.

Uma sala equipada com um sistema conhecido como 5.1, característica esta explicada no capítulo 3, foi investigada usando o *MLS, maximum length sequences*. Resultados experimentais mostraram a conveniência de se ter baixo tempo de reverberação, obtendo o compromisso entre música, fala e efeitos sonoros de filmes. Quando níveis de reverberação mais elevados foram exigidos, como na música, a compensação foi feita pelo sistema eletroacústico.

A difusão sonora na faixa das médias e altas frequências demonstrou ser de grande importância para a sensação de ambiência, como também a simetria acústica da sala para uma melhor definição da posição acústica das fontes sonoras. O controle dos modos de ressonância das baixas frequências evitando grandes variações dentro da área útil de audição, tem mostrado ser também relevante.

**Palavras-chave:** acústica de salas residenciais, sistema de áudio e vídeo, *home theater*, *home cinema*, eletroacústica.



## ABSTRACT

The main focus of this research is the ambient where a home theater system is used. Technology in special image and sound effects has advanced in film recordings, as well as electronic equipment, which can bring more realism to the reproduction environment.

The acoustics of small rooms, an issue rarely approached by architects and engineers in building design, has been a major problem to specialists due to its relevance in the system overall performance.

The approach of this study is to gather the concepts of acoustics of small rooms, electroacoustics systems, audio digital signals processing of film soundtracks and the parameters of acoustical quality of rooms. The audible frequency range is divided into two ranges of analysis, i.e. low and mid/high frequencies. The former is important due to *low frequency effects* existing in soundtrack of films and the latter is where *surround effects* take place.

A room equipped with a 5.1 system, was investigated using maximum length sequences (MLS). Experimental results showed the convenience of having very short reverberation time, where a good compromise between music, speech and sound effects of films was looked for. When longer levels of reverberation is required (as for music), it is compensated by electroacoustics system. Sound diffusion in mid and high frequency range plays a major role for audio background, as well as the room acoustics symmetry, which determines the acoustic position of sound sources. The control of low frequency resonance modes, avoiding great variations within the audition, has also showed to be an important aspect to be addressed.

**Keywords:** acoustics of small room, audio and video systems, home theater, home cinema, electroacoustics.

# SUMÁRIO

<b>Lista de Abreviaturas e Símbolos</b> .....	p. xi
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	p. 1
1.1 Acústica na escala da residência.....	p. 2
1.2 Sistemas de áudio e vídeo domésticos.....	p. 3
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	p. 5
2.1 Introdução.....	p. 5
2.2 Acústica de Salas.....	p. 6
2.2.1 Modelo Modal.....	p. 6
2.2.2 Modelo Geométrico.....	p.18
2.2.3 Reverberação.....	p.21
2.2.4 Salas com Sistemas Eletroacústicos.....	p.30
2.3 Parâmetros de Qualidade Acústica de Salas.....	p.33
<b>3 SISTEMAS DE ÁUDIO E VÍDEO</b> .....	p.40
3.1 Introdução.....	p.40
3.2 Equipamentos do Sistema Eletroacústico.....	p.42
3.2.1 Caixas acústicas.....	p.42
3.3 Conceitos de Processamento de Sinais.....	p.44
3.3.1 <i>Dolby ProLogic</i> .....	p.44
3.3.2 <i>Dolby ProLogic II</i> .....	p.45
3.3.3 <i>Dolby Digital</i> .....	p.45
3.3.4 <i>Conceito da DTS</i> .....	p.46
3.3.5 <i>Surround EX &amp; ES</i> .....	p.46
3.3.6 <i>Conceito da THX</i> .....	p.47
3.4 Posicionamento das caixas acústicas na sala.....	p.48
3.4.1 Baixa Frequência.....	p.48
3.4.2 Média e Alta frequência.....	p.54
3.5 Tipologia das salas para sistemas de áudio e vídeo.....	p.56

<b>4</b>	<b>MEDIÇÃO ACÚSTICA DA SALA.....</b>	<b>p.61</b>
4.1	Introdução.....	p.61
4.2	Descrição da sala.....	p.61
4.3	Resultados experimentais.....	p.64
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>p.78</b>
5.1	Introdução.....	p.78
5.2	Considerações finais.....	p.78
5.3	Tópicos para futuras pesquisas.....	p.79
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>p.80</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>p.84</b>
	APÊNDICE A – 1ª. Medição da sala – resultados numéricos.....	p.85
	APÊNDICE B – 2ª. Medição da sala – resultados numéricos.....	p.86

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### Abreviaturas

<i>AM/FM</i>	Amplitude Modulada / Freqüência Modulada
<i>BBC</i>	<i>British Broadcasting Corporation</i>
<i>CD</i>	<i>Compact Disc</i> , disco compacto para áudio de leitura a laser
<i>DSP</i>	<i>Digital Signal Processor</i> , processador de sinais digitais
<i>DSS</i>	<i>Digital Satellite Systems</i> , receptor digital de satélite
<i>DVD</i>	<i>Digital Versatile Disc</i> , disco para áudio multicanal e vídeo
<i>DVD Audio</i>	<i>Digital Versatile Disc</i> , disco para áudio multicanal, de alta dinâmica
<i>EDT</i>	<i>Early Decay Time</i> , tempo de decaimento inicial
<i>HDTV</i>	<i>High Definition TV</i> , televisão de alta definição
<i>INRS</i>	<i>Institut National de la Recherche Scientifique</i>
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>ITU</i>	<i>International Telecommunication Union</i>
<i>LFE</i>	<i>Low Frequency Effects</i> , efeitos de baixas freqüências
<i>LFOpt</i>	<i>Low Frequency Optimized</i> , baixa freqüência otimizada
<i>NPS</i>	Nível de Pressão Sonora
<i>SACD</i>	<i>Super Áudio CD</i> , disco com melhor dinâmica que o <i>CD</i> , multicanal

### Símbolos

$A_1$	constante
$A$	área total de absorção ( $m^2$ )
$B_o$	energia incidente
$B_1$	constante
$BR$	razão de graves
$c$	velocidade do som no ar (m/s)
$C$	clareza ou claridade sonora
$C_1$	constante
$d$	distância entre componentes ou superfícies (m)
$D$	definição sonora
$D_1$	constante
$f$	freqüência (Hz)
$f_c$	freqüência de corte ou Schroeder (Hz)
$I$	intensidade do som ( $watt/m^2$ )
$l_m$	caminho médio livre segundo Pujolle
$L$	comprimento total das arestas de uma sala (m)
$L_x$	comprimento da aresta na direção x (m)
$p$	pressão sonora
$r$	distância da fonte sonora (m)
$S$	superfície total ( $m^2$ )
$t$	tempo (s)

$T_r$	tempo de reverberação (s)
$TR$	razão de agudos
$u$	velocidade da partícula na direção $x$ (m/s)
$v$	velocidade da partícula na direção $y$ (m/s)
$V$	volume geométrico da sala ( $m^3$ )
$x_o$	distância (m)
$x, y, z$	coordenadas cartesianas
$\alpha$	coeficiente de absorção
$\bar{\alpha}$	coeficiente médio de absorção
$\beta_x$	ângulo em relação ao eixo $x$
$\delta$	valor médio das constantes de amortecimento
$\lambda$	comprimento de onda (m)
$\eta$	parte imaginária da impedância específica
$\zeta$	impedância específica da parede
$\xi$	parte real da impedância específica
$\gamma$	ângulo
$\rho_o$	densidade do gás
$\vartheta_o$	ângulo em relação a normal à parede
$\omega$	freqüência angular (rad/s)
$\Theta$	temperatura ( $^{\circ}$ C)

## Denominações

<i>Home Theater</i>	Sistema equivalente ao cinema aplicado em residências.
<i>Home Cinema</i>	Sistema equivalente ao cinema aplicado em residências.
<i>Subwoofer</i>	Caixa Acústica para reprodução de baixas freqüências.
<i>Receiver DD/dts</i>	Receptor de AM/FM, com amplificador multicanal e processador.

# 1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, o avanço tecnológico dos sistemas de áudio e vídeo trouxe para o interior dos lares o que até então só era visto ao vivo em teatros ou reproduzido em cinemas. A busca da privacidade, do conforto, da comodidade, segurança, principalmente em grandes centros urbanos, fez-se com que muitos usuários decidissem por implantar tal sistema dentro da residência como mais uma opção de lazer realizando altos investimentos em equipamentos eletroacústicos sofisticados. Porém, poucos são os que atingem a satisfação plena, devido à deficiência acústica das salas. A grande maioria não obtém o máximo de desempenho do sistema de áudio mesmo com equipamento eletroacústico de alta qualidade e de última geração. A acústica do ambiente tem grande influência nos resultados, conforme comentado por Dahl (2002) na conferência do *Consumer Electronic Show* de 2002, em Las Vegas, USA. Com a preocupação de se obter o melhor desempenho do conjunto Sala Residencial e Sistema de Áudio e Vídeo é que este estudo foi proposto.

A dissertação apresenta no Capítulo 2, FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA, a revisão de literatura relacionada ao estudo proposto. Simultaneamente, são apresentadas as pesquisas mais recentes publicadas em congressos e seminários nacionais e estrangeiros, visando a atualização e aprofundamento dos conceitos inerentes a pesquisa. A faixa de frequências encontrada nos programas de reprodução de sistemas áudio e vídeo é ampla, englobando toda a faixa audível de 20 Hz a 20.000 Hz, portanto, o estudo deu ênfase a duas partes distintas: as baixas e as altas frequências, incluindo na última também a faixa média frequência. Nesse capítulo é estudado o comportamento das ressonâncias da sala, devido aos efeitos sonoros em baixas frequências dos filmes, os chamados *Low Frequency Effects*, *LFE*, bem como o campo sonoro nas médias/altas frequências, devido aos efeitos de ambiente que concentra muitos detalhes nas gravações nesta faixa, os chamados *Surround Effects*. Essa ampla gama de frequências é, também, muito relevante para audição de música.

Em seguida, é feito um levantamento da realidade do mercado quanto à tipologia de salas residenciais, assunto tratado no Capítulo 3, SISTEMAS DE ÁUDIO E VÍDEO, como, também, são esclarecidos os principais formatos de processamento

de sinais aplicados em áudio e vídeo, conhecidos como 5.1, 6.1 ou 7.1. São apresentadas as empresas que criaram os sistemas e os respectivos conceitos. É comentado, também, sobre os equipamentos eletroacústicos que fazem parte do conjunto e estudado o posicionamento das fontes sonoras na sala com base nas pesquisas e recomendações de normas internacionais.

No Capítulo 4, MEDIÇÃO ACÚSTICA DE SALAS, são apresentadas as medições dos parâmetros de qualidade acústica de uma sala preparada para o sistema 5.1. O método de medição usado é por *Seqüências de Comprimento Máximo*, o *MLS*. São discutidos o comportamento dos modos de ressonância da sala e o uso de superfícies que oferecem difusão sonora. Os valores obtidos são comparados com os da literatura e realizadas algumas experiências e ajustes na sala para atingir os valores recomendados, apresentando as conclusões deste estudo no Capítulo 5.

## 1.1 Acústica na escala da residência

A acústica de grandes salas, ao longo do último século, teve avanços significativos. Os estudos dos famosos teatros da Europa e de outros lugares do mundo, destacados pela boa acústica, ajudaram no enriquecimento tecnológico dessa área, como comentam Beranek (1992;1996;2003) e Cavanaugh e Wilkes (1999). Esses teatros, mais antigos, eram projetados somente para reprodução de sons naturais, ou seja, para apresentações de orquestras sinfônicas e de cantores, o que significa ter sons não amplificados de instrumentos musicais e de vozes (coral).

Nas últimas décadas surgiram, também, as salas denominadas de multiuso, de grande porte, para apresentações artísticas de diversas naturezas e, até, para conferências ou negócios. Na maioria das vezes, porém, as diretrizes de projeto de ambientes como esses têm suas características decorrentes mais de interesses econômicos de investimentos e custo de uso do que de acústica em si. Assim, junto com as salas para públicos maiores e, portanto, com área mais ampla de audição, surge a necessidade do uso e desenvolvimento de sistemas eletroacústicos, como microfones, amplificadores, controladores de sinais e caixas acústicas, para otimizar a propagação e distribuição do som no ambiente. Vários estudos foram feitos nesse sentido (KUTTRUFF, 1973).

Ao longo desse desenvolvimento evidencia-se, porém, uma lacuna de conhecimentos dentro do campo da acústica no que diz respeito a qualidade dos ambientes residenciais de um modo geral.

De modo particular, no que tange as salas pequenas, tais como as de escala residenciais, principalmente com o uso de sistemas eletroacústicos para reprodução de sinais amplificados e processados eletronicamente, não é de conhecimento dos autores em tal linha de investigação. O objetivo deste estudo, portanto, é focar os fenômenos acústicos de salas pequenas, típicas residenciais, para o uso de sistemas de áudio e vídeo, levantando os parâmetros mais relevantes para a melhoria da qualidade sonora para o projeto desses ambientes. A pesquisa envolveu a investigação do tempo de reverberação, para salas de pequeno volume, adequado para a reprodução de música, fala e efeitos sonoros de filmes reproduzidos por sistemas eletroacústicos. Foram objetivos do estudo, também, os ajustes na sala para melhoria da qualidade sonora na reprodução de baixas e altas frequências, bem como a definição das posições das fontes sonoras, de acordo com suas funções e, por fim, a medição dos principais parâmetros de qualidade acústica da sala.

## 1.2 Sistemas de áudio e vídeo domésticos

A investigação, também, aborda os fundamentos da acústica e da tecnologia de processamento de sinais, visando os ambientes voltados para o áudio com efeitos sonoros de filmes, os sistemas denominados de 5.1 ou 6.1 elaborados pelas empresas *Dolby® Laboratories* (2003) e *DTS® Entertainment* (2002), largamente utilizados nas gravações de filmes. Tais ambientes começam a ser incorporados com maior intensidade nos atuais espaços arquitetônicos das residências e pretende-se que os resultados desta pesquisa contribuam nos projetos de salas.

Nos Estados Unidos da América e na Europa há um grande público consumidor dos sistemas de áudio e vídeo aplicados em residências, comumente chamados pelos norte americanos de *Home Theater* e pelos europeus de *Home Theatre* ou *Home Cinema*. Nesses países, há empresas especializadas e associações que oferecem palestras, cursos e treinamentos em instalações desses conjuntos, como a *CEDIA* (2002), tal o interesse e amplitude desse mercado.



No Brasil, na última década, houve grande crescimento desse conceito, acompanhando a tendência mundial. Surgiram produtos dos mais simples até os mais sofisticados e atualizados do mercado internacional. Em conseqüência, é possível observar que o ambiente de *home theater* está se incorporando gradativamente, ano após ano, aos empreendimentos da construção e, de forma crescente, aos lares brasileiros, tornando-se um espaço de lazer, de *status* e modernidade. As grandes construtoras, cuja opção reflete-se nos empreendimentos imobiliários, se utilizam desse apelo como um forte argumento de comercialização e atendimento dos desejos do consumidor. Alguns exemplos são apresentados no item 3.5.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Introdução

Neste capítulo são abordados os conceitos relevantes à pesquisa. Em razão do estudo da acústica de salas envolver os sinais gerados por equipamentos de áudio, ou seja, uma ampla faixa de frequência, entre 20 Hz e 20 kHz, a abordagem teórica para análise dos campos sonoros utiliza-se de diferentes teorias para regiões de frequências distintas, a saber:

- a) baixas frequências, o modelo modal;
- b) médias e altas frequências, o modelo geométrico.

Ambas faixas de frequência são relevantes para uma sala com uso de sistemas de áudio e vídeo. As baixas frequências em um ambiente de audição têm um impacto significativo na qualidade sonora de um *home theater*. Ondas estacionárias dentro da sala causam grandes variações na resposta em frequência nas posições de audição. Além disso, o sistema não pode efetivamente ser equalizado. É uma característica acústica da sala.

Com o advento do *home theater* e do *áudio multicanal* as exigências em relação aos sistemas de áudio em baixas frequências têm aumentado. Essa faixa de frequência está presente no áudio de filmes, o chamado *LFE, Low Frequency Effect*, que cria o impacto sonoro das cenas, reproduzido no ambiente doméstico pelas caixas acústicas conhecidas como *subwoofer*. A grande amplitude (dinâmica) das baixas frequências é hoje viável graças às gravações e reproduções digitais. Além disso, o *home theater* tem transformado o evento, que antes era restrito a um ou outro ouvinte do som estéreo, em um acontecimento social, onde várias pessoas se reúnem em frente a uma tela de projeção. Como consequência, é muito importante que o desempenho em baixas frequências seja otimizado numa área de audição, como será visto na seqüência deste estudo, da mesma forma que o espalhamento das médias e altas frequências é relevante para os efeitos sonoros de ambiente, os conhecidos efeitos *surround*.

## 2.2 Acústica de salas

Neste item são estudados o modelo modal para as baixas frequências e o modelo geométrico para as médias e altas frequências.

### 2.2.1 Modelo Modal

A temperatura do ambiente influencia na velocidade do som, que é dada por

$$c = (331,4 + 0,6\Theta) \quad m/s \quad (2.1)$$

onde  $\Theta$  é a temperatura em graus centígrados (KUTTRUFF, 1979, p.1), tratado aqui em um meio homogêneo e ambiente em repouso, com propagação sonora livre de perdas, constante com relação ao espaço e tempo.

Em salas, principalmente as de grande porte, há diferenças de temperatura devido à refrigeração do ar condicionado e ao calor gerado pelo público, portanto, o fator temperatura não pode ser desprezado no cálculo da velocidade do som.

Conforme descrito por Kuttruff (1979, p.3), a equação da onda é dada por:

$$c^2 \Delta p = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

$$\text{onde } c^2 = k \frac{p_o}{\rho_o} \quad (2.3)$$

sendo  $c$  a velocidade do som,  $p$  a pressão sonora,  $p_o$  a pressão do ar estático,  $k$  o expoente adiabático (para o ar  $k = 1.4$ ),  $\rho_o$  a densidade do gás,  $t$  o tempo.

Considerando a variação harmônica da pressão, da velocidade da partícula, etc. com a frequência angular  $\omega$ , então a Equação (2.2) pode ser lida, de acordo com Kuttruff (1979, p.45), como:

$$\Delta p + k^2 p = 0 \quad (2.4)$$

$$\text{onde } k = \frac{\omega}{c}, \quad (2.5)$$

com base na conservação do momento, tem-se:

$$\text{grad } p = -\rho_o \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.6)$$

onde  $v$  é a velocidade da partícula

a velocidade do componente normal em todos os pontos da sala, inclusive na parede, pode ser escrita da seguinte forma:

$$v_n = -\frac{1}{i\omega\rho_o} (\text{grad } p)_n = \frac{i}{\omega\rho_o} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (2.7)$$

o símbolo  $\partial/\partial n$  denota a diferenciação na direção perpendicular à parede, no sentido de afastamento da parede. Substituindo  $v_n$  por  $p/Z$  obtém-se:

$$Z \frac{\partial p}{\partial n} + i\omega\rho_o p = 0 \quad (2.8)$$

ou usando a impedância específica  $\zeta$ :

$$\zeta \frac{\partial p}{\partial n} + ikp = 0 \quad (2.9)$$

$k$  é um autovalor.

O estudo dos modos de vibração em salas retangulares com paredes rígidas, pode ser feito considerando uma sala de dimensões  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$  com as respectivas paredes na direção do eixo  $x$ ,  $y$  e  $z$  conforme a Figura 2.1.

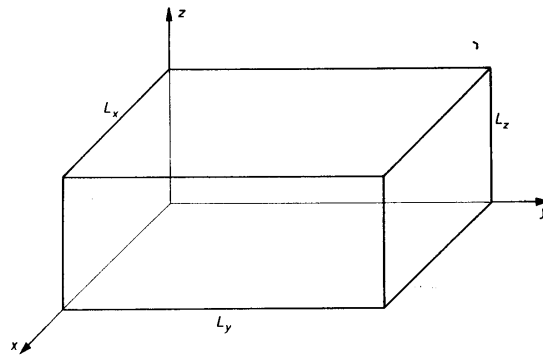


Figura 2.1: Sala de dimensões  $L_x, L_y, L_z$ . Fonte: Kuttruff (1979, p.49)

Onde as arestas do retângulo são formadas pelas linhas

de  $x = 0$  a  $x = L_x$  na direção  $x$ ;

de  $y = 0$  a  $y = L_y$  na direção  $y$ ;

de  $z = 0$  a  $z = L_z$  na direção  $z$ ;

Considerando que as superfícies das paredes são rígidas, o componente normal da velocidade da partícula desaparece, ou seja, é nula nas paredes. Em coordenadas cartesianas, a equação da onda pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0 \quad (2.10)$$

As variáveis podem ser separadas, o que significa que a solução pode ser decomposta em três fatores:

$$p(x, y, z) = p_1(x)p_2(y)p_3(z) \quad (2.11)$$

que dependem somente de  $x$ , de  $y$  e de  $z$  respectivamente. Se esse produto for inserido na equação da onda, essa pode ser dividida em três equações diferenciais ordinárias. O mesmo é válido para as condições de contorno definidas.

$p_1$ , para um instante, deve satisfazer a equação:

$$\frac{d^2 p_1}{dx^2} + k_x^2 p_1 = 0 \quad (2.12)$$

junto com as condições de contorno

$$\frac{dp_1}{dx} = 0 \quad \text{para } x = 0 \text{ e } x = L_x \quad (2.13)$$

O mesmo pode ser definido para  $p_2(y)$  e  $p_3(z)$ ; as últimas constantes introduzidas são conforme a Equação (2.14).

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \quad (2.14)$$

onde  $\frac{k_x}{k}$ ,  $\frac{k_y}{k}$  e  $\frac{k_z}{k}$  representam as direções da onda em relação aos eixos  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

A Equação (2.12) tem solução genérica conforme:

$$p_1(x) = A_1 \cdot \cos(k_x x) + B_1 \cdot \text{sen}(k_x x) \quad (2.15)$$

As constantes  $A_1$  e  $B_1$  são usadas para adaptar a solução às condições de contorno, de acordo com a Equação (2.13). Assim, pode-se considerar  $B_1 = 0$ , uma vez que somente a função cosseno existe para  $x = 0$ , no cálculo da tangente horizontal requerida na Equação (2.13), (KUTTRUFF, 1979, p.50). No caso da tangente horizontal em  $x = L_x$ , tem-se  $\cos(k_x L_x) = \pm 1$ , assim  $k_x L_x$  deve ser uma integral múltipla de  $\pi$ . A constante  $k_x$  deve, portanto, assumir um dos valores dado por:

$$k_x = \frac{n_x \pi}{L_x} \quad (2.16)$$

como uma consequência das condições de contorno, sendo  $n_x$  um número inteiro não negativo. De acordo com Kuttruff (1979, p.51), da mesma forma pode-se obter os valores para  $k_y$  e  $k_z$ :

$$k_y = \frac{n_y \pi}{L_y} \quad (2.17)$$

$$k_z = \frac{n_z \pi}{L_z} \quad (2.18)$$

Inserindo as Equações (2.17) e (2.18) na Equação (2.14), resulta na equação de autovalores da equação de onda:

$$k_{n_x n_y n_z} = \pi \left[ \left( \frac{n_x}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{n_y}{L_y} \right)^2 + \left( \frac{n_z}{L_z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.19 a)$$

ou

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{2} \sqrt{\left( \frac{n_x}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{n_y}{L_y} \right)^2 + \left( \frac{n_z}{L_z} \right)^2} \quad (2.19 b)$$

que é a frequência característica de cada modo acústico com os três componentes, conforme descrito em Gerges (2000, p.294).

Os modos normais associados com os autovalores são simplesmente obtidos pela multiplicação dos três cossenos correspondentes de cada direção, o qual descreve a dependência da pressão sobre as coordenadas:

$$p_{n_x n_y n_z}(x, y, z) = C \cdot \cos\left(\frac{n_x \pi \cdot x}{L_x}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_y \pi \cdot y}{L_y}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_z \pi \cdot z}{L_z}\right) \quad (2.20 a)$$

onde  $C$  é uma constante que expressa amplitude. Essa expressão representa uma onda estacionária tridimensional, que está incompleta pois não apresenta o fator exponencial ( $i\omega t$ ) que descreve a dependência do tempo da pressão sonora. Assim,

a equação da onda estacionária não amortecida em sala retangular com paredes rígidas é dada por:

$$p_{n_x n_y n_z}(x, y, z) = C \cdot \cos\left(\frac{n_x \pi \cdot x}{L_x}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_y \pi \cdot y}{L_y}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_z \pi \cdot z}{L_z}\right) \cdot e^{i\omega \cdot t} \quad (2.20 \text{ b})$$

A Equação (2.20 b) é a expressão geral para a onda estacionária em qualquer ponto  $(x, y, z)$ , produzida em uma sala retangular com paredes rígidas (GERGES, 2000, p.293, p.295). Quando  $n_y = n_z = 0$ , a Equação (2.20 b) se torna igual a equação da onda plana em um tubo com terminações rígidas em  $x = 0$  e  $x = L_x$ .

As ondas estacionárias podem ser de três tipos, classificadas em tipos de ondas:

1. AXIAIS, onde dois dos  $n$  são zeros. Nesse caso, as ondas se movem paralelas a um dos eixos,  $x$ ,  $y$  ou  $z$ . Cada modo axial envolve somente duas superfícies opostas e paralelas, seguindo apenas um eixo das coordenadas, cujo movimento é em linha.
2. TANGENCIAIS, onde um dos  $n$  é zero. Essas ondas se movem paralelas a um dos planos,  $xy$ ,  $yz$  ou  $zx$ . Cada modo tangencial envolve quatro superfícies e segue dois eixos da coordenada, formando um movimento em um plano.
3. OBLÍQUAS, onde nenhum  $n$  é zero. As ondas se movem nas três direções  $x, y, z$ . Cada modo oblíquo envolve todas as seis superfícies da sala e segue os três eixos da coordenada, gerando um movimento em todo volume.

A Figura 2.2 apresenta a visualização de todos os três modos, usando o conceito de raios de acordo com Everest (2001, p.324).

Como Kuttruff (1979, p.51) também descreve, referindo-se a Equação (2.20 a), a pressão é zero para qualquer tempo nos pontos nos quais pelo menos um dos cossenos se torna zero. Isso ocorre para todos os valores de  $x$  que são números inteiros ímpares de  $L_x/2n_x$  e da mesma forma para os valores de  $y$  e  $z$ . Assim, os pontos de pressão sonora zero formam três conjuntos de planos eqüidistantes, chamados de planos nodais, que são mutuamente ortogonais. Os números  $n_x$ ,  $n_y$  e



$n_z$  indicam os números de planos nodais perpendiculares ao eixo  $x$ , ao eixo  $y$  e ao eixo  $z$ , respectivamente. Para salas não retangulares, as superfícies onde a pressão sonora é zero, geralmente não são mais planas. São tratadas como superfícies nodais.

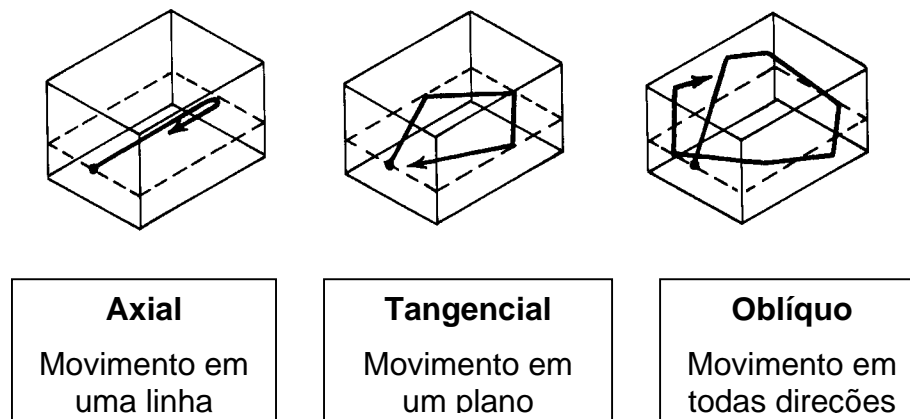


Figura 2.2: Visualização dos modos da sala axial, tangencial e oblíquo, usando o conceito dos raios. Fonte: adaptado de Everest (2001, p.324).

A fórmula mais exata para cálculo da quantidade de frequências naturais,  $N_f$ , (KUTTRUFF, 1979, p.56) é dada por:

$$N_f = \frac{4\pi}{3} V \left( \frac{f}{c} \right)^3 + \frac{\pi}{4} S \left( \frac{f}{c} \right)^2 + \frac{L f}{8 c} \quad (2.21)$$

onde:

$S$  é a área de todas as paredes  $2(L_x L_y + L_x L_z + L_y L_z)$  e

$L = 4(L_x + L_y + L_z)$  a soma de todos os comprimentos das arestas da sala retangular.

Nas salas retangulares com paredes não rígidas, as componentes normais de velocidade das partículas têm valores diferentes de zero. Portanto, as condições de contorno da Equação (2.13) devem ser substituídas pelas mais genéricas da Equação (2.9). Para as paredes perpendiculares ao eixo  $x$  do sistema de coordenadas é preciso que:

$$\zeta_x \frac{dp_1}{dx} = ikp_1 \quad \text{para } x = 0 \quad (2.22)$$

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

A impedância específica  $\zeta_x$  das paredes no eixo  $x$  é considerada constante, o mesmo é válido para as condições de contorno análogas referente as paredes perpendiculares aos eixos  $y$  e  $z$ , respectivamente. Assim, cada par de paredes tem propriedades acústicas uniforme. A frequência contida em  $k$  e em  $\zeta$  é considerada como uma constante e são esperadas funções de modos mutuamente ortogonais.

A solução da equação da onda pode ser dividida em três fatores  $p_1$ ,  $p_2$  e  $p_3$ , cada qual depende somente de uma coordenada espacial.

Para o presente objetivo, é mais útil escrever a solução geral para  $p_1$  na forma complexa, como:

$$p_1(x) = C_1 \exp(-ik_x x) + D_1 \exp(ik_x x) \quad (2.23)$$

De acordo com Kuttruff (1979, p.57) obtém-se duas equações lineares e homogêneas para as constantes  $C_1$  e  $D_1$ :

$$C_1(k + k_x \zeta_x) + D_1(k - k_x \zeta_x) = 0 \quad (2.24)$$

$$C_1(k - k_x \zeta_x) \exp(-ik_x L_x) + D_1(k + k_x \zeta_x) \exp(ik_x L_x) = 0$$

que apresenta uma solução de velocidade da partícula não nula somente se o determinante do coeficiente for zero. Isso resulta em uma equação onde os valores admissíveis de  $k_x$  podem ser determinados de tal modo que:

$$\exp(ik_x L_x) = \pm \frac{k - k_x \zeta_x}{k + k_x \zeta_x} \quad (2.25)$$

que é equivalente a

$$\tan u = i \frac{2u\zeta_x}{kL_x} \quad \text{e} \quad \tan u = i \frac{kL_x}{2u\zeta_x} \quad (2.26)$$

com  $u = \frac{1}{2}k_x L_x$

Já que a impedância acústica específica da parede é geralmente complexa, deve-se também esperar valores complexos para a solução  $k_x$ :

$$\zeta_x = \xi_x + i\eta_x \quad (2.27)$$

$$k_x = \beta_x - i\gamma_x \quad (2.28)$$

Em se tratando de paredes com impedância puramente imaginária, isto é,  $\xi_x = 0$  (elemento resistivo nulo), não ocorrerá absorção de energia nas paredes desde que o valor absoluto do coeficiente da reflexão seja 1. Os termos da direita das Equações (2.26) neste caso são reais e, portanto, o mesmo é válido para os valores admissíveis de  $u$  e  $k_x$ , como era o caso das paredes rígidas. Se  $k_x \neq 0$ , as suposições feitas aqui podem ser reescritas, ao invés da Equação (2.25), desde que  $k_x |\zeta_x| \gg k$ , da seguinte forma:

$$\exp(ik_x L_x) \approx \mp \left( 1 + i \frac{2k}{k_x \eta_x} \right) \quad (2.29)$$

Se a parede possui a impedância de uma mola, isto é, se  $\eta_x < 0$  o argumento da função exponencial diminui com o aumento da compliância. O autovalor correspondente é, portanto, menor do que era para as paredes rígidas.

Se ao contrário,  $\eta_x > 0$ , isto é, se a impedância é aquela de uma massa, todos os valores admissíveis de  $k_x$  se tornam maiores do que com paredes rígidas e assim geram as frequências naturais. Se os valores admissíveis de  $k_x$  forem denotados por  $k_{xn_x}$ , os autovalores da equação diferencial original são dados por:

$$k_{n_x n_y n_z} = \left( k_{x n_x}^2 + k_{y n_y}^2 + k_{z n_z}^2 \right)^{1/2} \quad (2.30)$$

Dessa relação conclui-se que para as paredes de impedâncias puramente imaginárias, portanto sem o fator resistivo, todos os autovalores sofrem um pequeno deslocamento com relação à parede totalmente rígida.

Os modos normais são dados, como no caso da parede rígida, pelo produto de três cossenos onde se deve substituir, no entanto, os valores admissíveis das Equações (2.16), (2.17) e (2.18) pelas soluções da Equação (2.26) e adicionar os ângulos de fase convenientes para os argumentos dos cossenos (KUTTRUFF, 1979, p. 59).

Em se tratando de paredes com impedância de elevado valor na parte real, da Equação (2.25) obtém-se:

$$\exp(i\beta_x L_x) \exp(\gamma_x L_x) = \pm \frac{k - k_x \xi_x}{k + k_x \xi_x} \approx \mp \left( 1 - \frac{2k}{k_x \xi_x} \right) \quad (2.31)$$

Uma vez considerado que  $\xi_x \gg 1$ , conclui-se que  $\gamma_x \ll \beta_x$  e assim pode-se com segurança, substituir  $k_x$  por  $\beta_x$  do lado direito da equação. Então  $\exp(i\beta_x L_x) \approx \mp 1$ , os valores admissíveis de  $\beta_x$  são quase os mesmos como do  $k_x$  da Equação (2.16). Além disso, através da Equação (2.31), tem-se:

$$\exp(\gamma_x L_x) \approx 1 + \gamma_x L_x \approx 1 - \frac{2k}{\beta_x \xi_x} \quad (2.32)$$

portanto,

$$-\gamma_x \approx \frac{2k}{\beta_x L_x \xi_x} \quad (2.33)$$

Da mesma forma se obtém as fórmulas para outros eixos da coordenada. Os valores  $\beta$  são chamados de *constantes de fase*.

Introduzindo os valores calculados de  $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$  na Equação (2.30), obtém-se os autovalores de acordo com:

$$k_{n_x n_y n_z} = \left[ (\beta_{n_x} - i\gamma_{n_x})^2 + (\beta_{n_y} - i\gamma_{n_y})^2 + (\beta_{n_z} - i\gamma_{n_z})^2 \right]^{1/2} \quad (2.34)$$

$$\approx \beta_{n_x n_y n_z} - i \frac{\gamma_{n_x} \beta_{n_x} + \gamma_{n_y} \beta_{n_y} + \gamma_{n_z} \beta_{n_z}}{\beta_{n_x n_y n_z}} \quad (2.35)$$

onde

$$\beta_{n_x n_y n_z}^2 \approx \pi^2 \left[ \left( \frac{n_x}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{n_y}{L_y} \right)^2 + \left( \frac{n_z}{L_z} \right)^2 \right] \quad (2.36)$$

Na Figura 2.3 o valor absoluto do fator dependente de  $x$ , de um determinado modo normal, é representado em três casos: a) em paredes rígidas, que tem alta impedância ( $\zeta_x = \infty$ ); b) para parede revestida com uma certa massa, sem absorção de energia, cuja impedância é reatância pura ( $\zeta = 0, \eta_x > 0$ ) e c) para paredes com impedância resistiva pura. No segundo caso, os nodos são simplesmente deslocados, mas a forma da onda estacionária permanece inalterada. No terceiro caso, ao contrário, onde há absorção de energia na parede, não existem mais os nodos bem definidos, a amplitude da pressão é diferente de zero em todos os pontos. Isto ocorre porque as paredes dissipam energia das ondas sonoras em propagação, assim as ondas estacionárias puras não existem mais. A mesma situação ocorre, em princípio, quando uma onda sonora plana se choca em uma parede plana cujo coeficiente de reflexão é ligeiramente diferente de 1.

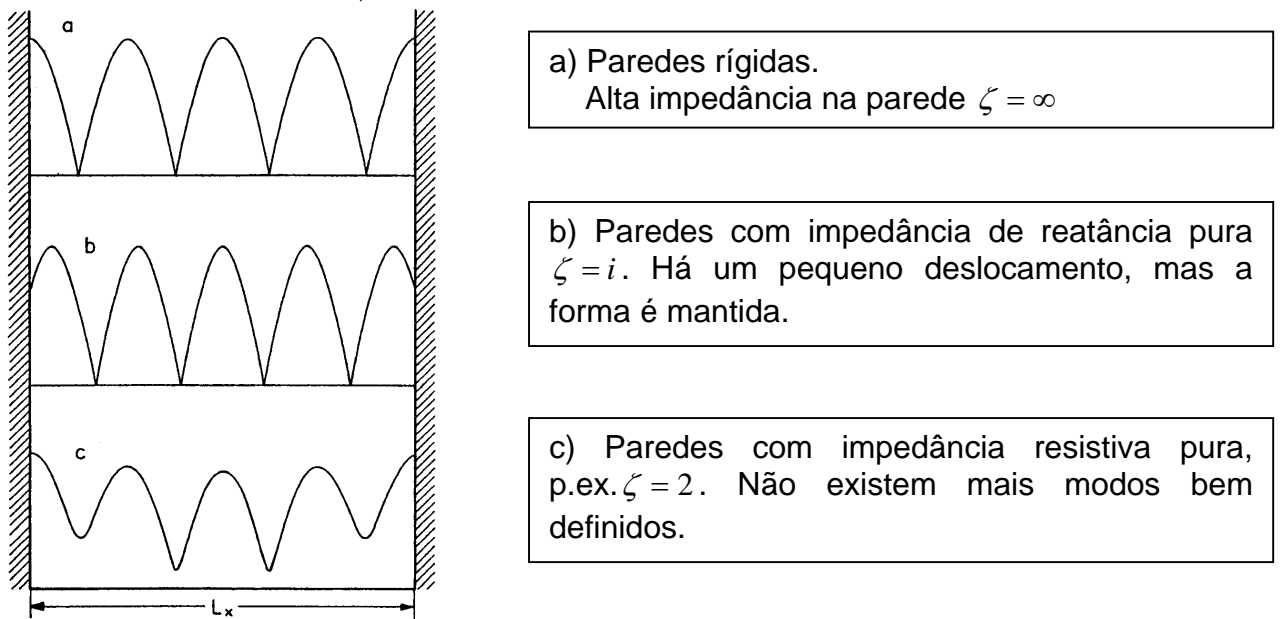


Figura 2.3: Ondas estacionárias em uma dimensão da sala,  $n_x = 4$ . Fonte: Adaptado de Kuttruff (1979, p.60).

Segundo Kuttruff (1979, p.61) os modos normais para a impedância real da parede são dados aproximadamente por:

$$p_{n_x n_y n_z}(x, y, z) = C_{n_x n_y n_z} \cos(\beta_{n_x} x + \psi_{n_x}) \cos(\beta_{n_y} y + \psi_{n_y}) \cos(\beta_{n_z} z + \psi_{n_z}) \quad (2.37)$$

considerando que os ângulos de fase são valores complexos, contudo, pequenos.

A média do espaçamento modal em frequência entre máximos adjacentes é dada pela fórmula de Rice (TENENBAUM, 2000, p.37), de acordo com:

$$\Delta f = \frac{\delta}{\sqrt{3}} \quad (2.38)$$

onde  $\delta$  é o valor médio das constantes de amortecimento associadas às frequências adjacentes.

## 2.2.2 Modelo Geométrico

Conforme estudado no modelo modal de salas, a aplicação da teoria das ondas sonoras é muito útil para as baixas freqüências, mas não é conveniente para análise do campo sonoro quando se trata de freqüências médias e, principalmente, das altas, devido ao grande número de modos que surgem. Nesse caso, o uso do modelo geométrico se torna mais interessante. A teoria de onda sonora é, então, desconsiderada e introduz-se a teoria de raios acústicos como raios luminosos. Tal como na ótica geométrica, os raios partem uniformemente da fonte e espalham-se na sala, refletindo-se com atenuação de cada superfície que atingem. O fenômeno da reflexão é o mais importante a ser considerado. Fenômenos como a refração e difração são, em princípio, desconsiderados, o mesmo ocorrendo com a interferência. Entende-se como refração, a mudança de direção acompanhada da mudança da velocidade de propagação quando do encontro com outro meio diferente ao da propagação.

O modelo geométrico não esclarece todos os fenômenos que ocorrem em acústica de salas, mas descreve razoavelmente bem os aspectos mais importantes do ponto de vista prático.

A teoria de raios acústicos considera que o som se propaga em forma de raio, com propriedades semelhantes às encontradas na ótica geométrica (GERGES, 2000, p.306). Para chegar-se a essa simplificação, considera-se que o comprimento de onda seja bem menor quando comparado às dimensões da sala. Portanto, é interessante para a aplicação nas altas freqüências. A freqüência acima da qual a distribuição das auto freqüências no espectro passa a ser considerada como contínua, é denominada freqüência de Schroeder ou freqüência de corte da sala. (TENENBAUM, 2000, p.37). Essa freqüência é o limite aceito por vários especialistas, acima da qual a teoria de raios acústicos é válida (GERGES, 2000, p.306).

A freqüência de corte ou a freqüência de Schroeder é dada por:

$$f_c \approx \frac{5000}{\sqrt{V\delta}} \approx 2000 \sqrt{\frac{T_r}{V}} \quad (2.39)$$

onde  $T_r$  é o tempo de reverberação (s) e  $V$  o volume da sala ( $m^3$ ). (VORLANDER, 1998).

Conforme Tenenbaum (2000, p.41), as características dos raios sonoros são: os raios partem da fonte e se propagam ortogonalmente à frente de onda; a energia de cada raio decai com o quadrado da distância até a fonte; a amplitude da pressão sonora decai linearmente com a distância; cada raio corresponde a um cone ou pirâmide que transporta uma porção fixa da energia da fonte e cuja área da base cresce com o quadrado da distância (*cone-tracing*).

Dois tipos de algoritmos computacionais, baseados nos princípios da acústica geométrica, foram desenvolvidos para se chegar a uma resposta impulsiva aproximada: o de imagens especulares ou *image-source* e raios acústicos ou *ray-tracing*.

O de imagens especulares é baseado na idéia de que cada reflexão pode ser imaginada como uma fonte virtual existente fora da sala, como pode ser visto na Figura 2.4, e constituída da *imagem especular* da fonte com relação à parede plana, cuja energia sonora ao cruzar a fronteira sofre uma perda correspondente ao coeficiente de absorção da superfície de reflexão.

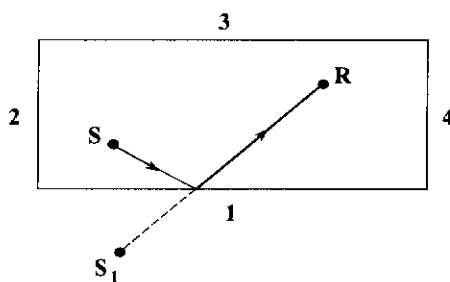


Figura 2.4: Representação da sala com a fonte virtual especular substituindo uma reflexão de primeira ordem. Fonte: Gerges (2000, p.307).

Esse algoritmo apresenta como vantagem principal a boa resolução temporal obtida, fato importante, principalmente, quando se pretende realizar a convolução da resposta impulsiva com um sinal gravado, com certa freqüência de amostragem, em processos de *auralização*. Em compensação, o tempo de computação necessário para calcular respostas impulsivas cresce exponencialmente com o comprimento dessas. Outra desvantagem é que o algoritmo não leva em conta os efeitos de



difusão das reflexões ou o espalhamento devido às formas irregulares das superfícies refletoras, conforme afirma Gerges (2000, p.307).

O algoritmo de raios sonoros, ou *Ray-Tracing*, consiste em acompanhar os raios sonoros, levando em consideração a lei de Snell para reflexão. Apesar de não oferecer resultado com boa resolução temporal, o algoritmo pode levar em conta as reflexões difusas e ainda necessitar de um tempo de computação que é apenas proporcional ao comprimento da resposta impulsiva.

Rindel (2000, p.220) afirma que as desvantagens dos dois métodos clássicos, o de imagens especulares (*image-source*) e o de raios acústicos (*ray-tracing*), têm levado ao desenvolvimento de modelos híbridos, que combinam as melhores características de ambos os métodos (VORLANDER, 1989; NAYLOR, 1992, 1993). Atualmente existem programas comerciais para simulação em computadores, baseados em algoritmo híbrido.

É importante observar que um raio sonoro pode refletir de uma forma não só especular como, também, difusa. Na reflexão especular, o raio incidente e o raio refletido estão no mesmo plano e o ângulo de incidência é idêntico ao ângulo de reflexão (Lei de Snell). Na reflexão difusa, o raio refletido distribui sua energia para todas as direções. Há modelos em que parte da energia é refletida especularmente e parte difusamente.

Conforme afirma Kuttruff (1979, p.80), se existir uma irregularidade na parede de reflexão, cujas áreas são comparáveis ao comprimento de onda ou menor que ela, a energia sonora incidente é espalhada em um ângulo sólido específico. Nesse caso, as reflexões sonoras são chamadas de difusas ou, mais exatamente, de parcialmente difusas. A reflexão se torna totalmente difusa se a distribuição direcional do som refletido ou a energia espalhada for independente da direção do som incidente.

A reflexão totalmente difusa de uma parede segue a lei de *coseno de Lambert*. Seja uma área de elemento  $dS$  atingida por um raio formando um ângulo  $\vartheta_0$  com o eixo normal à parede,  $I_0$ . Então, a intensidade do som que é espalhado em uma direção caracterizado pelo ângulo  $\vartheta$ , medido a uma distância  $r$  da superfície, é dado por:

$$I(r) = I_o dS \frac{\cos \vartheta \cdot \cos \vartheta_o}{\pi \cdot r^2} = B_o dS \frac{\cos \vartheta}{\pi r^2} \quad (2.40)$$

onde  $B_o$  é a energia incidente sobre a unidade de área da parede por segundo.

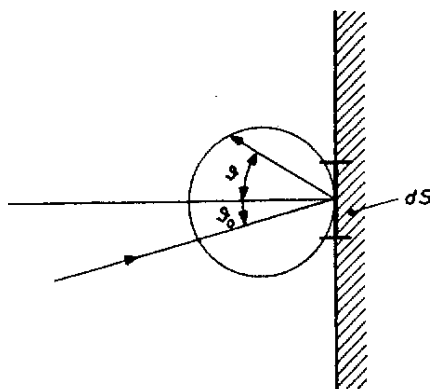


Figura 2.5: Reflexão sonora idealmente difusa em uma superfície irregular.

Fonte: Kuttruff (1979, p. 81).

A Equação (2.40) mostra não haver absorção, ou seja, a energia incidente é reemitida completamente. Quando isto não ocorre,  $I(r, \vartheta)$  tem que ser multiplicado pelo fator de absorção sonora  $<1$ .

### 2.2.3 Reverberação

A reverberação é formada por uma grande quantidade de sons refletidos sobrepostos sem descontinuidade que se somam ao som direto, prolongando-o. O *tempo de reverberação* é definido como o tempo necessário para a densidade de energia sonora cair 60 dB depois da fonte sonora ser desligada. Isso depende das características acústicas e geométricas das paredes que refletem o som para o ambiente.

Em salas residenciais é comum encontrar superfícies de absorção acústica distribuídas não uniformemente. Os estudos para aperfeiçoamento das fórmulas de tempo de reverberação têm sido bastante úteis nas estimativas teóricas em relação aos valores medidos, em razão do tempo, custo e facilidade de previsão de resultados.

Nas condições do campo sonoro difuso, para uma sala reverberante com paredes de natureza acústica e geometria homogêneas e para uma fonte omnidirecional, Sabine (1964) define o tempo de reverberação de acordo com a média do coeficiente de absorção das paredes  $\bar{\alpha}$  como segue:

$$T_r = \frac{0.16V}{S\bar{\alpha}} \quad (2.41)$$

$V$  e  $S$  são o volume da sala e a área total da parede, respectivamente, e  $\bar{\alpha}$  é a média aritmética do elemento de área  $S_i$  associado ao coeficiente de absorção  $\alpha_i$ :

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i \quad (2.42)$$

$\bar{\alpha}$  é o coeficiente de absorção médio. É usual encontrar  $\bar{\alpha}$  maior que 1 para certos materiais absorventes.

A fórmula de Eyring (1930, p.217-241; 1933, p.178-192) leva em conta coeficientes de absorção relativamente altos e a expressão do tempo de reverberação permanece inalterada:

$$T_r = \frac{0.16V}{S\alpha_{E_y}} \quad (2.43)$$

$$\alpha_{E_y} = -\ln(1 - \bar{\alpha}) \quad (2.44)$$

Ducourneau e Planeau (2003) comentam que para baixas absorções, o coeficiente de absorção de Eyring é similar ao de Sabine:

$$\alpha_{E_y} = -\ln(1 - \bar{\alpha}) = \bar{\alpha} + \frac{\bar{\alpha}^2}{2} + \dots + \frac{\bar{\alpha}^n}{n} \quad (2.45)$$

Se  $\bar{\alpha}$  for baixo, então:

$$\alpha_{E_y} \approx \bar{\alpha} \quad (2.46)$$

Para tratar o problema do  $\bar{\alpha}$  maior que 1, Millington (1932, p.69-82) sugere substituir  $\bar{\alpha}$  por:

$$\alpha_{Mil} = -\frac{1}{S} \sum_i S_i \ln(1 - \alpha_i) \quad (2.47)$$

A fórmula do tempo de reverberação de acordo com Millington (1932) se torna, então:

$$T_r = \frac{0.16V}{S\alpha_{Mil}} = \frac{0.16V}{\sum_i S_i \ln\left(\frac{1}{1-\alpha_i}\right)} \quad (2.48)$$

A Equação (2.48) apresenta um inconveniente quando uma das áreas é muito absorvente porque, no caso, o tempo de reverberação é muito próximo a zero. Para permitir que a fórmula de Millington seja usada, Dance e Shield (1999, p. 1-18; 2000, p. 373-384) propõem um gráfico de conversão diminuindo os altos valores do coeficiente de absorção de Sabine como pode ser visto na Figura 2.6.

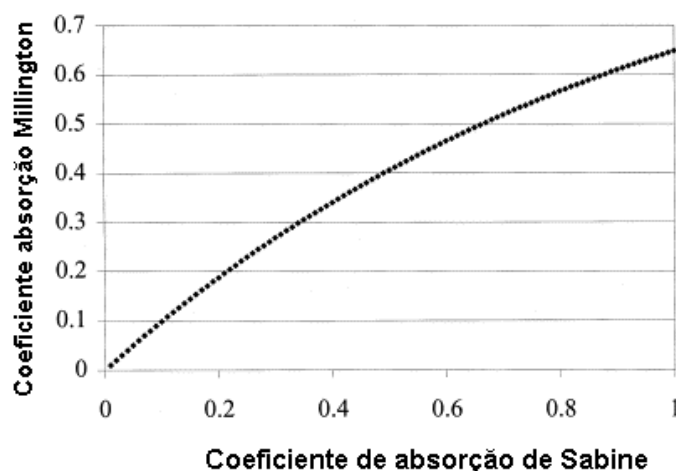


Figura 2.6: Gráfico de conversão do coeficiente de absorção de Sabine para Millington. Fonte: Ducourneau e Planeau (2003).

Kuttruff (1991;1995,p.288-293) estabeleceu uma fórmula de tempo de reverberação para salas com paredes difusas e para absorção distribuída não uniformemente, de acordo com Ducourneau e Planeau (2003). Kuttruff assume que, para reflexões difusas, as paredes da sala refletem o som de acordo com a lei de Lambert. Ele sugere correção na fórmula de Eyring introduzindo uma variável  $\gamma^2$  do caminho médio livre:

$$\alpha_{Kut} = \alpha_{E_y} \left( 1 - \frac{\gamma^2}{2} \alpha_{E_y} \right) + \frac{\sum_i (1 - \alpha_i) (\bar{\alpha} - \alpha_i) S_i^2}{S^2 (1 - \bar{\alpha})^2} \quad (2.49)$$

onde  $\gamma^2 \approx 0.4$  para salas retangulares.

Para salas retangulares, Arau-Puchades (1988, p.163-179) define uma absorção acústica média baseada no modelo de Eyring para todas as paredes:

$$\alpha_{ArP} = [-\ln(1 - \alpha_x)]^{\frac{S_x}{S}} \cdot [-\ln(1 - \alpha_y)]^{\frac{S_y}{S}} \cdot [-\ln(1 - \alpha_z)]^{\frac{S_z}{S}} \quad (2.50)$$

$$\alpha_{ArP} = [\alpha_x]^{\frac{S_x}{S}} \cdot [\alpha_y]^{\frac{S_y}{S}} \cdot [\alpha_z]^{\frac{S_z}{S}} \quad (2.51)$$

onde:

$S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_z$  são, respectivamente, as áreas das paredes perpendiculares aos sistemas de coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  e  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$ ,  $\alpha_z$  são os coeficientes de absorção acústica das paredes.

Arau-Puchades (1988) define o tempo de reverberação através de uma expressão que é o produto de três termos representando a absorção acústica na direção  $x$ ,  $y$  e  $z$ , como sendo:

$$T_r = \left[ \frac{0.16V}{-S \ln(1 - \alpha_x)} \right]^{\frac{S_x}{S}} \left[ \frac{0.16V}{-S \ln(1 - \alpha_y)} \right]^{\frac{S_y}{S}} \left[ \frac{0.16V}{-S \ln(1 - \alpha_z)} \right]^{\frac{S_z}{S}} \quad (2.52)$$

$$T_r = \frac{0.16V}{S [\alpha_x]^{\frac{S_x}{S}} \cdot [\alpha_y]^{\frac{S_y}{S}} \cdot [\alpha_z]^{\frac{S_z}{S}}} \quad (2.53)$$

Portanto, a energia acústica total decresce de acordo com as três funções exponenciais:

$$E(t) = E_o e^{-N_x \alpha_x t} e^{-N_y \alpha_y t} e^{-N_z \alpha_z t} \quad (2.54)$$

onde  $N_x$ ,  $N_y$  e  $N_z$  são as probabilidades de se ter uma reflexão sonora em uma parede paralela na direção  $x$ ,  $y$  ou  $z$  respectivamente.

A fórmula de Fitzroy é usada em salas retangulares onde as paredes opostas têm coeficientes de absorção similares (FITZROY, 1959, p. 893-897):

$$T_r = 0.16 \frac{V}{S^2} \left[ \frac{-S_x}{\ln(1 - \bar{\alpha}_x)} + \frac{-S_y}{\ln(1 - \bar{\alpha}_y)} + \frac{-S_z}{\ln(1 - \bar{\alpha}_z)} \right] \quad (2.55)$$

onde:

$\bar{\alpha}_x$ ,  $\bar{\alpha}_y$  e  $\bar{\alpha}_z$  são coeficientes de absorção sonora média das áreas em  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

$S_x$  é a área das paredes maiores,

$S_y$  área das paredes menores

$S_z$  a área do teto e piso.

Reynolds (1981, p. 404) comenta que Fitzroy baseou o seu argumento em raios acústicos, modificando a fórmula de Eyring, visualizando os campos sonoros que se estabilizam em um padrão de oscilações de ondas simultâneas ao longo dos três eixos perpendiculares de uma sala. Fitzroy considerou que existe um relacionamento entre as três razões de decaimento associadas com as três superfícies de paredes paralelas: teto e piso, laterais de paredes maiores e laterais de paredes menores.

Cada conjunto de superfícies paralelas representa uma porcentagem específica de uma energia sonora total em uma sala.

Ducourneau e Planeau (2003) afirmam que o modelo de absorção acústica usado na Equação (2.55) é o modelo da fórmula de Eyring, assim como a do Arau-Puchade. Neubauer (2001, p.115-137) propôs uma modificação na fórmula de Fitzroy que leva em conta a não uniformidade de absorção das paredes paralelas. O modelo de absorção usado nessa nova fórmula é baseado no modelo de Kuttruff:

$$\alpha^* \approx \alpha_{Ey} + \frac{\sum_i (1 - \alpha_i)(\bar{\alpha} - \alpha_i) S_i^2}{S^2 \cdot (1 - \bar{\alpha})^2} \quad (2.56)$$

O tempo de reverberação se torna:

$$T_r = 0.16 \frac{V}{S^2} \left[ \frac{S_x}{\alpha_x^*} + \frac{S_y + S_z}{\alpha_{y,z}^*} \right] \quad (2.57)$$

$\alpha_x^*$  representa a absorção acústica das paredes paralelas no eixo x e  $\alpha_{y,z}^*$  das paredes paralelas nos eixos y e z.

O caminho médio livre,  $l_m$ , que representa a distância média percorrida por uma onda entre duas reflexões, aparece na maioria dos modelos de tempo de reverberação:

$$l_m = \frac{4V}{S} \quad (2.58)$$

Todos os modelos mencionados anteriormente podem ser expressos em termos de caminho médio livre e do seu coeficiente de absorção acústica médio  $\alpha$ :

$$T_r = \frac{0.04 \cdot l_m}{\alpha} \quad (2.59)$$

Pujolle (1972;1975a;1975b) introduziu uma nova fórmula para  $l_m$  que leva em conta as dimensões da sala. Pujolle propôs inicialmente:

$$l_m = \frac{1}{6} \left( \sqrt{L^2 + l^2} + \sqrt{L^2 + h^2} + \sqrt{h^2 + l^2} \right) \quad (2.60)$$

e

$$l_m = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( L^2 \cdot l^2 + L^2 \cdot h^2 + h^2 \cdot l^2 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.61)$$

onde  $L$ ,  $h$  e  $l$  são respectivamente o comprimento, a altura e a largura da sala.

O tempo de reverberação de acordo com Pujolle é:

$$T_r = \frac{0.04l_m}{\alpha_{Ey}} = \frac{0.04l_m}{-\ln(1-\alpha)} \quad (2.62)$$

Uma absorção acústica média é proposta por Ducourneau e Planeau (2003). O trabalho realizado por esses pesquisadores envolveu a caracterização acústica de paredes planas heterogêneas presentes em locais de trabalho, o que permitiu estudar e melhorar as técnicas para determinar a absorção acústica equivalente de uma superfície heterogênea. Essa é uma característica presente também na maioria dos ambientes residenciais. O estudo possibilitou, também, quantificar a influência de uma absorção acústica espacial não uniforme sobre o tempo de reverberação. Foram consideradas muitas medições do tempo de reverberação em uma sala reverberante utilizando painéis absorventes posicionados em diferentes lugares da sala para criar heterogeneidade. A diferença no tempo de reverberação experimental devido a não uniformidade espacial da absorção e a posição relativa da fonte sonora e painéis foram observados. Assim, foi considerada a posição da fonte em relação à posição dos painéis de absorção no cálculo da absorção média da sala. A variável geométrica que atende essa necessidade é o ângulo sólido e, na pesquisa, a relação de área foi substituída pela relação do ângulo sólido em todas fórmulas de absorção acústica média padrão. O tempo de reverberação obtido com a fórmula analítica modificada ficou mais próximo ao medido do que com a fórmula padrão, segundo Ducourneau e Planeau (2003).

O estudo mostrou que o campo sonoro é sempre influenciado pelas posições relativas entre fonte sonora e painéis. Como o tempo de reverberação é condicionado pelas primeiras reflexões sobre as paredes, se o material absorvente



estiver próximo à fonte, o modelo padrão de Sabine pode não oferecer uma boa precisão nos cálculos e deve ser modificado levando-se em conta o ângulo sólido, segundo Ducourneau e Planeau (2003). O modelo do tempo de reverberação, aplicando tal conceito, foi validado em duas salas industriais.

No estudo da qualidade acústica de salas, conhecer o tempo de reverberação é extremamente importante, porém é não suficiente. É preciso, muitas vezes, adequá-lo ao uso da sala. Os ambientes logo que construídos, normalmente sem qualquer cuidado quanto ao tratamento acústico, apresentam um tempo de reverberação elevado que prejudica a qualidade sonora e uma das formas de reduzi-lo é através da introdução de superfícies de absorção sonora no ambiente.

O coeficiente de absorção sonora é definido como a razão entre a energia absorvida e a energia incidente. É inversamente proporcional ao tempo de reverberação da sala e materiais porosos e fibrosos contribuem na absorção das frequências médias e altas, que se tornam mais eficazes se posicionados no ponto de maior velocidade da partícula sonora. O conceito teórico é descrito a seguir.

Em se tratando de campo sonoro à frente de uma superfície rígida, tem-se a velocidade de partícula (TEMKIN, 1981, p.78), como sendo:

$$\bar{u} = \bar{u}_i + \bar{u}_r = A.e^{i(kx-\omega t)} + \bar{B}.e^{-i(kx+\omega t)} \quad (2.63)$$

onde  $\bar{u}_i$  é a velocidade incidente e  $\bar{u}_r$  a refletida.

Na superfície da parede rígida a velocidade é zero,  $x = 0$  e tem-se  $\bar{B} = -A$

$$\bar{u}(x,t) = A.e^{-i\omega t} (e^{ikx} - e^{-ikx}) = 2iA.e^{-i\omega t} .senkx \quad (2.64)$$

ou

$$u(x,t) = \text{Re} \left\{ \bar{u}(x,t) \right\} = 2A \text{sen}(kx) \text{sen}(\omega t) \quad (2.65)$$

A Equação (2.65) representa uma onda estacionária porque em qualquer ponto do campo sonoro as propriedades do campo ( $p, u, \rho, T, \dots$ ) variam apenas e harmonicamente com o tempo.

A pressão acústica correspondente ao campo de velocidade tratado, é dada por:

$$\bar{p}(x,t) = 2\rho_o c_o A \cos(kx) e^{-i\omega t} \quad (2.66)$$

ou

$$p(x,t) = \text{Re}\{\bar{p}(x,t)\} = 2\rho_o c_o A \cos(kx) \cos(\omega t) \quad (2.67)$$

Regiões onde a pressão se anula são chamadas de *nós*. Regiões onde a pressão é máxima, são chamadas de *antinós*.

Observando-se a Figura 2.7, onde está representada a variação espacial da raiz quadrada média da pressão e da velocidade das partículas sonoras, nota-se que o primeiro nó da pressão ocorre a uma distância  $x_o$  da parede, dada por:

$$kx_o = \pi/2 \quad (2.68)$$

ou seja, o primeiro nó está a uma distância  $x_o = \lambda/4$ .

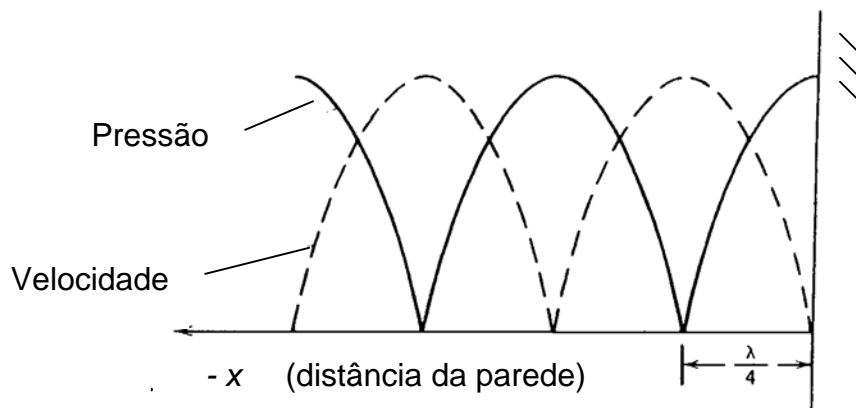


Figura 2.7: Variação espacial da raiz quadrada média (r m s) da pressão e da velocidade das partículas. Fonte: Temkin (1981, p.79).

As Equações (2.65) e (2.67) mostram que existem pontos de maior velocidade das partículas e outros de maior pressão sonora. O material absorvente colocado em um dos pontos de maior velocidade das partículas sonoras, torna-o mais eficaz. A

Figura 2.8 ilustra o material colocado onde a velocidade da partícula é máxima, isto é, a  $\lambda/4$  de distância em relação a superfície de reflexão.

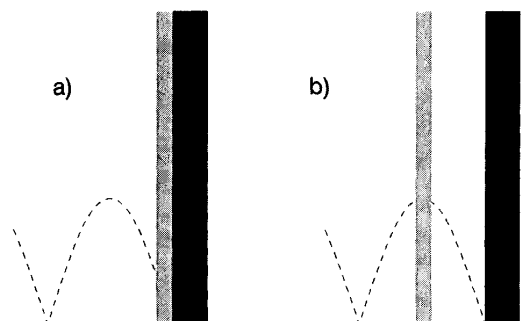


Figura 2.8: Posicionamento do material absorvente sobre a parede (a) e a  $\lambda/4$  de distância, no ponto de velocidade máxima (b). O uso de material nessa posição indicada em (b) se torna mais eficiente. Fonte: Kuttruff (2000, p.170).

As considerações apresentadas sobre as variações de velocidade das partículas e pressão sonora que ocorrem a certas distâncias de uma parede rígida, além do seu comportamento na superfície, foram aplicadas neste estudo quando do revestimento das paredes da sala de teste. Lá foram utilizadas cortinas, formando uma espessura média de 0,15 m, que ofereceu bom amortecimento na faixa média, em torno de 2.200 Hz, conforme será apresentado no Capítulo 4.

#### 2.2.4 Salas com Sistemas Eletroacústicos

Neste item são feitas as considerações quanto ao uso de equipamentos eletroacústicos em salas, devido a sua importância nos sistemas de áudio e vídeo. Como poderá ser visto nos itens 3.2 e 3.3, o canal central exerce um papel fundamental na reprodução da voz em diálogos nos filmes, exigindo cuidados quanto à inteligibilidade. Os canais traseiros, chamados de *surround*, devem receber os sinais elétricos em tempos adequados, ajustando-se o chamado *delay time*, que pode variar de 0 a 15 ms ou, até, 30 ms, dependendo do produto, em função das distâncias entre ouvinte e fontes sonoras, recriando-se o som ambiente das cenas, dando a sensação de uma certa reverberação.

Existem atualmente vários pontos de estudos em comum entre a acústica de salas e a eletroacústica, como afirma Kuttruff (1979, p.267). A grande vantagem de um sistema eletroacústico é poder ajustar a projeção do som, controlando-se o nível de pressão sonora, sua distribuição e o tempo que o sinal deve atingir determinadas áreas do público ouvinte. Com isso pode-se melhorar a inteligibilidade da fala, por exemplo, simulando um tempo de reverberação relativamente mais curto que na música, onde é requerido um tempo de reverberação mais longo para criar a sensação de ambiência. Em se tratando de qualidade, tais condições só seriam válidas para um ambiente acusticamente preparado que permitisse os ajustes através dos equipamentos sem a interferência relevante da reverberação natural, puramente acústica.

Assim, o fato de se usar bons sistemas eletroacústicos, que reproduzem sinais sonoros com alta fidelidade, não significa que o tratamento acústico da sala possa ser dispensado. O conhecimento dos fatores acústicos responsáveis pela inteligibilidade da fala, pela definição de sons musicais e os parâmetros pelos quais esses fatores são influenciados pela arquitetura do ambiente, tanto quanto a interação entre a sala e o sistema elétrico, é de extrema importância. Portanto, a acústica de salas e a eletroacústica devem se completar.

Para se ter sensação de estar ouvindo um som natural, ou seja, onde não existe um sistema eletroacústico em operação, o som amplificado deve atingir o ouvinte junto com o som original, segundo o conceito da lei da primeira onda frontal, conforme afirma Kuttruff (1979). Portanto, só havendo sobreposição de sinais, ganho na amplitude e sem alterações na fase. Isto significa que o som amplificado deve ser atrasado, retardando o sinal elétrico, em relação ao som original, compensando o tempo que este último necessita para percorrer a distância entre a fonte geradora do sinal e o ouvinte. Porém, só isso não é suficiente. É preciso, também, que o som amplificado tenha qualidade na resposta em frequência, não tenha distorção harmônica e, também, tenha o mesmo timbre do original. Os equipamentos eletroacústicos podem influenciar significativamente nos resultados e por isso precisam ser de boa qualidade técnica.

Segundo Kuttruff (1979, p.276), a ilusão do som natural pode ser mantida mesmo que o nível de pressão sonora da caixa acústica, na posição do ouvinte, exceda 5 a 10 dB ao produzido pela fonte do som natural, com o sinal da caixa acústica

retardado cerca de 10 a 15 ms em relação à fonte do som natural, conforme um estudo foi realizado por *Haas*, conhecido como Efeito *Haas* (HASS, 1951). O tempo adequado de retardo do sinal elétrico dependerá da distância entre a fonte e o ouvinte.

As exatas condições sob as quais o aumento de volume também contribuirá na inteligibilidade da fala foi pesquisado por Lochner e Burger (1959). De acordo com o estudo, a melhora da inteligibilidade da fala ocorrerá se a energia emitida pelo alto falante não excitar substancialmente a reverberação da sala, atingindo o ouvinte de forma direta. Para que isto ocorra, é necessário que a caixa acústica esteja posicionada próximo aos ouvintes e assim a distância entre fonte sonora e ouvinte seja bem menor que a distância percorrida pelas ondas refletidas (reverberação) ou que, devido a sua direcionalidade, produza poucas reflexões nas paredes e irradie sua energia predominantemente em direção ao público, que apresenta uma característica de componente absorvente.

Essa conclusão vem reforçar que a inteligibilidade da fala, reproduzida por um sistema de caixas acústicas, não depende só da amplificação mas, sim, e muito, do tratamento das paredes da sala, localização e orientação das caixas acústicas.

Além disso, Kuttruff (1979) afirma que todos os sinais acústicos gerados devem estar em fase em sua origem para evitar cancelamentos e que o equilíbrio na distribuição da potência acústica na sala é fundamental para o conforto do usuário. Assim, o controle individual da potência elétrica em cada caixa acústica, às vezes, é necessário devido às variações de sensibilidade e posicionamento das fontes sonoras.

A sensação de reverberação na sala pode ser alterada através do sistema eletroacústico. Quando uma sala é projetada para um determinado uso pode não servir para outro sob o ponto de vista acústico. Para otimizá-la, o tempo de reverberação deve ser adequado à finalidade desejada e isso pode ser obtido pelo método puramente acústico, isto é, por materiais de absorção como descrito por Kuttruff (1979). Porém, para se alterar a absorção de uma sala para cada uso nem sempre é possível ou prático. Assim, em princípio, o método mais versátil e talvez menos custoso é a aplicação de sistemas eletroacústicos.

Kuttruff (1979, p. 288), descreve alguns métodos para controle da reverberação com auxílio da eletroacústica, aplicados em grandes salas. Um dos métodos,

chamado de *sistema de ressonância assistida* foi originalmente desenvolvido para o *Royal Festival Hall*, em Londres (Kuttruff, 1979, p. 298). Essa sala, projetada e construída para ser usada unicamente como sala de concertos, tem um volume de 22.000 m<sup>3</sup> e capacidade para 3.000 pessoas. Desde a sua inauguração, em 1951, foi percebido que o tempo de reverberação não era tão longo como deveria para as condições ótimas, especialmente para as baixas frequências. Em 1964 foi instalado um sistema eletroacústico para aumentar o tempo de reverberação. Inicialmente foi em caráter experimental, mas, com o passar dos anos, vários aspectos da instalação foram melhorados e implantados em definitivo. Os resultados obtidos foram avaliados a partir de gravações de peças musicais apresentadas nessa sala de concerto.

O sistema apresentou o efeito muito favorável de aumentar o volume total dos sons percebidos pelos ouvintes e, também, de incrementar a difusão. Sob o ponto de vista subjetivo, a acústica da sala pareceu ser muito beneficiada pelo sistema, conforme manifestações quanto ao projeto, de músicos conhecidos, como descrito por Parkin e Morgan (1970).

Torna-se evidente como um sistema eletroacústico pode contribuir na sensação de reverberação da sala.

### **2.3 Parâmetros de Qualidade Acústica de Salas**

Nas últimas décadas muitas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de se definir parâmetros de qualidade acústica de salas, seus valores ótimos e seus limites. Essa análise é feita subjetivamente, observando o som natural, ao vivo, na posição de ouvinte, de músico ou palestrante. Por essa razão, a atividade não é simples, pois cada pessoa tem uma percepção diferente do som, cada ambiente é um caso diferente, uma música difere da outra em seus detalhes de frequência e amplitude, assim como a fala. Um observador pode perceber a acústica de uma sala de uma determinada forma em um dia e de outra no dia seguinte. Assim, a avaliação subjetiva de uma boa acústica para uma sala é feita de forma a envolver pessoas treinadas em audição, podendo ser profissionais de diversas áreas, para que se tenha uma definição média apropriada de parâmetros acústicos. O conhecimento

desses observadores no campo de audição, os chamados *audiófilos*, é de suma importância e traz resultados interessantes.

Uma forma de avaliar objetivamente um ambiente fechado é através da realização de medições para que se possa comparar os resultados e classificá-los com base naqueles existentes na literatura, que são conclusões obtidas de muitas pesquisas e avaliações subjetivas. Nas medições experimentais é fundamental o uso de equipamentos confiáveis e adequados, além dos procedimentos recomendados em pesquisas bem fundamentadas ou em normas.

Segundo estudos apresentados por Cavanaugh e Wilkes (1999, p. 157,242), existem os parâmetros que contribuem na definição da qualidade acústica de salas, determinando a impressão global do ambiente e que podem ser classificados em dois grupos: qualidades primárias e secundárias. Dentre as primeiras, podem ser destacadas: clareza (inteligibilidade), audibilidade, reverberação, espacialização, localização, timbre, balanço tonal, balanço relativo (razão de graves e agudos) e retorno. Dentre as qualidades secundárias pode-se citar: intimidade, difusividade, balanço do solista com a orquestra, balanço do coro com a orquestra, faixa dinâmica (pianíssimo a fortíssimo), ruído de fundo e ecos audíveis.

Um bom número de índices de qualidade acústica pode ser calculado a partir da resposta impulsiva. Várias das mais populares medições são definidas por Cavanaugh e Wilkes (1999, p.261,264) e, em sua maioria, são derivadas da pressão sonora em função do tempo, gravadas por microfones em determinados pontos da sala. A seguir são descritos os parâmetros utilizados nesta pesquisa.

O tempo de reverberação, ou *reverberation time*, ( $T_r$ ), denotado também por  $T_{60}$ , é o tempo que a pressão sonora leva para decair 60 dB depois da fonte sonora ser desligada. A reverberação é causada pelas múltiplas reflexões do som nas superfícies do recinto e é um parâmetro que relaciona o fenômeno físico com certas impressões auditivas como, por exemplo, a inteligibilidade.

O tempo de decaimento inicial, ou *Early Decay Time (EDT)*, é o tempo necessário para que o nível de pressão sonora decaia 10 dB, depois da fonte sonora ser desligada. Estudos mais recentes tem mostrado ser este um dos parâmetros mais importantes na percepção auditiva do ser humano. O tempo de decaimento inicial foi proposto por Jordan (1980) baseado numa pesquisa onde afirmava que a última parte do decaimento reverberante já era mascarada pelos sinais subseqüentes após

a queda dos dez primeiros dB's. Um estudo nesse sentido pode ser visto em Cremer e Muller (1982). Cervone (1990) mostrou uma relação significativa entre o tempo de decaimento inicial e de todas as impressões acústicas avaliadas por ouvintes de concertos ao vivo.

A razão da energia inicial e reverberante ( $EL_t$ ), conhecido também como *Clarity* ou *Clareza* ( $C_{50}$  e  $C_{80}$ ), compara a energia inicial de uma resposta impulsiva com o nível de energia reverberante. É a razão logarítmica dessas energias, conforme descreve Cavanaugh e Wilkes (1999, p.261). Essa medição foi desenvolvida por Reichardt (CREMER e MULLER, 1982), baseada na sugestão de Thiele de que a nitidez da fala era dependente dos níveis de energia útil, ou seja, a energia integrada de  $t = 0$  ms a  $t = 50$  ms, relativamente a energia sonora total, conhecido como  $C_{50}$ , e a observação da música por Reichardt, que levou a aceitação do valor de 80 ms como o limite de perceptibilidade da música, conhecido como  $C_{80}$ .

A expressão que descreve essas relações, é dada por:

$$C_t = 10 \log \frac{\text{energia inicial}}{\text{energia reverberante}} \quad (2.69)$$

Os índices de clareza  $C_{50}$  e  $C_{80}$  podem ser avaliados de acordo com as escalas apresentadas nas Figuras 2.9 e 2.10, respectivamente. (CAVANAUGH e WILKES, 1999, p.159, 264):

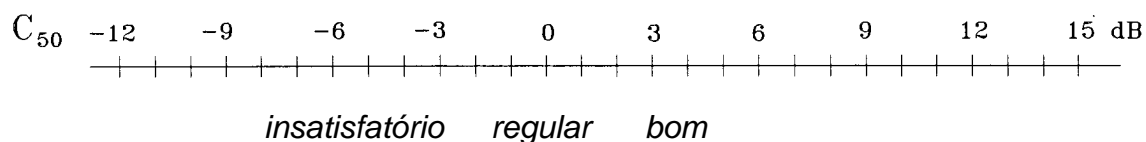


Figura 2.9: Valores recomendados de  $C_{50}$  (Fala)

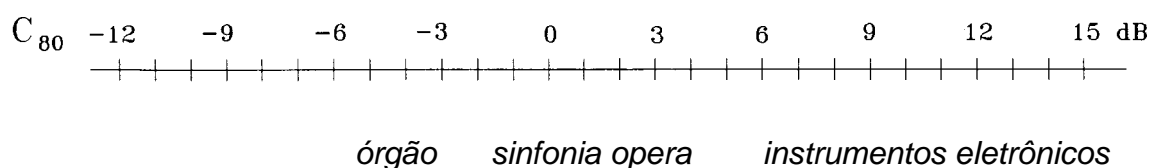


Figura 2.10: Valores recomendados de  $C_{80}$  (Música)



A razão de graves ( $BR$ ), baseada no tempo de decaimento inicial  $EDT$ , foi proposta por Beranek (1962), especialmente para avaliar os sons graves, conhecidos como *warmth*.  $BR$  é o resultado da razão entre a soma dos tempos de decaimento inicial em 125 Hz e 250 Hz e a soma dos tempos de decaimento inicial em 500 Hz e 1000 Hz. A expressão que descreve essa razão, é dada por:

$$BR = \frac{EDT_{125} + EDT_{250}}{EDT_{500} + EDT_{1000}} \quad (2.70)$$

Segundo Cavanaugh e Wilkes (1999, p.159, 264), a recomendação do valor da razão de graves ( $BR$ ) é que seja superior a 1.

A razão de agudos ( $TR$ ) baseada no tempo de decaimento inicial  $EDT$  é proposta para avaliar os sons agudos, o timbre ou o balanço tonal, especialmente o brilho (CHIANG, 1994), conhecido como *brilliance*.  $TR$  é o resultado da razão entre soma dos tempos de decaimento inicial em 2000 Hz e 4000 Hz e a soma dos tempos de decaimento inicial em 500 Hz e 1000 Hz. A expressão que descreve essa razão, é dada por:

$$TR = \frac{EDT_{2000} + EDT_{4000}}{EDT_{500} + EDT_{1000}} \quad (2.71)$$

Segundo Cavanaugh e Wilkes (1999, p.159, 264), a recomendação do valor da razão de agudos ( $TR$ ) é que seja superior a 1.

Para determinar a inteligibilidade da fala deve-se levantar a resposta impulsiva da sala e avaliar o parâmetro denominado *Definição* ( $D$ ), dado por:

$$D = \frac{\int_0^{0,05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} 100\% \quad (2.72)$$

A definição de uma sala é a razão entre a energia dos primeiros 50 ms e a energia de todo o decaimento. Na expressão (2.72), a pressão sonora é medida num ponto quando a sala é excitada por um impulso (TENENBAUM, 2000).

As diferentes finalidades a que se destinam as salas exigem diferentes tempos de reverberação. Diversas pesquisas foram realizadas com o objetivo de obterem-se valores ideais para tempos de reverberação para cada atividade, seja ela uma palestra ou um musical.

A Figura 2.11 mostra o tempo de reverberação médio de 50 salas de estar dos lares ingleses medidos por Jackson e Leventhal (1972), usando bandas de oitava de ruído. A média do tempo de reverberação diminui de 0,69 s em 125 Hz para 0,4 s em 8 kHz. Esses valores são considerados altos se comparados com as medições de 16 salas de estar realizadas pelos engenheiros da *BBC, British Broadcasting Corporation* de Londres, que encontraram em média 0,35 s e 0,45 s. Aparentemente, as salas medidas pelos engenheiros da *BBC* estavam mais mobiliadas do que aquelas medidas por Jackson e Leventhal (1972), o que presumivelmente estaria mais de acordo com as salas americanas, conforme Everest (2001, p.152-155).

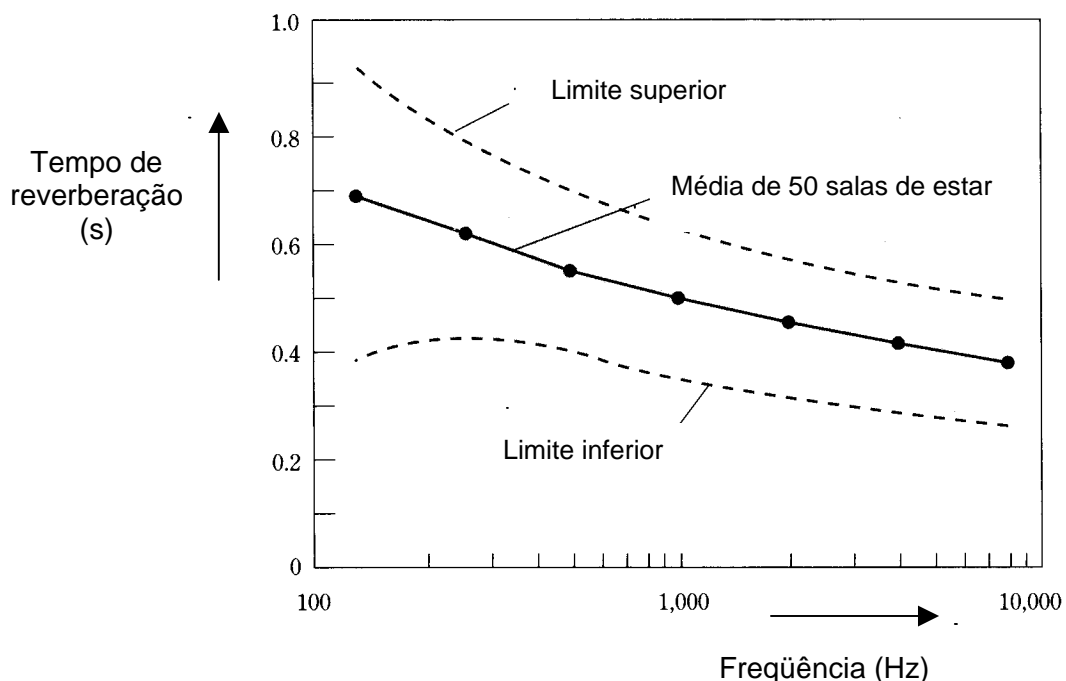


Figura 2.11: Média do tempo de reverberação para 50 salas de estar em função da frequência. Fonte: Adaptado de Everest (2001, p.155).

O estudo de Jackson e Leventhal (1972) envolveu 50 salas de estar de variados tamanhos, formas e quantidade de mobiliário. Os volumes variaram de  $24,92 \text{ m}^3$  a  $75,89 \text{ m}^3$ , o que não difere dos lares brasileiros, conforme pode ser visto no item 3.5, junto ao levantamento de alguns dados para residências de alto padrão. A Figura 2.12 mostra o tempo de reverberação ótimo para fala e música bem abaixo de 1 s para salas pequenas.

A empresa THX<sup>®</sup> (2003), conforme é comentado no Capítulo 3, é uma empresa especializada em especificações de equipamentos eletroacústicos para *home theaters* ou *home cinema* que realizou diversos desenvolvimentos em parceria com a Dolby<sup>®</sup> Laboratories (2003). Após profundas pesquisas em salas para sistemas de áudio e vídeo, obteve-se uma relação do tempo de reverberação em função do volume da sala, conforme pode ser observado na Figura 2.13. Nota-se que para salas pequenas, do tipo residencial, o tempo de reverberação acústico recomendado está abaixo de 0,4 segundo.

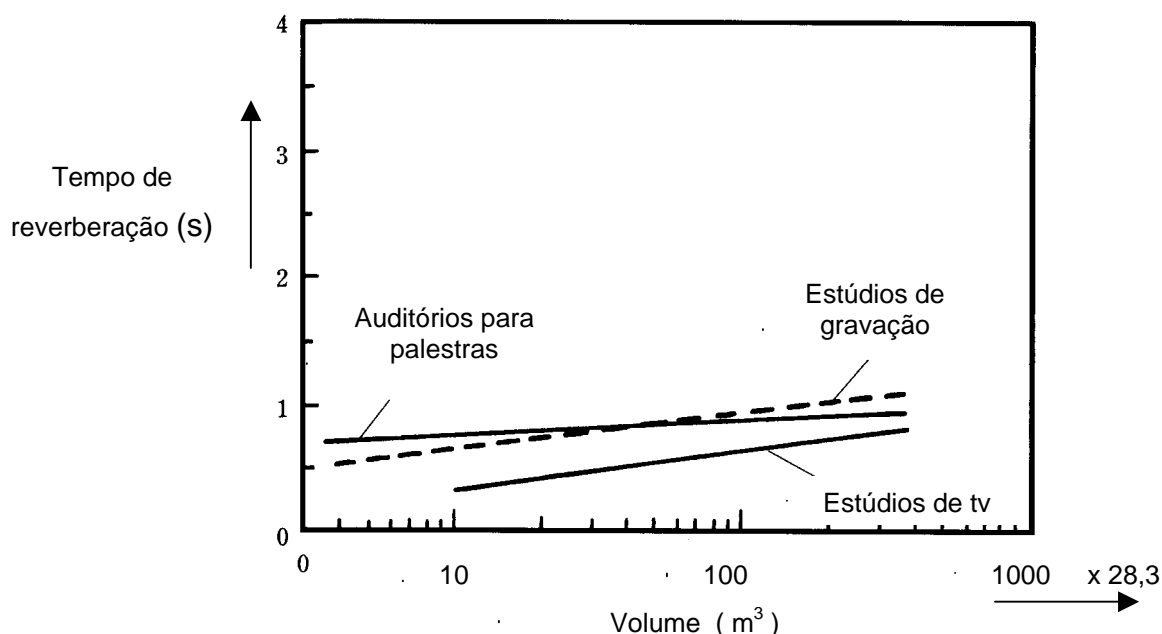


Figura 2.12: Relação entre tempo de reverberação e volume de salas. Fonte: Adaptado de Everest (2001, p. 153).

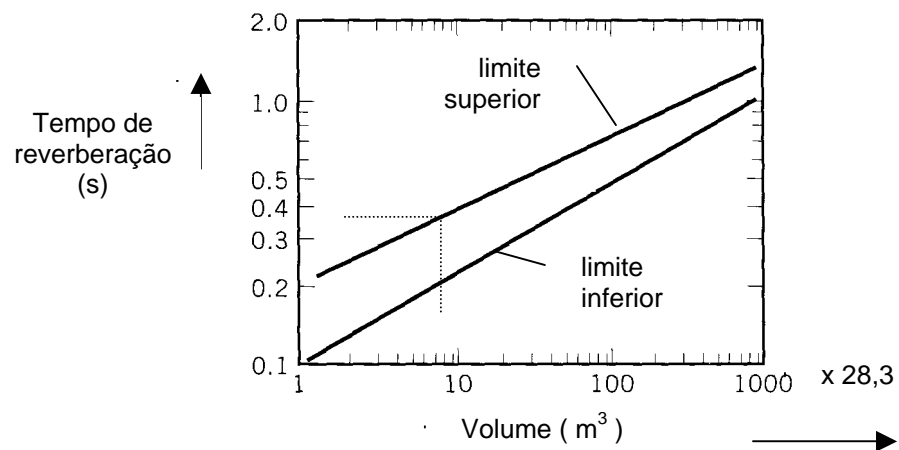


Figura 2.13: Tempo de reverberação em função do volume da sala, recomendada pela THX<sup>®</sup>, divisão da Lucasfilm Ltd. Fonte: Adaptado de Cavanaugh e Wilkes (1999, p. 175).

## 3 SISTEMAS DE ÁUDIO E VÍDEO

### 3.1 Introdução

Um sistema de áudio e vídeo de uso doméstico, também conhecido por ter sua origem no exterior como *home theater* ou *home cinema*, é o conjunto de equipamentos que reproduz imagem, som e efeitos sonoros do ambiente de uma cena gravada, como um filme ou um show musical. A empresa *Dolby® Laboratories* (2003) define um *home theater* ou *home cinema* como sendo um sistema de reprodução de áudio e vídeo doméstico que se aproxima da experiência de ver e ouvir um filme no cinema. A montagem de um *home theater* pode ser desde um compacto sistema de som com efeitos de ambiente, conhecidos como *surround*, acoplado a um aparelho de TV em uma sala de estar familiar, até um complexo e sofisticado sistema eletroacústico, com áudio potente, caixas acústicas embutidas e tela grande de projeção de imagem, tudo em uma sala especial, semelhante a uma pequena sala de cinema.

Um sistema de áudio e vídeo mais sofisticado é formado por um reprodutor de discos a laser, conhecido como *DVD*, onde se tem o programa gravado e codificado, podendo ter também como uma outra fonte de sinais, um receptor digital para receber sinais via satélite, um amplificador multicanal, em média seis ou sete canais, um processador de sinais e caixas acústicas. Como opção ainda, há o vídeo cassete digital e o rádio AM/FM. No que diz respeito à imagem, normalmente as opções são os monitores, podendo ser televisores de tela grande esféricos ou planos, plasma ou projetores para projeção de imagens em telas apropriadas. A relação de componentes desse sistema pode ser visto no item 3.2.

Tais sistemas de áudio podem ser integrados ou separados. Nos primeiros, freqüentemente chamados de *home theater in a box*, de menor custo têm-se o *DVD/CD*, o processador de sinais, o rádio e os amplificadores em um só equipamento formando com as caixas acústicas, um único empacotamento. Os segundos, chamados de modulares, são formados por um sintonizador de rádio AM/FM, várias unidades de amplificação, ou uma unidade única chamada de *Receiver*, *DVD/CD*, *Super Audio CD (SACD®)*, *DVD Audio* e caixas acústicas tipo satélites e *subwoofer*, *bookshelf* ou de piso. Todos os elementos desse sistema são

separados podendo ser adquiridos gradualmente e de fabricantes/marcas diferentes. Tais equipamentos normalmente oferecem muitos recursos sofisticados de ajustes e conexões sendo, portanto, recomendados para usuários mais experientes e/ou exigentes. Essa composição é de custo bem mais elevado.

Neste estudo, o foco é a acústica de salas que utilizam um sistema de áudio com seis fontes sonoras com sinais processados no formato *Dolby® Digital* ou *dts®*. A Figura 3.1 mostra o conjunto de equipamentos de áudio e vídeo normalmente utilizado em uma residência.

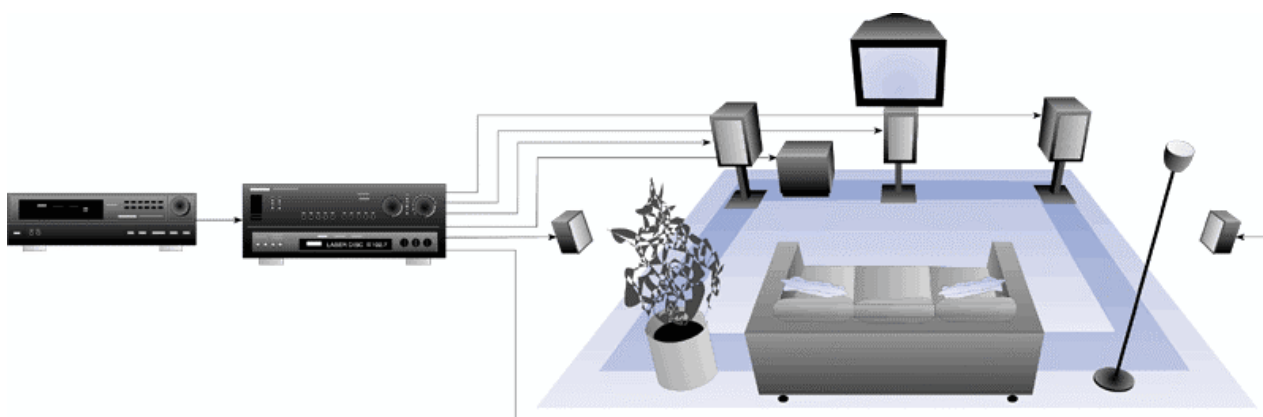


Figura 3.1: Conjunto de equipamentos de áudio e vídeo. Caixas frontais e *subwoofer* ao lado e a caixa central abaixo da TV, caixas traseiras (*surround*) próximo ao sofá, todas conectadas a um *receiver* e um *DVD*. Fonte: *Dolby Laboratories* (2003).

No item 3.3 serão comentados os formatos de processamento de sinais. No formato denominado de *5.1* têm-se seis canais, isto é, um de baixas frequências, convencionalmente de “.1”, geralmente com uma unidade de amplificação externa, e mais cinco canais sendo três frontais (esquerdo, central, direito) e dois traseiros (esquerdo e direito). O sistema *6.1* é semelhante, acrescido apenas de um canal central traseiro, que pode ser dividido em duas caixas acústicas que alguns especialistas denominam de *7.1*, como pode ser visto na Figura 3.2.

## 3.2 Equipamentos do Sistema Eletroacústico

Os equipamentos que normalmente compõe um sistema de áudio e vídeo, denominado de *home theater* ou *home cinema*, são:

1. Reprodutor de discos a laser, *DVD/CD, SACD<sup>®</sup>, DVD Áudio*;
2. Receptor de TV digital via satélite, *DSS – Digital Satellite Systems*;
3. Processador de sinais, para decodificação do sistema *Dolby Digital e/ou DTS*;
4. Sintonizador de rádio AM/FM, *Tuner* ;
5. Pré-amplificador, como central de comando de volume, entradas de áudio e vídeo;
6. Amplificador de potência, para amplificação de sinais para as caixas acústicas;
7. Caixas acústicas, frontais, traseiros e unidade de baixas frequências (*subwoofer*);
8. Monitor de vídeo, podendo ser uma TV tela grande, *HDTV* (alta definição), plasma ou projetor, para reprodução de imagem;

Os aparelhos indicados na relação acima de 3, 4, 5 e 6 normalmente são reunidos em um único módulo chamado de *receiver*, considerado o coração do *home theater*. Há casos também, mais simples, onde se tem o reprodutor de discos *DVD* já incorporado ao *receiver*. Em algumas montagens são utilizados o *Digital VHS Vídeo Cassete* com uma boa qualidade de imagem e som. O uso do *video cassette* estéreo convencional para essa finalidade é raro, devido à baixa qualidade de imagem.

### 3.2.1 Caixas acústicas

As caixas acústicas podem ser classificadas basicamente em duas categorias. Uma denominada de *large speakers*, são as caixas de piso (*tower ou floorstanding speakers*), que normalmente já possuem a unidade de baixa frequência incorporada. Outra, denominada de *small speakers*, são as de mesa (*bookshelf*) e as do tipo satélite (*satellite*), que necessitam de uma unidade de baixas frequências complementar, um *subwoofer*.

Os *receivers* e módulos de processamento de sinais disponibilizam um comando para o controle de graves em função do tipo de caixas acústicas utilizadas, característica chamada de *bass management*, permitindo desviar os graves para o *subwoofer*, para compensar a limitação da resposta em baixas frequências das caixas pequenas, como as *bookshelf* e satélites, além de protegê-las dos danos que o excesso de energia nessa faixa de frequência poderia causar aos falantes.

Chiarella e Polk (2001), recomendam que todas as caixas acústicas utilizadas para som frontal, central e traseiro, tenham o mesmo timbre e equilíbrio sonoro, fazendo com que o som acompanhe o movimento das cenas, dando uma melhor sensação da realidade do ambiente gravado no filme. Essa característica é denominada de *timbre matching*.

Além disso, todas as caixas acústicas devem ter uma boa dinâmica para transientes e boa faixa de frequência de atuação, principalmente as frontais, pois são as que normalmente respondem os sons principais que ocorrem na tela e ao redor, seja na reprodução de filmes ou músicas.

A caixa acústica central, embora tenha como função principal a reprodução das vozes dos atores, é responsável, também, pelos efeitos sonoros dos filmes que ocorrem nas cenas frontais. Como as demais, elas devem suportar os picos de amplitude dos sinais sem distorção e manter a naturalidade do som definindo bem, por exemplo, a voz masculina e a feminina. Em conjuntos mais sofisticados, as caixas acústicas nessa função são mais reforçadas e respondem a faixa toda de áudio, ou seja, incluindo, também, as baixas frequências.

Com a função de reproduzir no ambiente os efeitos sonoros das cenas dos filmes, as caixas acústicas traseiras, também conhecidas como *surround*, podem ser de dois tipos: as que espalham o som utilizando as reflexões das paredes laterais, normalmente posicionadas ao lado dos ouvintes, e as direcionais, posicionadas usualmente atrás, projetando o som diretamente para a área de audição. As primeiras são conhecidas como bi-direcionais (bipolo ou dipolo), onde o som é reproduzido em duas faces opostas de uma mesma caixa acústica, e as segundas, como direcionais ou monopolo convencionais. Geralmente estas últimas são as mais utilizadas no sistema *Dolby Digital 5.1*, pois os sinais gerados são independentes e bem definidos, com uma faixa de frequência tão ampla quanto à dos canais frontais. Isto significa que os canais traseiros podem atuar, também, como fontes principais e que portanto, o som direto (direcional) torna-se mais conveniente.



No item 3.4 será apresentado o posicionamento dessas caixas acústicas já em função dos sistemas mostrados no item 3.3.

### 3.3 Conceitos de processamento de sinais

Um detalhe relevante no áudio aplicado a salas de cinema está não somente na qualidade sonora, mas também nos efeitos dos sons secundários ao redor do ouvinte, ou seja, o som envolvente que, inicialmente, era simplesmente simulado, mas que, com a evolução da tecnologia, passou a reproduzir efeitos sonoros mais reais. Esse é o som do ambiente das cenas, conhecido como o som *surround*, que vem evoluindo há muito tempo, desde os tempos do som estéreo até os atuais, estado-da-arte dos formatos multicanais discretos digitais.

A empresa *Dolby® Laboratories* fundada em 1965 (DOLBY, 2003) desenvolve sistemas de processamento de sinais e fabrica equipamentos profissionais para implementar essas tecnologias em filmes, transmissão de TV e indústrias de gravação musical. A *Dolby* também licencia essas tecnologias para uso na indústria eletrônica de consumo, tendo sua sede em São Francisco, nos Estados Unidos da America, e várias unidades estabelecidas em outros países da Europa e Ásia. Os sistemas mais comuns para *home theater* são descritos nos itens 3.3.1 a 3.3.6.

#### 3.3.1 *Dolby Pro Logic®*

Para acomodar as fontes de informações *surround*, os sons traseiros, em dois canais, a *Dolby Laboratories* desenvolveu o *Pro Logic*, conhecido, também, como *Dolby Pro Logic surround*, que mistura o canal central e os traseiros em uma trilha estéreo analógica, denominado pelos especialistas de *piggy-backed*. O *Dolby Pro Logic surround* é encontrado em quase todos os filmes produzidos há 20 anos atrás, mas tem duas limitações. Primeiro, o canal traseiro é mono, ou seja, mesmo usando duas ou vinte caixas acústicas elas reproduzirão exatamente o mesmo sinal. Além disso, o sinal tem uma faixa de frequência limitada, ou seja, sem altas frequências (agudos) e baixas (graves profundos). Segundo, é que existe pouca separação entre os canais adjacentes, o que compromete significativamente o efeito *surround*. Para

assistir a vídeo cassete, emissoras de TV com transmissão de sinais analógicos ou TV a cabo, o *Pro Logic* é suficiente. Mas para se ter o melhor em *DVD*'s e transmissão digital via satélite, comum em alguns países, é necessário ter o som *surround digital*.

### 3.3.2 *Dolby Pro Logic II* ®

Esse sistema é uma versão melhorada do *Dolby Pro Logic*, que teve aumentada a faixa em frequência de reprodução e a separação dos canais traseiros. É aplicado em reprodução de filmes e música. O efeito sonoro se aproxima ao *Dolby Digital*.

### 3.3.3 *Dolby Digital*®

Um dos formatos em *surround digital*, o *Dolby Digital 5.1*, conhecido também como *AC-3*, é caracterizado por cinco canais de banda larga em frequência, definidos como canal frontal esquerdo, direito, central, traseiro esquerdo e direito e um sexto canal para os efeitos de baixas frequências, os graves, denominado de *Low Frequency Effects (LFE)* reproduzidos pela caixa acústica *subwoofer (Sub)*. É uma faixa reservada para os efeitos de impacto de baixa frequência que enriquecem as cenas dos filmes, como por exemplo, as explosões, choques mecânicos de grandes objetos, movimentos de grandes animais ou veículos. As vantagens do *surround 5.1 digital* são o realismo e o impacto de som que oferece ao ambiente de reprodução. A diferença em qualidade sonora entre o *Dolby Digital surround* e o *Pro-Logic surround* é similar à diferença que existe entre o *CD* e as fitas cassetes sendo, portanto, o *Dolby Digital* muito melhor.

Os equipamentos com sistemas de decodificação *surround digital*, como o *Dolby Digital*, exige fontes digitais como o *DVD* ou a última geração dos sistemas de transmissão digital, o *DSS, Digital Satellite Systems*. Atualmente a maioria dos discos *DVD* já contém a gravação em canais 5.1.

### 3.3.4 Conceito da *DTS*®

A empresa *DTS Entertainment* (2002), fundada em 1990, elaborou um conceito semelhante ao da *Dolby*. O *DTS*, uma abreviação de *Digital Theater Systems* é também um sistema digital 5.1, concorrente do *Dolby Digital*. Para reproduzir os discos nesse sistema é preciso que o *DVD* esteja gravado no formato *DTS* e tenha um equipamento reproduzidor com o processador *DTS surround*. No início, alguns títulos de filmes *DVD* eram criados ou com o sistema *Dolby Digital* ou com *DTS*. Já há alguns anos, os discos vêm com os dois sistemas gravados, permitindo ao usuário escolher o formato ao reproduzir o disco.

### 3.3.5 *Surround EX & ES*

No processamento de sinais do *surround Dolby Digital* e *DTS*, pode existir mais um canal traseiro. São os chamados *Surround EX* da *Dolby Digital* e o *Surround ES* da *DTS*. Esses sistemas adicionam um canal traseiro com uma caixa acústica como pode ser visto na Figura 3.2 (A), ou duas, sendo uma para o lado esquerdo e outra para o lado direito, como na Figura 3.2 (B), (CHIARELLA e POLK, 2001). Para usar o *surround EX* ou *ES* é necessário um circuito processador *surround* apropriado e o disco gravado com tais informações. Caso não exista o processador, esses discos podem ser reproduzidos normalmente como um *DVD* comum.

A adequada montagem em 6.1 ou 7.1 pode oferecer ao ouvinte um impressionante campo sonoro contínuo em toda a sua volta (360 graus). Por outro lado, se a montagem de um *surround EX* não for bem feita pode apresentar efeitos piores que o padrão 5.1.

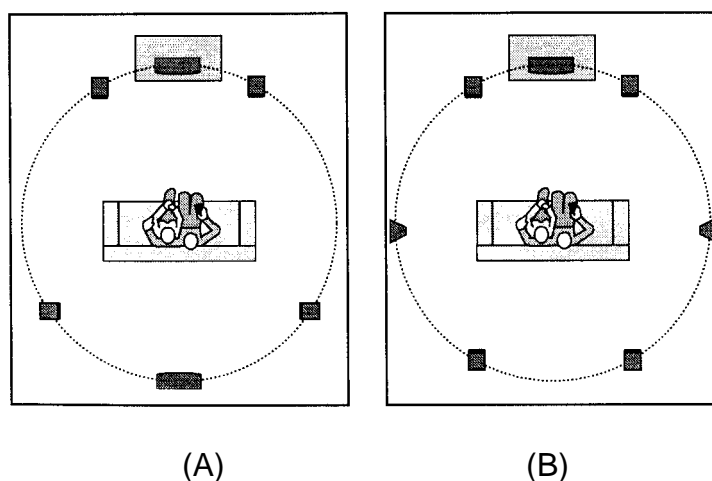


Figura 3.2: (A) Configuração em 6.1; (B) Configuração em 7.1. Fonte: Chiarella e Polk (2001).

### 3.3.6 Conceito da THX<sup>®</sup>

*THX* não é um formato (THX, 2003), mas um conjunto de especificações para os equipamentos eletroacústicos, compatível com todos os formatos de *surround*, cujo objetivo é padronizar o desempenho de qualquer sistema *home theater* (CHIARELLA e POLK, 2001). Foi desenvolvido pela empresa *Lucasfilm Ltd*, fundada em 1983, hoje conhecida como *THX Ltd Co*. Não compete com os formatos *Dolby Digital*, *Pro Logic*, *DTS* ou qualquer outro. Os filmes (*software*) certificados pela *THX* podem ser reproduzidos em qualquer sistema *surround* e, inversamente, o equipamento *THX* (*hardware*) pode reproduzir todos os filmes mesmo sem a especificação *THX*.

Os componentes do chamado *Home THX*, ou seja, filmes e/ou equipamentos, tais como amplificadores, *receivers* e caixas acústicas, certificados pela *THX* não necessariamente significam que sejam melhores ou piores do que outros produtos, apenas recebem a aprovação de serem componentes em conformidade com as recomendações *THX*.

A *THX* especifica, por exemplo, caixas acústicas chamadas de bipolares e dipolares que emitem sons em duas faces opostas, comum no uso função *surround*. Um estudo do comportamento desses tipos de caixas acústicas em uma sala de audição, foi realizado por Kates (2002). A simulação mostrou que a resposta de um dipolo é mais sensível em posicionamento e ângulo de orientação na sala do que o monopolo. Esse estudo foi comentado por Salava (2003), que afirmou que caixas

acústicas monopolo convencionais são, em geral, muito mais convenientes que as caixas dipolos em pequenas salas.

Embora a *THX* garanta um certo padrão de desempenho, muitos dos melhores produtos não são certificados pela *THX*. Os fabricantes não são obrigados a certificar os seus produtos com a *THX* se não desejarem seguir as especificações. As empresas de produtos de áudio, freqüentemente optam por renunciar ao sistema porque: a) acreditam que atualmente as especificações da *THX* comprometem o desempenho, como por exemplo, o padrão de dispersão nas caixas acústicas que pode afetar negativamente a qualidade sonora pois se torna muito dependente da acústica da sala, ou b) não concordam em elevar o custo do produto e repassar para os clientes os *royalties* pagos a *THX Ltd.* (CHIARELLA e POLK, 2001).

O chamado *THX Timbre Matching* (HARLEY, 2000) é uma das especificações que define a uniformidade da qualidade sonora. O som que acompanha o movimento de uma cena de um filme deve ser uniforme em todos os pontos da sala, exigindo um padrão de qualidade das caixas acústicas, principalmente quanto ao timbre.

A vantagem de se optar pelo sistema certificado pela *THX* é a garantia de se ter o mínimo de qualidade em produtos de menor custo.

### **3.4 Posicionamento das caixas acústicas na sala**

As baixas freqüências poderão ser otimizadas com o auxílio de dois ou mais subwoofers devidamente posicionados na sala, como será apresentado no item 3.4.1.

As caixas acústicas frontais, central e traseiras para reprodução das médias e altas freqüências podem ser posicionadas em pontos específicos da sala conforme as recomendações do *International Telecommunications Union*, como será mostrado no item 3.4.2.

#### **3.4.1 Baixa freqüência**

Sabe-se que os painéis ressonantes atuam bem nas baixas freqüências e que os ressonadores de Helmholtz são eficazes em estreita banda de freqüência, podendo

ser usados em salas com sistema de áudio e vídeo para melhoria das baixas frequências. Porém, novas técnicas estão sendo desenvolvidas com o auxílio da eletroacústica, não exatamente para a absorção sonora, mas para minimizar os problemas dos modos de ressonância na sala.

Um método interessante para reduzir a variação da resposta em frequência ponto-a-ponto de audição foi apresentado por Welti e Devantier (2003) que permite equalizar o sistema em grande área usando um processamento de sinal simples.

Para a maioria das salas, os modos axiais dominam o desempenho das baixas frequências, no entanto, o primeiro modo tangencial pode ser relevante para salas com paredes excepcionalmente rígidas. A experiência mostra que os demais modos tangenciais e oblíquos, raramente são significantes.

Na Figura 3.3 estão representados os primeiros quatro modos axiais em uma sala simples, em determinado instante no tempo. A pressão sonora máxima sempre ocorre nas paredes da sala, no caso ilustrado nas duas extremidades da figura. Os modos de segunda e quarta ordem têm a máxima no centro, enquanto o primeiro e o terceiro passam por um mínimo nesse ponto, chamado nó.

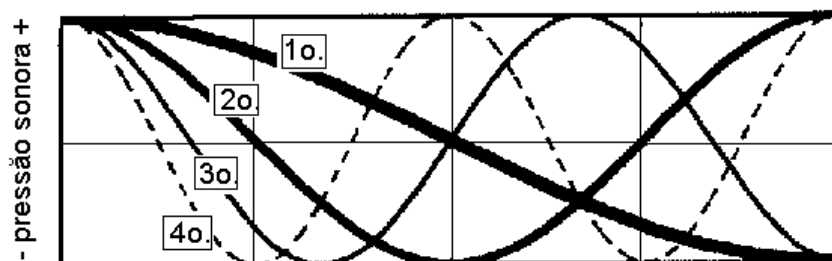


Figura 3.3: Representação dos quatro primeiros modos axiais. Fonte: Adaptado de Welti e Devantier (2003).

Se não existir amortecimento, a pressão sonora nos nós cai a zero mas, na maioria dos casos reais, a queda está na faixa de  $-20$  dB.

Existem duas formas convencionais de reduzir as ondas estacionárias em uma sala de audição. Um é posicionar o subwoofer nos nós das ondas estacionárias e o outro é usar outros *subwoofers* em um arranjo tal que cancele os modos.

Localizando cuidadosamente a caixa acústica e o ouvinte dentro de uma sala, pode-se conseguir uma boa resposta em freqüência para aquele ponto de audição específico.

A Figura 3.4 mostra a caixa acústica posicionada no nó do modo da terceira ordem e o ouvinte, identificado por um círculo (R), distante dos máximos e dos nós dos modos. Nesse caso obtém-se uma resposta relativamente boa. As posições indicadas pelas letras A e B, levemente deslocados, já não são tão favoráveis.

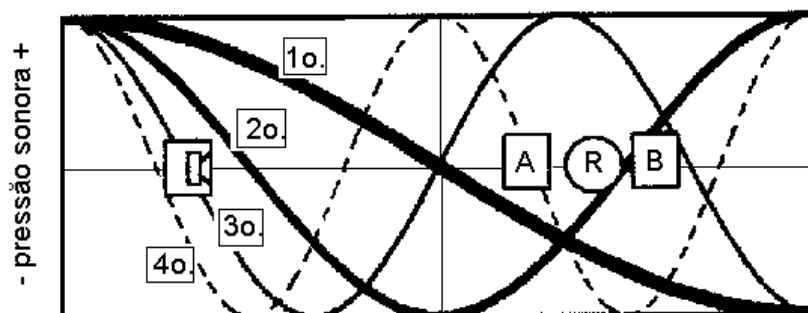


Figura 3.4: Posicionamento da caixa acústica e do ouvinte. O círculo (R) representa uma posição conveniente por estar distante dos máximos e nós. As posições (A) e (B) são mais desfavoráveis. Fonte: Adaptado de Welti e Devantier (2003).

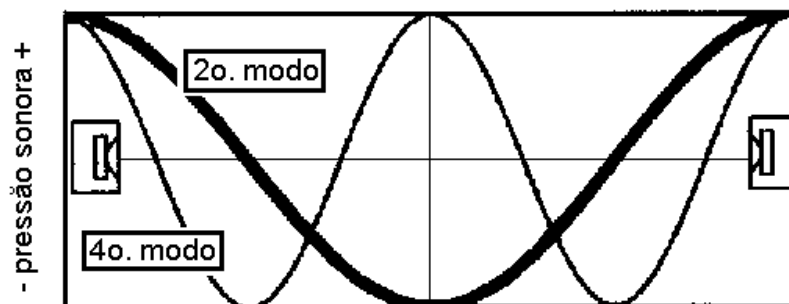


Figura 3.5: Dois subwoofers posicionados em lados opostos. Os modos ímpares são cancelados e os modos pares, por estarem em fase, não são cancelados. Fonte: Adaptado de Welti e Devantier (2003).

O uso de dois subwoofers na sala, pode reduzir as ondas estacionárias pela chamada interferência destrutiva. O conceito é mostrado nas Figuras 3.5 e 3.6. Na primeira, as caixas acústicas são posicionadas nas extremidades opostas, de tal forma que o 1º e 3º modo são eliminados. Cada subwoofer excita uma série de ondas estacionárias e, como os modos de ordem ímpar estão 180º fora de fase, um

cancela o outro. Infelizmente os modos pares estão em fase e não ocorre o cancelamento.

Na Figura 3.6 é usado um 3º subwoofer posicionado no centro das ondas estacionárias. Essa fonte sonora está no nó dos modos de ordem ímpar, resultado do 2º subwoofer, conforme mostra a Figura 3.5 e, portanto, não contribui com esses modos. Nessa configuração o modo axial de 2ª ordem é também cancelado, desde que o 3º subwoofer atue +6 dB acima dos outros dois, pois é o ponto onde o modo de 2ª. ordem está com a pressão negativa.

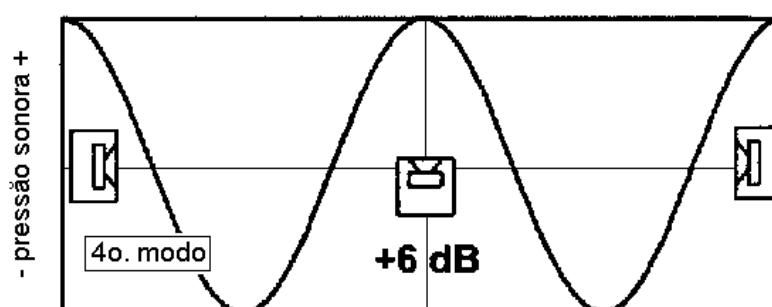


Figura 3.6: Posicionamento do 3º subwoofer ao centro com +6 dB acima dos outros dois subwoofers. Essa configuração resulta no cancelamento dos 3 primeiros modos. Fonte: Adaptado de Welti e Devantier (2003).

Welti (2002) fez uma análise experimental de uma sala de audição retangular e definiu três configurações de subwoofers com a menor variação na resposta em frequência entre diferentes posições de ouvinte. A altura da sala foi desconsiderada uma vez que a variação nessa dimensão é pequena.

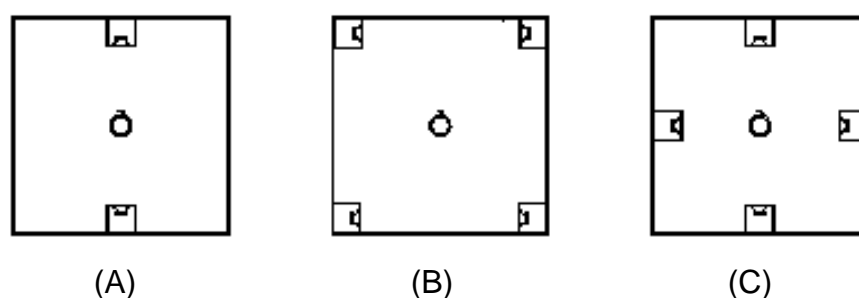


Figura 3.7: Arranjo de subwoofers em uma sala. Fonte: Adaptado de Welti e Devantier (2003).



A Figura 3.7 mostra três posicionamentos de subwoofers em uma sala. Em (A) têm-se duas caixas acústicas posicionadas no meio das paredes opostas. Os modos de 1ª e 3ª ordem ao longo da largura da sala são reduzidos porque os subwoofers estão suprindo os nós. Os modos de 1ª e 3ª ordem ao longo do comprimento da sala são reduzidos pela interferência destrutiva. Finalmente, o 1º modo tangencial é reduzido porque as caixas acústicas estão sobre os nós. Nessa configuração os modos axiais de ordem par não são reduzidos, nem na largura nem no comprimento. Na Figura 3.7 (B) têm-se 4 caixas acústicas posicionadas nos cantos da sala. Os modos de 1ª e 3ª ordem ao longo do comprimento e da largura da sala são reduzidos pela interferência destrutiva como o 1º modo tangencial. Os modos axiais de ordem par não são reduzidos com essa configuração. Na Figura 3.7 (C) são mostrados subwoofers posicionados no meio das quatro paredes. Para os modos de 1ª e 3ª ordem na largura da sala, as caixas acústicas na parte superior e inferior da figura estão nos nós e não excitam os modos e as caixas acústicas à esquerda e à direita interferem destrutivamente uma com a outra. Da mesma forma, os modos de 1ª e 3ª ordem no comprimento da sala são reduzidos, já que as caixas acústicas à esquerda e à direita estão nos nós e as da parte superior e inferior interferem destrutivamente nessa dimensão. O primeiro modo tangencial não é excitado já que todas as caixas acústicas estão dentro dos nós. Finalmente, os modos axiais de 2ª ordem são cancelados pela interferência destrutiva, como pode ser visto na Figura 3.6.

As configurações da Figura 3.7 foram determinadas para reduzir as diferenças nas respostas em frequências nas diferentes posições do ouvinte.

O termo *variação espacial* foi dado por Welti e Devantier (2003) e usado para quantificar a variação nas respostas em frequências de um ponto do ouvinte ao outro. É definido como:

$$\text{variação espacial} = \frac{\sum_{f=20}^{80} \text{var}_s [R(s, f)]}{(80 - 20)} \quad (2.36)$$

onde  $\text{var}_s [R(s, f)]$  é a variação em amplitude dada em dB, da resposta em frequência em todos os pontos do ouvinte ( $s$ ), calculado em uma frequência qualquer ( $f$ ). A faixa de interesse no caso é de 20 Hz a 80 Hz.

A Figura 3.7 mostra um exemplo de uma sala de 6,1 m x 7,3 m x 2,7 m. Os resultados das medições são mostrados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1: Variação espacial conforme o posicionamento dos subwoofers.

Subwoofer à frente Canto esquerdo (referência)	Dois subwoofers no meio das paredes (Figura 5.A)	Quatro subwoofers nos cantos (Figura 5.B)	Quatro subwoofers no meio das paredes (Figura 5.C)
4.09 dB	1.27 dB	1.35 dB	0.94 dB

Observa-se que a configuração de quatro subwoofers posicionados no meio de cada parede, como na Figura 3.7 (C), apresentou a menor variação (0.94 dB) quando comparada à posição normalmente praticada em sistemas *home theaters* usando um subwoofer frontal no canto (4.09 dB). É importante observar que a medição foi feita em uma condição ainda não otimizada.

Essas configurações funcionam bem em salas retangulares simples, que são acusticamente simétricas. No entanto, a maioria das salas de audição é irregular, com várias aberturas para áreas adjacentes, como para outras salas, hall, terraços. A determinação teórica dos modos, nesse tipo de sala, se torna mais complexo.

Tentar otimizar o desempenho dos *subwoofers* em pequenas salas tem sido documentado há muito tempo (ALLISON,1974), onde os efeitos das superfícies foram investigados. O principal impulso destes esforços iniciais (BALLAGH,1983) foi a otimização da resposta em potência do subwoofer pelo posicionamento próximo a superfícies refletoras. O conceito teórico de otimizar vários subwoofers para várias posições de ouvintes em salas reais é comentado por Welti e Devantier (2003). A otimização é baseada na manipulação de cada subwoofer, das posições, amplitude, atraso de sinal e uso de filtro simples, ou na combinação de todos esses parâmetros de ajustes. Tal método foi denominado de *Low Frequency Optimization* ou *LFOpt*. Por esta razão, subwoofers de alta qualidade comercializados já dispõem de amplificação própria, chave para alteração de fase em 180°, ajuste de frequência do filtro passa baixa e ajuste de amplitude.

Welti e Devantier (2003) investigaram cinco casos reais de *home theater*, entre eles, um caso onde a posição do subwoofer era apenas um compromisso entre desempenho de baixas frequências e estética do ambiente. Em cada análise, a *variação espacial* foi significativamente melhorada usando o método *LFOpt*.

O conceitual teórico apresentado aqui foi aplicado experimentalmente na sala de teste, inclusive com a verificação da forma de onda resultante, cujos resultados são apresentados no item 4.3.

### 3.4.2 Média e Alta frequência

A *ITU International Telecommunication Union* (1994), fez recomendações sobre o posicionamento das caixas acústicas em salas de audição para sistemas de áudio multicanais e vídeo (DOLBY, 2003), apresentadas no documento *ITU-R Rec.BS.775-1* (1994). A Figura 3.8 mostra a configuração de um sistema 5.1 e na figura 3.9 mostra a configuração 6.1, porém com duas caixas traseiras que são chamadas de 7.1.

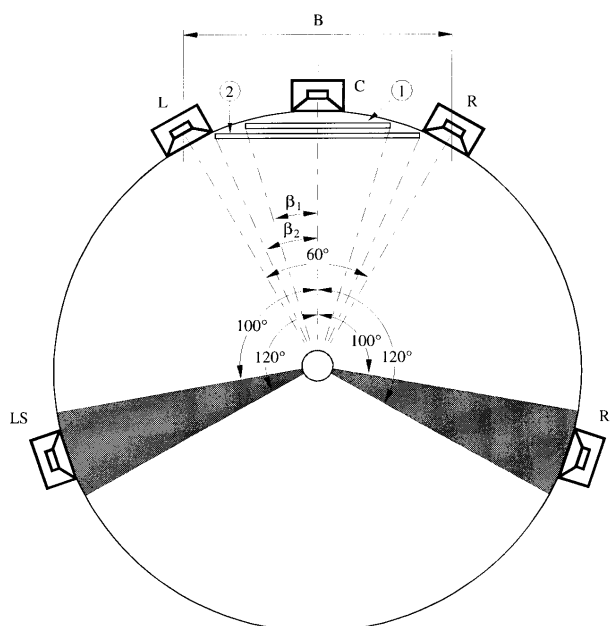


Figura 3.8: Posicionamento das caixas acústicas frontais esquerda (L), direita (R), central (C), traseiras esquerda (LS) e direita (RS). Fonte: ITU-R (1994)

No Quadro 3.2 é detalhado o posicionamento das caixas acústicas conforme ITU-R (1994). As referências de distâncias e as nomenclaturas de acordo com o apresentado na Figura 3.8, são:

- 1 - Tela de projeção *HDTV* (TV de alta definição) =  $3 H$  ( $2 \beta_1 = 33^\circ$ )

2 - Tela de projeção = 2 H ( $2 \beta_2 = 48^\circ$ )

H - Altura da Tela; B - Distância entre as caixas acústicas;

L - Caixa frontal esquerda; C - Caixa frontal central

R - Caixa frontal direita; LS - Caixa traseira esquerda

RS - Caixa traseira direita

Quadro 3.2: Posicionamento das caixas acústicas, conforme a Figura 3.8.

Caixas acústicas	Ângulo horizontal em relação ao centro (graus)	Altura (m)	Inclinação (graus)
C	0	1.2	0
L, R	30	1.2	0
LS, RS	100...120	$\geq 1.2$	0...15 p/ baixo

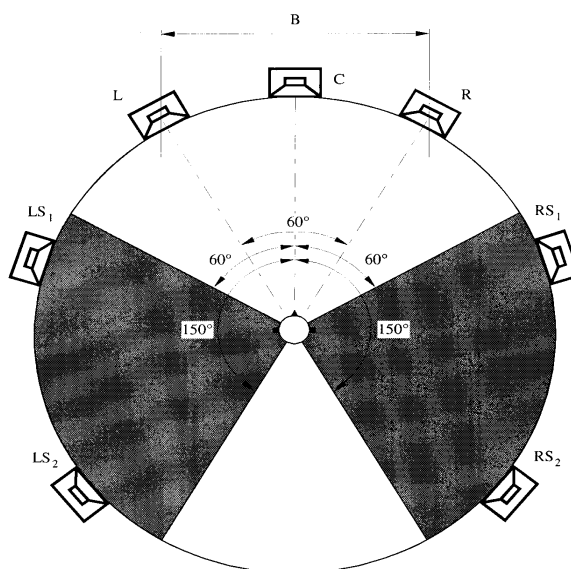


Figura 3.9: Posicionamento de mais um par de caixas acústicas *surround* (LS<sub>2</sub> e RS<sub>2</sub>), incluído na configuração apresentada na Figura 3.8. Fonte: ITU-R (1994).

Estudos realizados por Zielinski, Rumsey e Bech (2003), mostraram a importância da resposta em frequência da fonte sonora, em cada canal de um sistema 5.1, no que diz respeito a sensação da qualidade de som, na posição ótima do ouvinte. A limitação das altas e baixas frequências nos principais canais frontais causa sensível deterioração no som. A perda de qualidade no canal central e nos

canais traseiros, na maioria dos programas, exceto em filmes, é menor. As limitações, principalmente em altas frequências, para a sensação do efeito *surround* no ambiente é, de certa forma, prejudicial. Em produtos *home theaters* de baixo custo, essas restrições de faixa de resposta geralmente são aceitas.

As recomendações aqui apresentadas foram aplicadas na sala de teste, cujos resultados são apresentados no item 4.3.

### 3.5 Tipologia das salas para sistemas de áudio e vídeo.

Durante um período de oito meses, em 2003, foram analisados do jornal *O Estado de São Paulo*, os anúncios comerciais sobre empreendimentos imobiliários que davam destaque aos espaços reservados para a montagem de sistemas de áudio e vídeo. O objetivo do levantamento foi dar uma idéia das dimensões, formatos das salas residenciais e comprovar que uma sala *home theater* já é uma realidade no mercado imobiliário brasileiro.

Os resultados da pesquisa são apresentados nas Figuras 3.10 a 3.16, que mostram alguns dos empreendimentos de alto padrão, com fachadas ilustrativas, áreas e formatos das salas sugeridos para o uso de um conjunto áudio e vídeo. São apresentadas duas salas, uma menor que é a anunciada para o sistema *home theater* e outra maior, conhecida como *Living*, que pode ser transformada para o mesmo uso das menores. As citações como “4 suítes + Home Theater + Lareira + 5 vagas garagem” são exemplos de como os apartamentos são anunciados comercialmente, destacando os atrativos da construção. As indicações dos sistemas 5.1 e 6.1 ou 7.1 em cada figura foram dadas pelo autor com base apenas no ambiente disponível para mais ou menos fontes sonoras e para, também, dar uma noção do sistema que eventualmente poderia ser montado.

Os espaços mostrados são da arquitetura original, ou seja, oferecidos na planta inicial pela construtora, porém sem qualquer tratamento acústico. Durante a fase de construção, tais espaços normalmente sofrem modificações para atender o interesse do usuário quanto ao conforto visual e acústico do ambiente.

As Figuras 3.11, 3.12, 3.14, 3.15 e 3.16 mostram as salas em forma de “L”, uma característica que permite variar o posicionamento e a área efetiva de audição,

oferecendo várias opções para montagem do *home theater*. O pé-direito dessas salas é de 2,8 m.

No quadro 3.3 são apresentados os volumes das salas por cada residência e as sugestões quanto ao tipo de sistema de áudio e vídeo em função das dimensões.

Quadro 3.3: Volumes das salas propostos nos empreendimentos.

Apartamento (referências)	Volume proposto para 5.1 (m <sup>3</sup> )	Volume opção para 7.1 (m <sup>3</sup> )
Monteleone	45	98
Maggiorie	71	215
Porto Cervo	38	85
Imperatore	77	190
Savoia	80	140
Piemont	48	92
Nobile	65	126



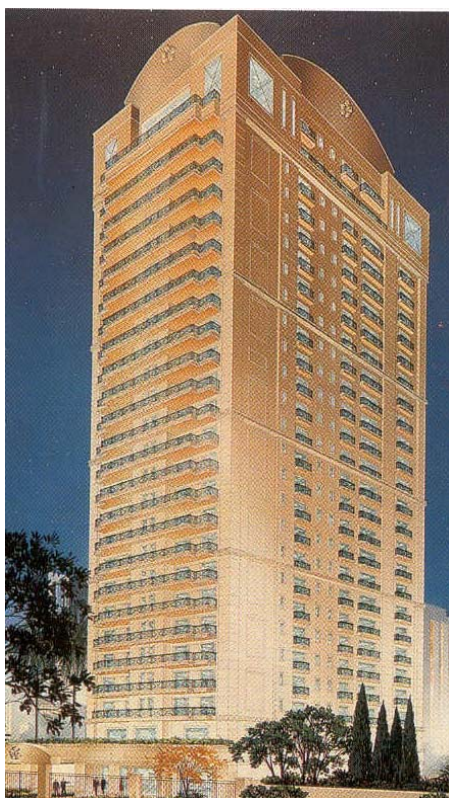
Palazzo Monteleone

Rua Leopoldo Couto Magalhães, 1274  
Itaim - SP

4 suítes + Home Theater  
Lareira, 5 vagas garagem

<p>5,0 m x 7,0 m 98 m<sup>3</sup></p> <p>opção 6.1 ou 7.1</p>	<p>5,0 x 3,2 45 m<sup>3</sup></p> <p>5.1</p>
---	--

Figura 3.10: Empreendimento com salas de 45 m<sup>3</sup> e 98 m<sup>3</sup>.



Palazzo Maggiore  
 Rua Salvador Cardoso, 122  
 Itaim – SP  
 5 suítes + Home Theater + lareira  
 6 vagas na garagem + visitantes

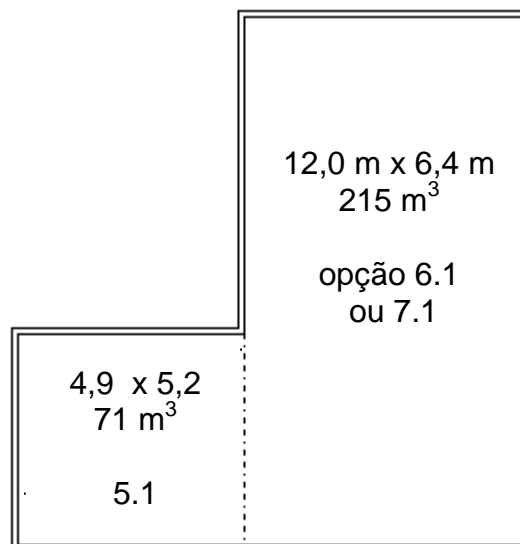


Figura 3.11: Empreendimento com salas de 71 m<sup>3</sup> e 215 m<sup>3</sup>.



Porto Cervo  
 Rua Leopoldo Couto, 1344  
 Itaim – SP  
 4 suítes + Home Theater

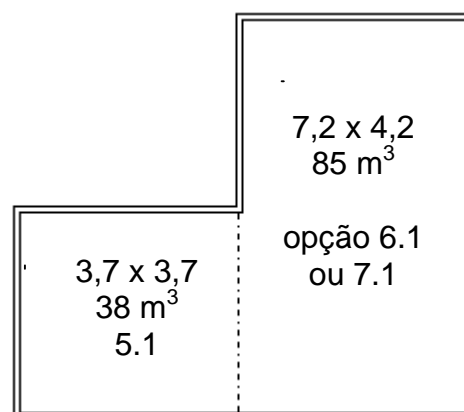


Figura 3.12: Empreendimento com salas de 38 m<sup>3</sup> e 85 m<sup>3</sup>.



Del'Imperatore  
 Rua Frederico Chopin, 243  
 Jardim Europa – SP  
 5 suítes + Home Theater

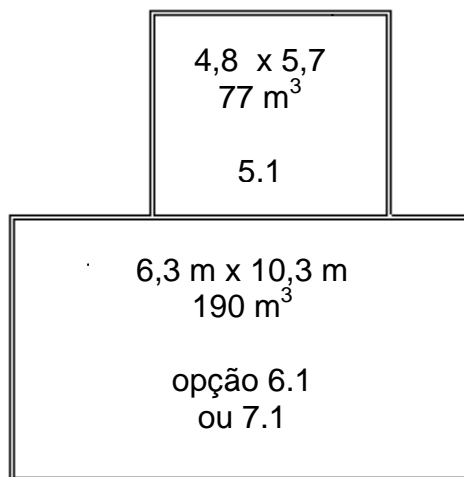


Figura 3.13: Empreendimento com salas de 77 m<sup>3</sup> e 190 m<sup>3</sup>.



Di Ferrara e Di Savoia  
 Rua Mario Ferraz com Jacuruci  
 Itaim – SP  
 4 suítes + Home Theater

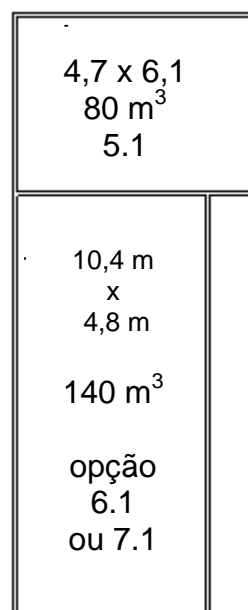


Figura 3.14: Empreendimento com salas de 80 m<sup>3</sup> e 140 m<sup>3</sup>.





Piedmont  
 Rua Jacurici, 215  
 Itaim – SP  
 4 suítes + 4 salas

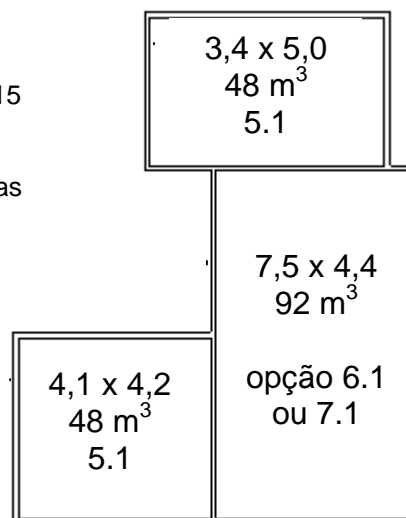


Figura 3.15: Empreendimento com salas de 48 m<sup>3</sup> e 92 m<sup>3</sup>.



Nobile  
 Rua Brig. Haroldo Veloso com a Rua Tabapuã -  
 Itaim – SP  
 4 suítes + Home Theater

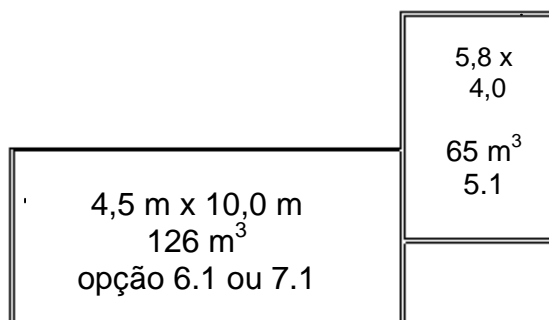


Figura 3.16: Empreendimento com salas de 65 m<sup>3</sup> e 126 m<sup>3</sup>.

## 4 MEDIÇÃO ACÚSTICA DA SALA

### 4.1 Introdução

Os sinais cuja função de auto correlação equivalem a uma distribuição de *Dirac* passaram a ter grande importância em processamento de sinais a partir do rápido desenvolvimento dos processadores digitais. Uma maneira de gerar tais sinais é produzir uma seqüência de impulsos e uma possibilidade simples é repetir o impulso diversas vezes com igual amplitude e trocas de sinais numa ordenação matemática definida pela teoria dos números. Essas seqüências de pulsos são denominadas *seqüências de comprimento máximo MLS*, constituindo um sinal pseudo-randômico. Uma das grandes vantagens do sinal MLS é a sua natureza determinística, que garante excepcional repetitividade. Este método de *seqüências de comprimento máximo MLS* foi utilizado na medição da sala. Detalhes da sala poderão ser vistos no item 4.2.

Os equipamentos utilizados nas medições dos parâmetros da qualidade da sala foram: microcomputador tipo *notebook* da marca *Hewlett Packard* modelo *Pavilion*, com processador *AMD K6* de 550 MHz; programa de computador para análise dos parâmetros acústicos, o *Aurora* versão 3.2, ISO 3382; microfone capacitivo de ¼" da *Bruel & Kjaer*, modelo 4134; pré-amplificador de microfone da *Bruel & Kjaer*, *Dual Microphone Supply*, modelo 2669; fonte para o pré/microfone da *Bruel & Kjaer*, modelo 5935; uma caixa acústica de piso, faixa larga de resposta, *Polkaudio* modelo LS-70 e um receiver *Sherwood R-725* como potência de áudio para a caixa acústica.

No item 4.3 serão apresentados os resultados das medições de uma sala preparada com sistema 5.1.

### 4.2 Descrição da sala

Para a investigação dos parâmetros de qualidade acústica de sala, foi escolhida uma sala de 88 m<sup>3</sup>, com 4,7 m de largura, 7,5 m de comprimento e 2,50 m de altura, em um prédio localizado à rua Fernandes Coelho, 64, 4º andar, bairro de Pinheiros, em São Paulo, SP. Foi preparada para o sistema *Dolby Digital* de 5.1 com cinco

posições de audição, utilizando um *Receiver Sherwood* modelo *R-756* dedicado para decodificação e amplificação de sinais para as caixas acústicas tipo *bookshelf Mirage* modelo *FRx1* (frontais e traseiras) e *FRxC* (central), uma TV 29" *Gradiente* modelo *TF 2960 Flat Full Conection Digital Ready*, um reproduzidor de discos *DVD Gradiente* modelo *D560*, um *subwoofer* amplificado *Polkaudio* model *PSW140 Powered Subwoofer* no piso do lado direito do *rack*, posteriormente usado, também, um segundo *subwoofer JBL* model *DS-10 Digitally Amplified 10" Subwoofer*, atrás dos pontos de audição.

Essa sala foi construída tendo parte das paredes em alvenaria e parte em painéis duplos de fibras de madeira com lã de vidro interno, teto de gesso, piso revestido de carpete de tecido, portas de madeira e janela de vidro. Todas as superfícies das paredes foram revestidas com cortina dupla, uma de tecido de algodão para acabamento e outra conhecida como *blackout*, formando uma camada ondulada de quinze centímetros aproximadamente, para absorção sonora. Os assentos eram de tecido, acolchoados.

Para as medições, realizadas no dia 26 de Novembro de 2003, foi usada uma fonte sonora tipo *floorstanding Polkaudio* modelo *LS-70* na posição da caixa acústica frontal esquerda. O método usado foi de *Seqüências de Comprimento Máximo, MLS*. O microfone foi posicionado na entrada do canal auditivo do ouvinte sentado ao centro do círculo formado pelas caixas acústicas tipo *bookshelf*. As medições foram feitas com a sala vazia e com o sistema de refrigeração e exaustão de ar funcionando.

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostram as fotos obtidas em 14/Nov/2003 da sala, com os equipamentos do sistema eletroacústico e o posicionamento dos mesmos.



Figura 4.1: Vista frontal da sala. À esquerda a caixa acústica frontal esquerda; ao centro, abaixo da TV, a caixa central; ao lado, no piso, o subwoofer e à direita a caixa acústica frontal.

As Figuras 4.2 e 4.3 mostram o fundo da sala com as caixas acústicas traseiras.



Figura 4.2: Caixa *surround* direita.



Figura 4.3: Caixa *surround* esquerda.

Na Figura 4.4 pode ser vista a planta da sala e o posicionamento das caixas acústicas. Pode-se notar que as fontes sonoras estão nos pontos de uma circunferência.

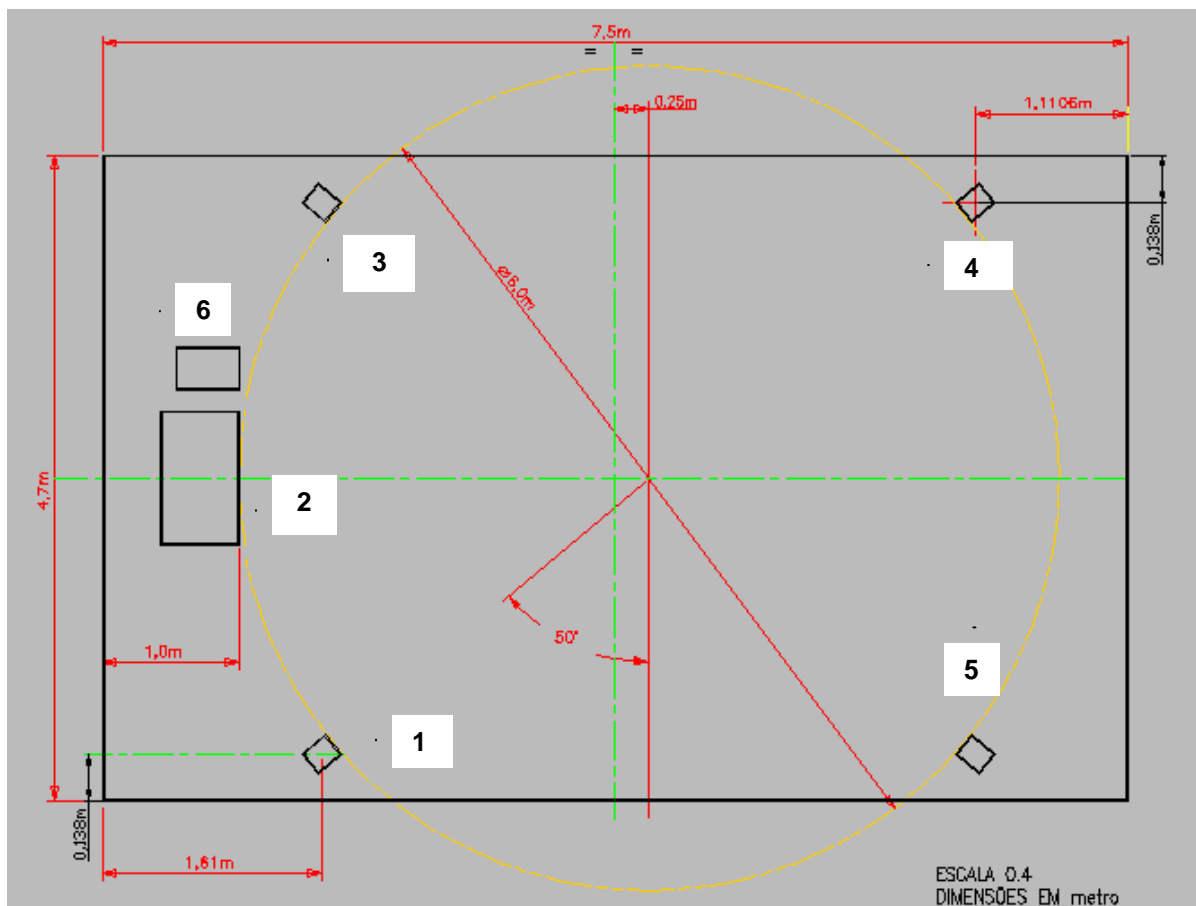


Figura 4.4: Planta da sala analisada. Estão indicadas as dimensões da sala e as posições das fontes sonoras: frontal esquerda (1), central (2), frontal direita (3), traseira direita surround (4), traseira esquerda surround (5) e Subwoofer (6).

### 4.3 Resultados experimentais

As Figuras 4.5 a 4.8 mostram os resultados obtidos nas medições da sala. Os valores numéricos poderão ser vistos no Apêndice A. Esses valores foram comparados com os indicados na literatura, conforme apresentados no Capítulo 2, item 2.3.

A Figura 4.5 mostra o valor de 0,24 s para *EDT* como pode ser observada na coluna *Lin*. Está bem abaixo de 1s, o que representa uma sala bem amortecida, conforme sugere *THX* e *BBC* para salas pequenas.

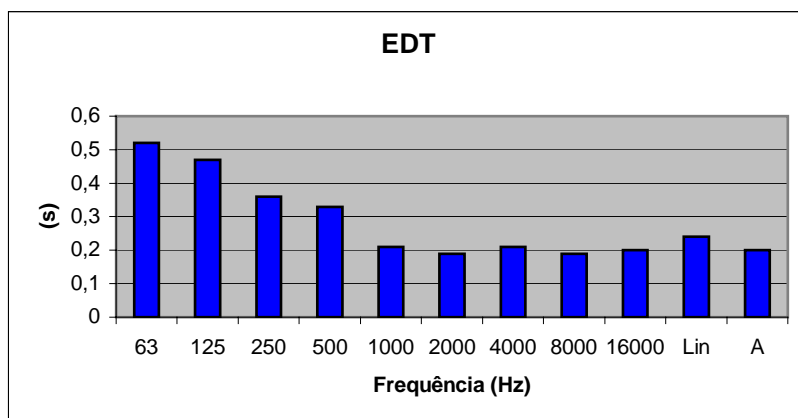


Figura 4.5: Valores do tempo de decaimento inicial  $EDT$  x Frequência

A Figura 4.6 mostra o valor de 14,01 dB para  $C_{50}$ , ou seja, bem acima de 3 dB como recomendado na literatura. Significa um nível de clareza adequada para fala, portanto, uma boa inteligibilidade para a audição de diálogos de filmes reproduzida pela caixa acústica central. Observam-se níveis de clareza entre as frequências de 500 Hz a 4000 Hz maiores que as baixas frequências, uma característica interessante para a faixa de voz.

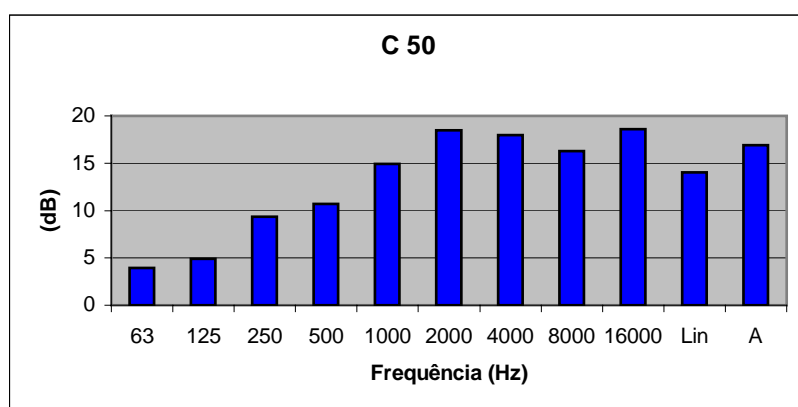


Figura 4.6: Valores de  $C_{50}$  x Frequência.

A Figura 4.7 mostra o valor de 19,14 para  $C_{80}$ , ou seja, bem acima de 0 dB, conforme recomendado na literatura. Significa um nível de clareza boa para música, portanto, adequada para audição de música, seja em filmes ou shows musicais, reproduzida principalmente pela caixa acústica frontal esquerda, frontal direita e subwoofer.

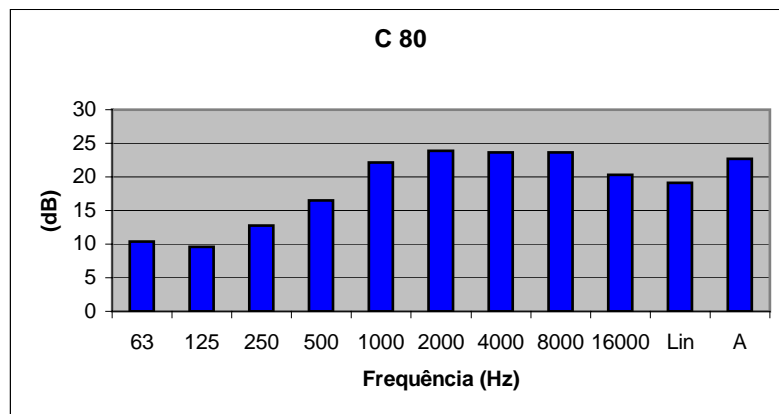


Figura 4.7: Valores de C<sub>80</sub> x Frequência.

A Figura 4.8 mostra o valor de 96,18% para D<sub>50</sub>, representa uma boa definição para a faixa média, como coral de vozes, por estar muito próximo de 100% o que significa quase não haver reflexões, isto é, componentes com atraso acima de 50 ms, que prejudicariam a inteligibilidade sonora.

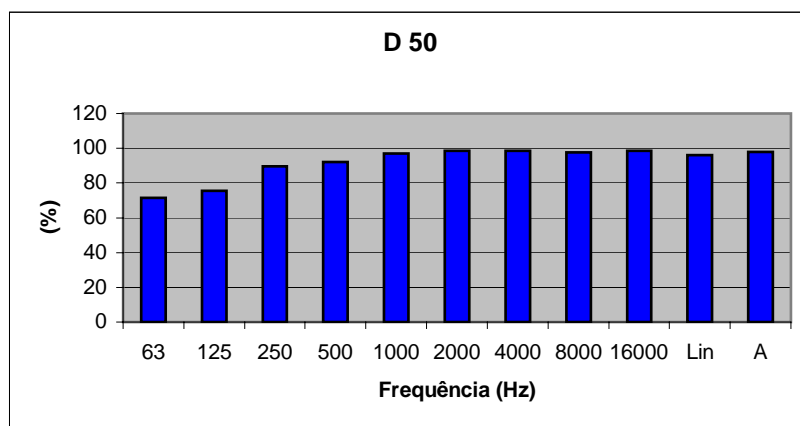


Figura 4.8: Valores de D<sub>50</sub> x Frequência.

A Razão de Graves foi obtida através da Equação (2.70) com os valores de EDT da Figura 4.5, isto é, EDT<sub>125</sub>= 0,47 s, EDT<sub>250</sub>= 0,36 s, EDT<sub>500</sub>= 0,33 s, EDT<sub>1000</sub>= 0,21 s. Calculando, obteve-se:

$$BR = \frac{0,47 + 0,36}{0,33 + 0,21} = 1,54$$

O valor de  $BR = 1,54$ , uma Razão de Graves acima de 1,0, significa que a sala oferece uma boa sensação de graves, ou seja, a presença de baixas frequências é maior que a da faixa média. Está de acordo com o recomendado na literatura.

A Razão de Agudos foi obtida através da Equação (2.71) com os valores de EDT da Figura 4.5, isto é,  $EDT_{2000} = 0,19$  s,  $EDT_{4000} = 0,21$  s,  $EDT_{500} = 0,33$  s,  $EDT_{1000} = 0,21$  s. Calculando, obteve-se:

$$TR = \frac{0,19 + 0,21}{0,33 + 0,21} = 0,74$$

O valor de  $TR = 0,74$  está abaixo do recomendado na literatura que sugere acima de 1,0. Portanto a Razão de Agudos está insatisfatória o que significa que a sala não está boa na relação entre os agudos e os médios, isto é, a sensação da presença das altas frequências deveria ser maior que a de médias frequências. O estudo de Robinson e Dadson (1971) mostra a sensibilidade do ouvido humano em determinadas faixas de frequências (REYNOLDS, 1981, p. 454) que esclarece os efeitos do  $BR$  e  $TR$ .

Além do  $TR$ , ainda algumas deficiências acústicas foram encontradas, como a existência de ecos palpitantes entre o teto e o piso percebido quando emitido um pulso como o bater da palma da mão, e variações audíveis nos níveis de baixas frequências em alguns pontos da sala quando gerada uma frequência fixa abaixo de 80 Hz. Assim, algumas modificações foram realizadas na sala.

Para a redução dos ecos palpitantes, o teto de gesso foi revestido em 90% da área com espuma poliéster de densidade 26,6 a 27,0 kg/m<sup>3</sup>, corrugada e espessura  $30 \pm 3$  mm. Mantido o carpete de tecido no piso e as cortinas de alta densidade em todas as paredes. Para a melhoria da Razão de agudos, foram usados difusores acústicos tipo *Schroeder*, modelo *quadratic-residue difusors*, especialmente desenvolvidos para esse caso. E para minimizar as variações na resposta de baixas frequências em alguns pontos da sala, buscando a qualidade sonora principalmente na área de audição ao centro da sala, foi utilizado um segundo *subwoofer* ativo atrás dos ouvintes, posicionado a 2,8 m da parede lateral esquerda e distante 1,7 m da parede dos fundos. Ajustado em defasagem ( $180^\circ$ ) com o primeiro subwoofer, com ganho elétrico de 13,6 dB. Ambos com filtro passa-baixa ajustado em 50 Hz. Nessa condição, os níveis de tensão fornecidos pelo microfone em cada posição do



ouvinte, verificado com um sinal fixo de 50 Hz podem ser observados no Quadro 4.1. As posições 1, 2, 3, 4 e 5 dos ouvintes estão identificadas nas Figuras 4.9 e 4.23.

Quadro 4.1: Níveis de tensão fornecidos pelo microfone, medidos em cada posição do ouvinte.

Posição	1	2	3	4	5	variação
Nível (mV)	280	278	210	237	230	± 35

Cada nível de tensão, representa o nível de pressão sonora captado pelo microfone em cada posição do ouvinte. Pelo sinal elétrico pode-se, também, observar a forma da onda resultante, através de um osciloscópio. O objetivo era minimizar as variações de graves na área de audição, portanto os valores relativos foram considerados suficientes e mais interessantes do que os valores absolutos. A variação de tensão encontrada foi mínima com o mínimo de deformação na onda resultante das interferências dos modos da sala geradas pelos dois *subwoofers*. Esta comparação poderia ser feita também por *nível de pressão sonora* (dB) em cada ponto, conforme é citado por Welti e Devantier (2003).

Para esta análise foram utilizados os seguintes equipamentos: gerador de sinais (oscilador de senos) marca *Kenwood*, modelo *AG-204*, n.série 7060091, como fonte de sinais de baixas frequências; frequencímetro digital, marca *Takeda RiKen*, modelo *TR 5823*, n.série 20570303, conectado a saída do gerador, para verificação da frequência aplicada simultaneamente nos *subwoofers*; *Audio Spectrometer* da marca *Bruel & Kjaer*, modelo *2113*, n. série 64100B, para medição de nível de pressão sonora, nível de tensão para o voltímetro e saída de sinal para o osciloscópio; osciloscópio da marca *Tektronix*, *Two Channel Digital Real Time*, modelo *TDS220 de 100 MHz*, n. série B071311, para visualização da forma de onda; microfone capacitivo de ¼" da *Bruel & Kjaer*, *type 4133*, n. série 1690450, e pré-amplificador de microfone *type 2619* n.série 1621399, no extensor 692533 / UA 0196, para captação do sinal resultante no ponto de medição, na altura do ouvinte, a 1,1 m do piso; voltímetro digital da marca *Iwatsu*, *model 7413*, n. série 52373673, para medições das tensões fornecidas pelo microfone. O diagrama de conexão pode ser visto na Figura 4.9 e as fotos dos equipamentos na sala, na Figura 4.10.

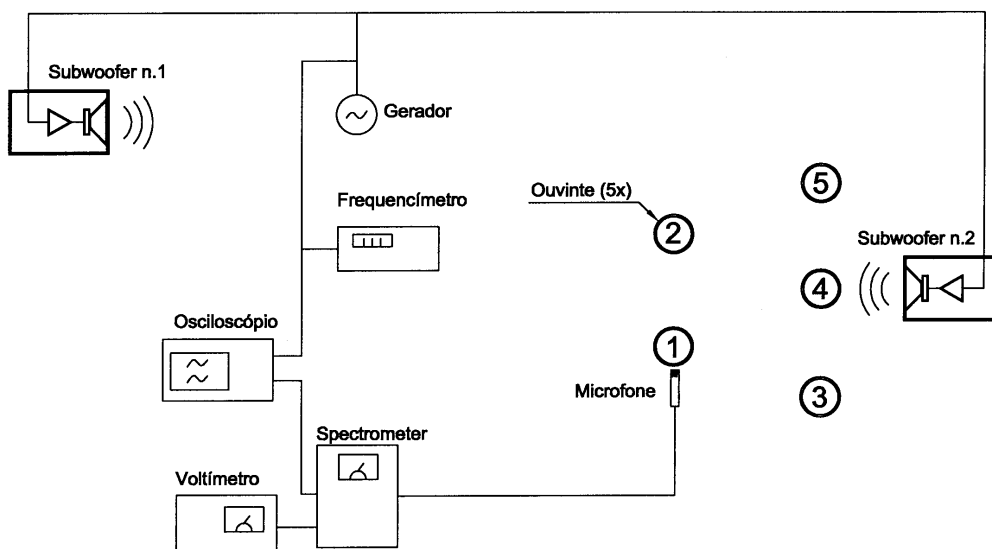


Figura 4.9: Diagrama de conexão dos equipamentos para medição e observação dos sinais de baixas frequências em alguns pontos da sala.



(A)



(B)

Figura 4.10: Equipamentos para medição. A) Destaque ao *spectrometer da Bruel & Kjaer* e o osciloscópio. B) Microfone posicionado em um ponto de audição a 1,1 m do piso.

A Figura 4.11 mostra a foto do segundo subwoofer posicionado atrás da área do ouvinte atuando em conjunto com o primeiro subwoofer e na Figura 4.12, a foto do painel difusor posicionado ao lado da área dos ouvintes.



Figura 4.11: Posição do 2º subwoofer



Figura 4.12: Difusor acústico na lateral

As Figuras 4.13 a 4.17, obtidas de um osciloscópio digital de duplo canal, mostram as formas de onda dos sinais sonoros em alguns pontos da sala. A curva na parte superior da figura é a do sinal resultante captado pelo microfone (acústico) e na parte inferior a do gerador (elétrico) apresentada somente como referência. Para efeito deste estudo, considerando que o subwoofer em *home theater* normalmente atua na faixa de 20Hz a 80Hz, o sinal elétrico aplicado foi de 50 Hz.

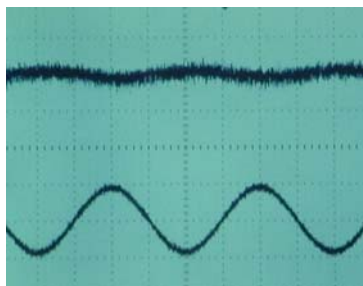


Figura 4.13: A curva na parte de cima da figura mostra um ponto da sala de nível sonoro pouco audível (nó). A curva na parte inferior é do sinal elétrico de referência.

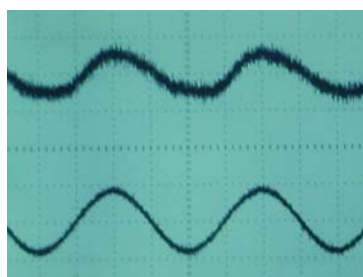


Figura 4.14: Utilizando um segundo subwoofer, o nó é suprido. Observa-se um nível mais elevado, mas com deformações na forma da onda.

A Figura 4.13 mostra o sinal gerado somente pelo subwoofer n.1 obtido com o microfone na posição de 1,6 m da parede do fundo, 4 m da parede lateral esquerda e 1,1 m do piso. É um ponto que pode ser considerado nó.

Na Figura 4.14, mantida a mesma posição anterior do microfone, observa-se um nível bem audível onde o ponto de nó é praticamente eliminado, porém há deformação na onda. É o resultado da interferência provocada pelo subwoofer n.2, posicionado a 1,9 m da parede do fundo e 2,3 m da parede lateral esquerda, defasado eletricamente 180° em relação ao subwoofer n.1.

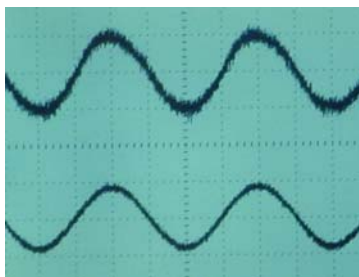


Figura 4.15: A curva na parte de cima mostra a forma de onda melhorada comparada com a Figura 4.14. Resultado obtido apenas com a mudança na posição do segundo subwoofer n.2.

Na Figura 4.15, mantida as condições como as utilizadas na Figura 4.14, exceto a posição do subwoofer n.2 que foi alterada para 1,7 m da parede do fundo e 2,8 m da parede lateral, obteve-se uma melhora na forma de onda. Porém nos pontos de audição, principalmente nas posições 3, 4 e 5, houve deformações nos sinais. Um destes casos pode ser visto na Figura 4.16, obtida na posição n.5.

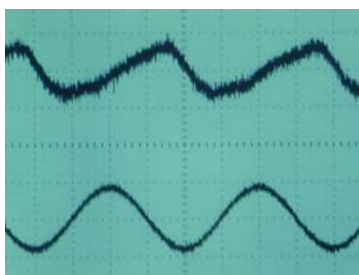


Figura 4.16: Sinal deformado na posição de audição n.5, quando o subwoofer n.2 foi reposicionado.

A Figura 4.16 mostra a deformação do sinal acústico, na posição de audição n.5, causada pelo reposicionamento do subwoofer para a correção do sinal conforme mostrado na Figura 4.14, ou seja, medido no ponto 1,6 m da parede do fundo, 4 m da parede lateral esquerda e 1,1 m do piso. Um ponto considerado nó. Para melhorar a forma de onda observada na Figura 4.16, foi feito um ajuste no ganho do amplificador do subwoofer n.2, obtendo-se a forma como mostrada na Figura 4.17, considerada boa se comparada com o sinal original gerado. Nestas condições de ajustes, os demais pontos de audição e onde inicialmente existia o nó foram novamente verificados, constatando o mesmo resultado como observado na Figura 4.17.

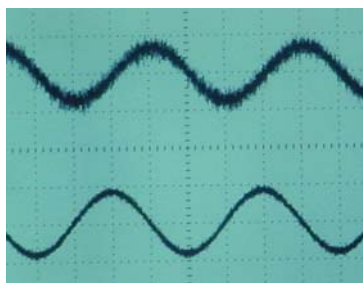


Figura 4.17: O ajuste no ganho do subwoofer n.2 permitiu uma melhora na forma de onda observada na posição de audição n.5.

Após a introdução dos painéis difusores e do revestimento no teto da sala, uma segunda medição foi realizada. Os valores numéricos poderão ser vistos no Apêndice B. Os dados obtidos são mostrados nas Figuras 4.18 a 4.21.

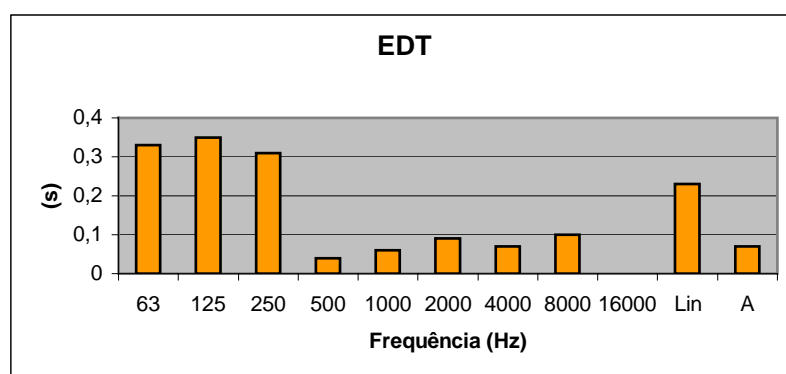


Figura 4.18: Valores do tempo de decaimento inicial EDT x Frequência, obtidos na segunda medição.

A Figura 4.18 mostra o valor de 0,23 s para EDT. Continua bem abaixo de 1s, o que representa uma sala bem amortecida, conforme sugere *THX* e *BBC* para salas pequenas. Nota-se uma atenuação na faixa média causada pelo amortecimento no teto.

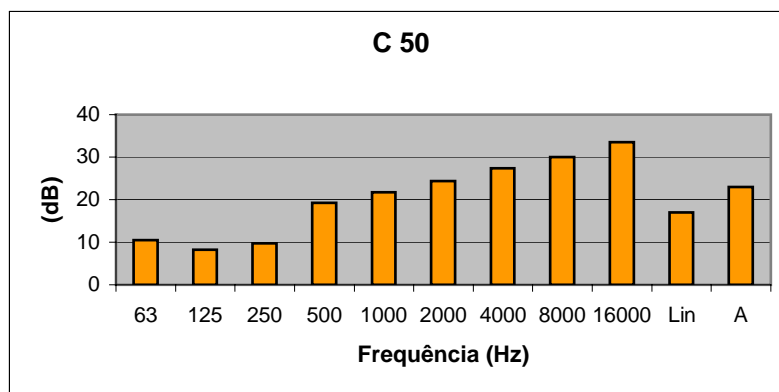


Figura 4.19: Valores de  $C_{50}$  x Frequência, obtidos da segunda medição.

A Figura 4.19 mostra o valor de 16,98 dB para  $C_{50}$ , portanto bem acima de 3 dB como recomendado pela literatura. Continua uma clareza adequada para fala, portanto, com uma boa inteligibilidade para a audição de diálogos de filmes reproduzida pela caixa acústica central. Observa-se níveis entre as frequências de 500 Hz a 4000 Hz maiores que as baixas frequências, uma característica interessante para a voz e pelo uso do painel difusor, nota-se um crescimento uniforme nos níveis da faixa média alta, melhorando a qualidade das vozes mais agudas.

A Figura 4.20, mostra o valor de 28,54 para  $C_{80}$ , ou seja, bem acima de 0 dB. Comparada com a Figura 4.7, continua uma clareza adequada para audição de música e alguns efeitos de ambiente, seja em filmes ou shows musicais, reproduzida principalmente pelas caixas acústicas frontal esquerda, frontal direita e subwoofer.

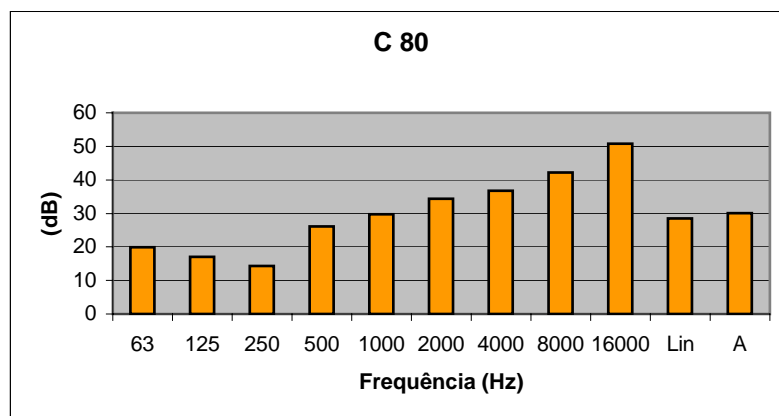


Figura 4.20: Valores de C<sub>80</sub> x Freqüência, obtidos da segunda medição

A Figura 4.21 mostra o valor de 98,03 % para D<sub>50</sub>. Representa uma boa definição para a faixa média como coral de vozes, por estar muito próximo de 100% o que significa quase não haver reflexões, isto é, componentes com atraso acima de 50 ms, que prejudicariam a inteligibilidade sonora.

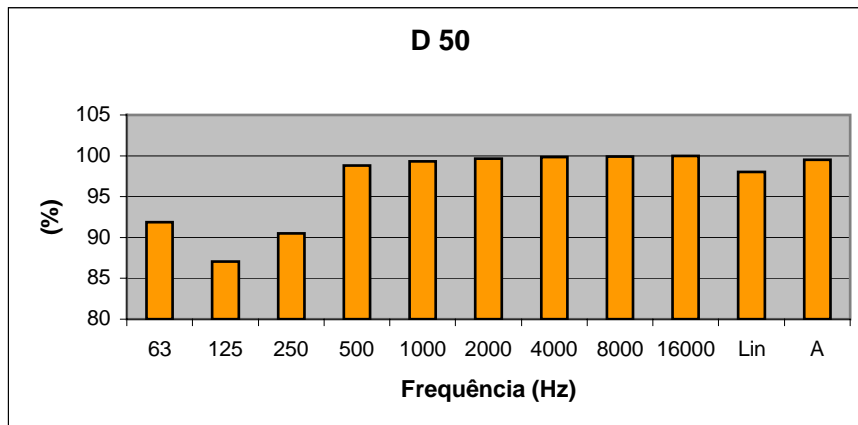


Figura 4.21: Valores de D<sub>50</sub> x Freqüência, obtidos da segunda medição.

A Razão de Graves foi obtida através da Equação (2.70) com os valores de EDT da Figura 4.18, isto é, EDT<sub>125</sub>= 0,35 s, EDT<sub>250</sub>= 0,31 s, EDT<sub>500</sub>= 0,04 s, EDT<sub>1000</sub>= 0,06 s. Calculando, tem-se:

$$BR = \frac{0,35 + 0,31}{0,04 + 0,06} = 6,6$$

O valor de  $BR = 6,6$ , uma Razão de Graves acima de 1,0, significa que a sala oferece uma boa sensação de graves, ou seja, a presença de baixas frequências é maior que a da faixa média. Está de acordo com o recomendado na literatura.

A Razão de Agudos foi obtida através da Equação (2.71) com os valores de EDT da Figura 4.18, isto é,  $EDT_{2000} = 0,09$  s,  $EDT_{4000} = 0,07$  s,  $EDT_{500} = 0,04$  s,  $EDT_{1000} = 0,06$  s. Calculando, tem-se:

$$TR = \frac{0,09 + 0,07}{0,04 + 0,06} = 1,6$$

O valor de  $TR = 1,6$  está agora de acordo com o recomendado na literatura que sugere acima de 1,0. Portanto a Razão de Agudos está satisfatória o que significa que a sala está com uma boa relação entre os agudos e os médios, isto é, a sensação da presença das altas frequências é maior que a de médias frequências, causada pelos painéis difusores posicionados nas laterais da área do ouvinte. O estudo de Robinson e Dadson (1971) mostra a sensibilidade do ouvido humano em determinadas faixas de frequências (REYNOLDS, 1981, p. 454), não só para as altas como para as baixas em relação à faixa média de frequências.

O uso de material absorvente acústico no teto reduziu o eco palpitante, mas aumentou o amortecimento na sala na faixa média de frequências, como pode ser observado na Figura 4.18 quando comparada com a Figura 4.5.

O uso dos difusores acústicos posicionados nas laterais dos ouvintes compensou o excesso de amortecimento, permitindo o espalhamento da faixa média e alta frequência, melhorando a razão de agudos, causando um crescimento uniforme nos níveis de claridade em função do aumento da frequência, como pode ser notado nas Figuras 4.19 e 4.20. Estes difusores desenvolvidos são do tipo *Schroeder*, o modelo chamado de *quadratic-residue difusors*. O objetivo do uso deste painel difusor foi para melhorar dentro da área útil dos ouvintes, a difusão sonora na faixa de frequência média alta, isto é, a partir de 2 kHz e conseqüentemente aumentar um pouco o tempo de reverberação na faixa de 2 kHz a 4 kHz da sala, sem ter reflexões tipo especular. Embora esta condição já fosse suficiente para atender os parâmetros teóricos, a faixa de espalhamento foi estendida até 17 kHz para uso em música e filmes devido aos efeitos sonoros de ambiente, conhecidos como efeitos *surround*.



Assim, o maior comprimento de onda a ser difuso foi 0,17 m (2 kHz) que definiu a profundidade de *poço* e o menor comprimento de onda foi 0,02 m para o limite superior da frequência (17 kHz) que definiu o espaçamento. Assim, cada painel foi construído com 0,80 m de largura, 2 m de altura o suficiente para estar acima do nível dos ouvintes para a sensação dos sons provenientes de cima do ouvinte e 0,17 m de profundidade máxima, com 19 elementos por painel e dois ciclos completos simétricos em cada painel. Embora a existência de paredes entre as barras, separando as mesmas na profundidade total do dispositivo, aumentasse a eficiência, elas foram eliminadas apenas para facilitar a construção. Na sala foram utilizados 4 painéis, posicionados dois em cada lateral da área de audição, fixas às paredes da sala. O tipo de material utilizado foi de fibras de madeira selecionadas de *pinus* de média densidade (710 Kg/m<sup>3</sup>). São fibras aglutinadas com resina sintética termofixa, consolidadas sob ação conjunta de calor e pressão, resultando em chapa maciça, conhecida como MDF. A construção mecânica do painel difusor pode ser vista na Figura 4.22.

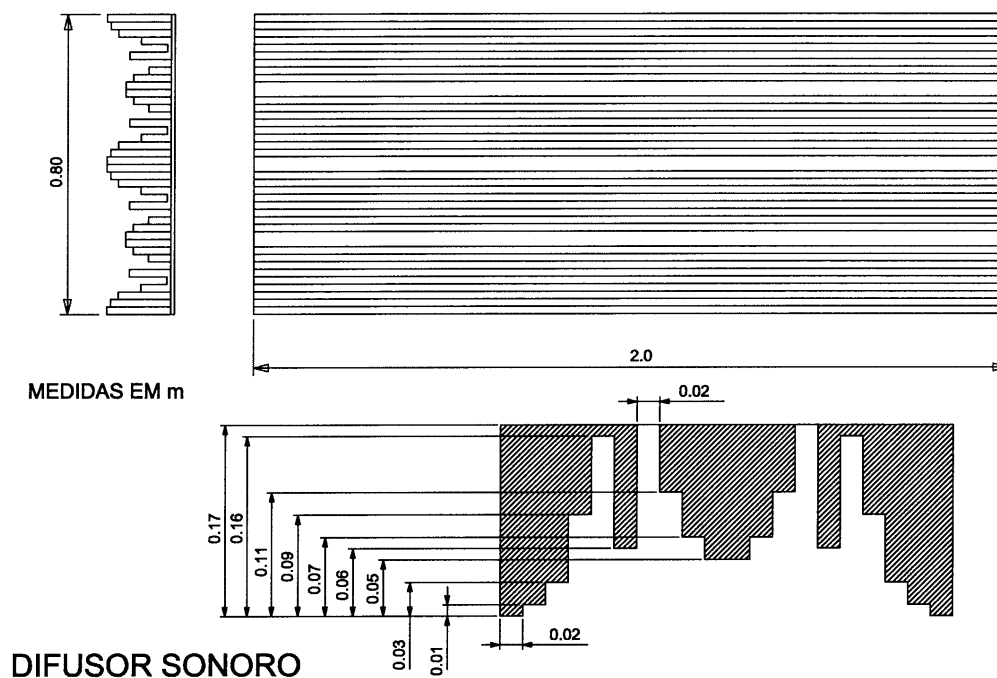


Figura 4.22: Desenho de um dos módulos do difusor sonoro tipo *Schroeder*.

O uso de um segundo subwoofer, devidamente posicionado, com a fase e amplitude (ganho) ajustadas em relação ao outro subwoofer, minimizou as variações em baixas frequências dentro de uma área útil de audição na sala.

A configuração final da sala, com as posições dos ouvintes, fontes sonoras e os materiais para melhoria acústica da sala, pode ser vista na Figura 4.23.

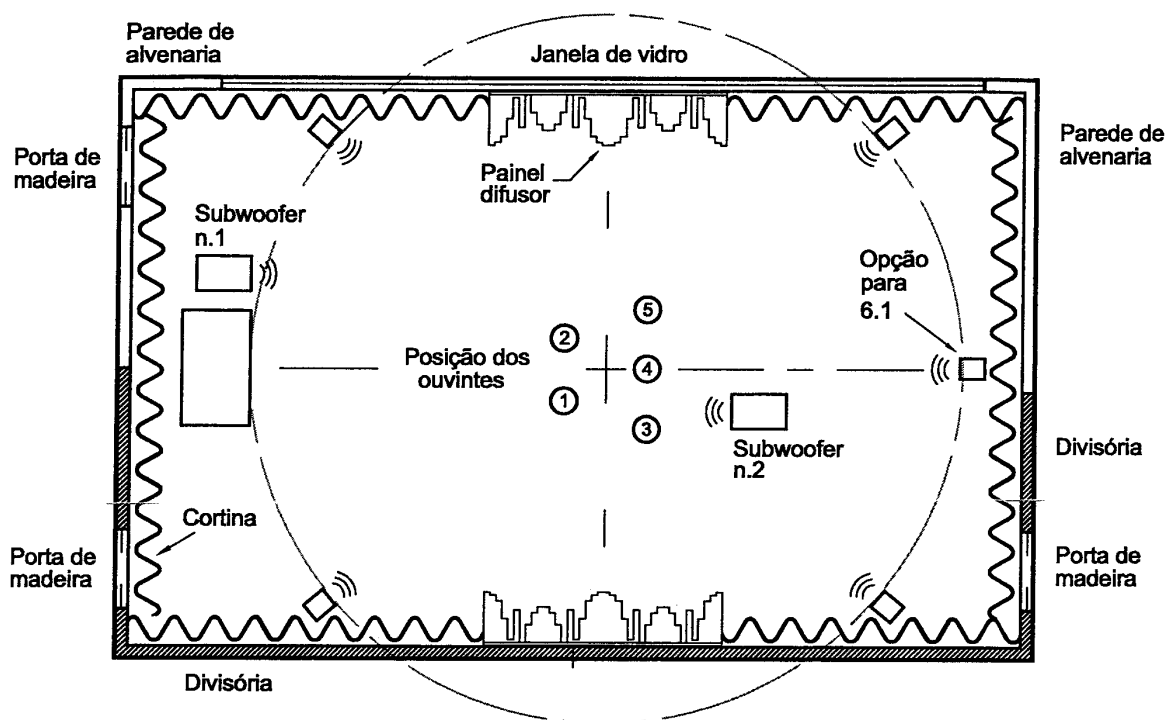


Figura 4.23: Configuração final da sala com as modificações implantadas.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as conclusões dos resultados da pesquisa e experiências realizadas em uma sala preparada para *home theater* com o sistema *DTS / Dolby Digital 5.1* e são sugeridos alguns tópicos para pesquisas futuras.

### 5.2 Considerações finais

- Embora não haja salas regulares, devido às portas, janelas, aberturas, divisórias, é importante obter o máximo de simetria acústica para uma boa definição no posicionamento acústico das fontes sonoras. As superfícies devem ser tratadas acusticamente oferecendo um amortecimento uniforme para evitar as reflexões especulares, dando ênfase e qualidade ao som direto, principalmente ao som frontal. Os tempos de retardo dos sinais para as caixas central e traseiras devem ser ajustados pelo sistema eletroacústico para compensar as distâncias, caso não haja a equidistância entre ouvinte e fontes sonoras.
- Os modos de baixas frequências na sala devem ser controlados para minimizar as variações dos níveis de pressão sonora na área útil de audição. As superfícies de rigidez diferentes, como portas, janelas, divisórias, que são mais sensíveis às deformações que as paredes de alvenaria, além das cavidades (áreas abertas) adjacentes, causam a irregularidade acústica na sala em baixas frequências e portanto não devem ser desprezadas. É importante controlar a resultante das interferências que ocorrem, pelo menos, na área de audição. Um dos métodos é utilizar dois ou mais subwoofers amplificados devidamente posicionados e ajustados entre si em ganho, fase e faixa de frequência de atuação.
- As salas para *home theaters* devem ter baixo tempo de reverberação, abaixo de 0,5 s para que não haja influência da acústica do ambiente de reprodução.

Sendo a sala acusticamente neutra, a sensação de reverberação em níveis mais elevados pode ser introduzida pelo sistema eletroacústico, pois os equipamentos para *home theaters* incorporam técnicas digitais para o processamento de sinais facilitando os ajustes individuais de amplitude para cada fonte sonora e tempo de retardo de sinais (canal central e canais traseiros), além das boas gravações, em multicanal, que já oferecerem níveis de reverberação adequados. A sala nestas condições terá qualidade para música, fala e efeitos sonoros de ambiente.

- Devido ao baixo tempo de reverberação na sala, o uso de painéis de difusão sonora nas laterais do ouvinte, entre as caixas acústicas frontais e traseiras, mantendo a simetria acústica, contribui sensivelmente na melhora da faixa média e alta frequência, aumentando a percepção dos efeitos do ambiente, conhecidos como efeitos *surrounds*.
- Deve haver a sensação de naturalidade no som reproduzido. A uniformidade dos timbres entre as caixas acústicas, exceto o subwoofer, é fundamental para dar a correta posição da origem dos sons e da sensação de movimento das cenas nos filmes. Cada uma tem a sua função e deverá ser posicionada adequadamente, apresentando variação natural de intensidade evitando a percepção de sons pontuais que causariam lacunas entre as fontes sonoras. A boa qualidade do sistema eletroacústico, como reprodutora de sinais, influi no resultado final diante do ouvinte.

### 5.3 Tópicos para futuras pesquisas

- Pesquisar isolamento acústico para uma sala residencial, em toda faixa audível (baixas e altas frequências), para uso do sistema de áudio e vídeo, buscando o conforto dos ambientes vizinhos;
- Pesquisar o coeficiente de espalhamento com base em um painel difusor;
- Estudar materiais para tratamento acústico (reflexão, difusão e absorção) que sejam compatíveis quanto à estética, para uso em residências;

## REFERÊNCIAS

- ALLISON, R.F., *The Influence of Room Boundaries on Loudspeaker Power Output*, *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 22, p. 314-320, Junho 1974.
- ARAU-PUCHADES, H., *An improved reverberation formula*, *Acustica* 65, 4, p.163-179, 1988.
- BALLAGH, K.O., *Optimum Loudspeaker Placement near Reflective Planes*, *J.Audio Eng. Soc.*, vol.31, p. 931-935, Dez.1983.
- BERANEK, L.L., *Noise and Vibration Control*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1971.
- BERANEK, L.L., *Concert Hall Acoustics*, *JASA*, 92 (1), p.1-39,1992.
- BERANEK, Leo Leroy, *Concert and Opera Halls: How They Sound*, *Acoustical Society of America*, Woodbury, New York: 1996. Originalmente publicado como *Music, Acoustics and Architecture*. New York: Wiley, 1962.
- BERANEK, Leo L., *Concert Hall and Opera Houses: Music, Acoustics and Architecture, second edition feb2003*. New York: Springer-Verlag, 2003.
- CAVANAUGH, William. J. e WILKES, Joseph. A., *Architectural Acoustics: Principles and Practices*, 1a. edição. Nova York: John Wiley & Sons Inc., 1999. p.159, 246, table 6.3.
- CEDIA, *Custom Electronic Design & Installation Association (CEDIA)*. Disponível em:<<http://www.cedia.net>>. Acesso em: 10/Dezembro/2002.
- CERVONE, Richard P., *Subjective and Objective Methods for Evaluating the Acoustical Quality of Buildings for Music*. Master's Thesis, University of Florida, Gainesville, FL, 1990.
- CHIANG, W., *Effects of Architectural Parameters on Six Acoustical Measures in Auditoria*. Ph.D. Dissertation, University of Florida, Gainesville, FL, 1994.
- CHIARELLA, Anthony e POLK, Mattew, *Home Theater Handbook Polkaudio*, Baltimore, USA, edição de Fev/2001. Disponível em: <<http://www.polkaudio.com>>. Acesso em: 04/Julho/2003.
- COWAN, James; *Architectural Acoustics Design Guide*. New York: McGraw-Hill, 2000.
- CREMER, L., e MULLER, H.A., *Principles and Applications of Room Acoustics, Vols. 1 and 2, English translation with additions by T.J. Schultz*. New York: Applied Science, 1982.

- DAHL, John, *THX LucasFilm Marketing Manager*. Palestra oferecida no *Consumer Electronic Show, 2002 International CES, USA, Las Vegas*: Jan/ 2002.
- DANCE, S. e SHIELD, B. *Modelling of sound fields in enclosed spaces with absorbent room surfaces Part I: Performance spaces*. *Applied Acoustics* vol.58, p.1-18, 1999.
- DANCE, S. and SHIELD, B. *Modelling of sound fields in enclosed spaces with absorbent room surfaces Part II: Absorptive panels*. *Applied Acoustics* vol.61, p.373-384, 2000.
- DOLBY® LABORATORIES INC., USA. *Some guidelines for producing music in 5.1 channel surround*, p.3. Disponível em: <<http://www.dolby.com>>. Acesso em: 20/Maio/2003.
- DTS® ENTERTAINMENT. Disponível em: <<http://www.dtsonline.com>>. Acesso em: 25/Novembro/2002.
- DUCOURNEAU, J. e PLANEAU V.; *Etude de l'absorption acoustique équivalente des parois planes hétérogènes dans un local industriel. Document de travail [UMAP 2001/JD/01]*. 2001.
- DUCOURNEAU, J. e PLANEAU, V.; *The average absorption coefficient for enclosed spaces with non uniformly distributed absorption*, *Applied Acoustics*, vol. 64, issue 9, p. 845-862, Sept /2003.
- EVEREST, F. Alton, *Master Handbook of Acoustics, fourth edition*. New York: McGraw-Hill, 2001. p.153,155, 324.
- EYRING, C.F. *Reverberation time in "dead" rooms*. *Journal of Acoustical Society of America* 1, p. 217-241, 1930.
- EYRING, C.F., *Methods of calculating the average coefficient of sound absorption*, *Journal of Acoustical Society of America* 4, p. 178-192, 1933.
- FITZROY, D., *Reverberation formulae which seems to be more accurate with non-uniform distribution of absorption*. *Journal of Acoustical Society of America* 31, p. 893-897, 1959.
- GERGES, Samir N.Y., *Ruído: Fundamentos e Controle*, 2a.edição, Universidade Federal de Santa Catarina - SC. Florianópolis: NR Editora, 2000.
- HAAS, H., *Acustica*, 1, 49, 1951.
- HARLEY, Robert; *Home Theater for everyone, revised first edition*. Albuquerque, New Mexico: Acapella Publishing, 2000.

- ITU International Telecommunications Union. Documento Rec.ITU-R BS.775-1, *Multichannel Stereophonic Sound System with and without Accompanying Picture, (1992-1994) Geneva, Switzerland: Julho/1994*. Disponível em: <<http://www.itu.int>>. Acesso em 15/Julho/2003.
- JACKSON, G.M. e LEVENTHAL, H.G., *The acoustics of Domestic Rooms, Applied Acoustics*, 5, p.265-277, 1972.
- JORDAN, V.L., *Acoustical Design of Concert Halls and Theaters*. London: Applied Science, 1980.
- KATES, James M., *Dipole Loudspeaker Response in Listening Rooms, Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 50, n.5, May 2002.
- KUTTRUFF, H., *Room Acoustics; first edition*. Londres: Elsevier Applied Science, 1973.
- KUTTRUFF, H., *Room Acoustics; second edition*. Londres: Elsevier Applied Science, 1979. p.80, 85.
- KUTTRUFF, H. *Room Acoustics; third edition*. Londres: Elsevier Applied Science, 1991.
- KUTTRUFF, H. *A simple iteration scheme for the computing of decay constants in enclosures with diffusely reflecting boundaries. Journal of Acoustical Society of America* 98, p.288-293, 1995.
- KUTTRUFF, Heinrich, *Room Acoustics; fourth edition*. Londres: Spon Press, 2000. p.154, 156, 157, 159, 170, 208.
- LOCHNER, J.P.A. AND BURGER, J.H., *Acustica*, 9, 31, 1959.
- MILLINGTON, G. *A modified formula for reverberation. Journal of Acoustical Society of America* 4, p. 69-82, 1932.
- NAYLOR, G.M., *Treatment of Early and Late Reflections in a Hybrid Computer Model for Room Acoustics, 124<sup>th</sup> ASA Meeting, New Orleans, Paper 3aAA2*, 1992.
- NAYLOR, G.M., *Odeon - Another Hybrid Room Acoustical Model, Applied Acoustics* 38, p.131-143, 1993.
- NEUBAUER, R.O., *Estimation of reverberation time in rectangular rooms with non-uniformly distributed absorption using a modified Fitzroy equation. Building Acoustics* 8, 2, p.115-137, 2001.
- PARKIN, P.H. e MORGAN, K. *J.Acoust.Soc.America*, 48, p.1025, 1970.
- PUJOLLE, J, *Nouveau point de vue sur l'acoustique des salles. Revue d'Acoustique* 18, p. 21-25, 1972.

- PUJOLLE, J., *Nouvelle formule pour la durée de réverbération*. *Revue d'Acoustique* 19, p.107-113, 1975 a.
- PUJOLLE, J., *Mesure simplifiée de la puissance acoustique à l'aide du comparaphone – application au cas des salles réverbérantes “spéciales”*. *Revue d'Acoustique* 35, p.29-33, 1975 b.
- REYNOLDS, Douglas D., *Engineering Principles of acoustics Noise and Vibration control*,. Boston-USA: Allyn and Bacon Inc., 1981. cap.7 e 10, p.404.
- RINDEL, J.H., *The Use of Computer Modeling in Room Acoustics*, *Journal of Vibroengineering*, 2000, n.3 (4)/ Index 41-72, *Paper of the International Conference Baltic-Acoustic 2000/ISSN 1392-8716*, 2000.
- ROBINSON, D.W. e DADSON, R.S., *Threshold of Hearing and Equal Loudness Relations for Pure Tones*, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 14, 1971.
- SABINE, W.C., *Collect papers on acoustics*. New York: Dover Pub, 1964.
- SALAVA, Tomas, *Dipole Loudspeaker Response in Listening Rooms*, *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 51, n.4, letters to the Editor, p. 248, Abril 2003.
- TEMKIN, Samuel, *Elements of Acoustics*, p. 78. New York: John Wiley & Sons, 1981.
- TENENBAUM, Roberto A., *Qualidade Acústica de Salas, Fundamentos, Modelagem Numérica e Técnicas de Medição*, anais do XIX Encontro SOBRAC, Belo Horizonte, Abril 2000.
- THX<sup>®</sup> LTD COMPANY. Disponível em: <<http://thx.com>>. Acesso em: 12 Setembro 2003.
- VORLANDER, M., *Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing / image-source algorithm*, *J.Acoustic.Soc.Am.* 86, p.172-178, 1989.
- VORLANDER, M., *Recent Progress In Room Acoustical Computer Simulation*, anais do I Congresso Iberoamericano de Acústica, p.43-52, 1998.
- WELTI, Todd S., *How many Subwoofers are Enough?*, *J. Audio Engineering Society*, preprint 5602, Maio 2002.
- WELTI, Todd S., e DEVANTIER, Allan, *In-Room Low Frequency Optimization*, 115 th *Convention*, New York, NY, 10-13 Outubro 2003.
- ZIELINSKI, Slawomir K.; RUMSEY, Francis; BECH, Soren; *Effects of Bandwidth Limitation on Audio Quality in Consumer Multichannel Audiovisual Delivery Systems*, *Journal of the Audio Engineering Society*, vol.51, no.6, Junho 2003.



## APÊNDICES

APÊNDICE A – 1<sup>a</sup>. Medição da sala – resultados numéricos

APÊNDICE B – 2<sup>a</sup>. Medição da sala – resultados numéricos

**1a. Medição da Sala (antes da modificação)**

FE1mIsDir

Aurora 3,2 - ISO3382 Acoustical Parameter File

ISO 3382 OCTAVE BAND ACOUSTICAL PARAMETERS

Freq, [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	Lin	A
Signal [dB]	49,76	66,48	70,25	72,5	74,01	73,42	82,1	76,24	74,99	61,22	85,39	85,62
Noise [dB]	29,55	44,68	47,18	47,36	48,36	46,8	54,56	52,03	49,69	38,56	59,07	59,12
strenGth [dB]	-19,24	-2,52	1,25	3,5	5,01	4,42	13,1	7,24	5,99	-7,78	6,39	8,62
C50 [dB]	10,1	3,97	4,91	9,38	10,72	14,95	18,46	17,95	16,28	18,58	14,01	16,88
C80 [dB]	12,23	10,4	9,63	12,74	16,51	22,11	23,92	23,63	23,65	20,31	19,14	22,72
D50 [%]	91,1	71,37	75,61	89,66	92,19	96,9	98,59	98,42	97,7	98,63	96,18	97,99
Ts [ms]	60,36	62,02	51,11	23,61	15,83	11,62	7,29	8,58	14,68	11,91	10,84	8,36
EDT [s]	0,46	0,52	0,47	0,36	0,33	0,21	0,19	0,21	0,19	0,2	0,24	0,2
T20 [s]	1,25	0,44	0,46	0,54	0,37	0,26	0,25	0,23	0,21	--	0,39	0,27
r T20	0,87	0,97	0,99	1	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	--	0,98	0,98
T30 [s]	1,36	0,38	0,44	0,57	0,38	0,43	--	0,49	--	--	0,57	0,57
r T30	0,92	0,93	0,99	0,99	0,99	0,94	--	0,87	--	--	0,96	0,89
Tuser [s]	0,87	0,52	0,43	0,55	0,46	0,24	0,2	0,18	0,16	0,12	0,27	0,2
r Tuser	0,89	0,94	0,99	0,98	0,97	0,99	0,98	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99

RTU = RT User (-5, dB, -15, dB)

**2a. Medição da Sala (após as modificações)**

Aurora 3.2 - ISO3382 Acoustical Parameter File

ISO 3382 OCTAVE BAND ACOUSTICAL PARAMETERS

Freq. [Hz]	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	Lin	A
Signal [dB]	58,88	71,51	75,81	72,78	76,33	75,99	75,9	76,36	74,87	75,99	84,92	83,61
Noise [dB]	50,15	53,36	60,62	57,98	55,3	44,06	42,48	42,32	41,65	43,45	68,01	57,26
strenGth [dB]	-10,12	2,51	6,81	3,78	7,33	6,99	6,9	7,36	5,87	6,99	5,92	6,61
C50 [dB]	9,53	10,52	8,28	9,78	19,2	21,75	24,42	27,4	30,01	33,52	16,96	22,96
C80 [dB]	19,43	19,95	17,1	14,29	26,14	29,71	34,44	36,84	42,17	50,69	28,54	30,04
D50 [%]	89,98	91,86	87,07	90,48	98,81	99,34	99,64	99,82	99,9	99,96	98,03	99,5
Ts [ms]	65,39	43,15	41,47	22,01	6,56	5,23	4,55	3,35	3,33	1,6	7,98	3,64
EDT [s]	0,39	0,33	0,35	0,31	0,04	0,06	0,09	0,07	0,1	--	0,23	0,07
T20 [s]	--	0,24	0,21	0,32	0,3	0,21	0,15	0,13	0,11	0,12	0,24	0,18
r T20	--	0,92	0,97	0,95	0,95	0,99	0,99	0,99	1	0,99	0,98	0,98
T30 [s]	--	--	0,18	0,31	0,32	0,22	0,17	0,14	0,12	0,12	0,21	0,22
r T30	--	--	0,95	0,94	0,97	0,99	0,99	0,99	1	1	0,95	0,99
Tuser [s]	0,28	--	0,29	0,42	--	0,17	0,15	0,14	0,12	0,14	0,22	0,15
r Tuser	0,98	--	0,97	0,95	--	0,94	0,97	0,94	0,98	0,94	0,96	0,97

RTU = RT User (-5. dB, -15. dB)