



Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Instituto Politécnico

José Francisco Lucio Naranjo

# Aperfeiçoamentos no código computacional RAIOS incluindo Autilização

Nova Friburgo  
2010

José Francisco Lucio Naranjo

# Aperfeiçoamentos no código computacional RAIOS incluindo Aurilização

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Matemática Aplicada e Computação Científica.

Orientador: Prof. Roberto Aizik Tenenbaum, D.Sc.

Nova Friburgo  
2010

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/E

L938

Lucio Naranjo, José Francisco.

Aperfeiçoamentos no código computacional  
RAIOS incluindo auralização / José Francisco Lucio  
Naranjo. – 2010.  
74 f.: il.

Orientador: Roberto Aizik Tenenbaum.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do  
Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Acústica arquitetônica – Métodos de simulação -  
Teses. 2. Som – Métodos de simulação - Teses.  
3. Realidade virtual – Acústica – Teses. 4. Acústica -  
Controle de qualidade - Teses. I. Tenenbaum, Roberto A.  
II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto  
Politécnico. III. Título.

CDU 531.775:519.6

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

---

Assinatura

---

Data

José Francisco Lucio Naranjo

# Aperfeiçoamentos no código computacional RAIOS incluindo Autilização

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Matemática Aplicada e Computação Científica.

Aprovado em 30 de abril de 2010

Banca Examinadora:

---

Prof. Roberto Aizik Tenenbaum, D.Sc. (Orientador)  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

---

Prof. Leonardo Tavares Stutz, D.Sc.  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

---

Prof. Julio Cesar Boscher Torres, D.Sc.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Nova Friburgo  
2010

# DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação à minha esposa Yolanda e à  
pequena pessoa que está crescendo dentro dela.

## AGRADECIMENTOS

A minha família por ter me dado a motivação de sempre ser melhor.

Aos meus pais pelo apoio incondicional para que eu empreenda os meus estudos de pós-graduação.

A meu orientador e amigo, o professor *Roberto Tenenbaum*, por ter me introduzido ao fascinante mundo da acústica, e logicamente também pela competência e paciência com as quais as minhas dúvidas sempre foram recebidas.

Ao professor *Julio Torres* pela importantíssima colaboração.

Ao *LIDAV* e ao *Instituto Politécnico* por ter me brindado com a infraestrutura necessária para que este trabalho fosse realizado.

A *CAPES* pelo suporte financeiro, sem o qual não teria sido possível realizar esta dissertação.

“As pessoas que vencem neste mundo são as que procuram as circunstâncias de que precisam e, quando não as encontram, as criam.”

*Bernard Shaw.*

“Não há nada que não se consiga com a força de vontade, a bondade e, principalmente, com o amor.”

*Cícero.*

## RESUMO

LUCIO NARANJO, José Francisco. *Simulação Numérica de Acústica de Salas: Aperfeiçoamentos no código computacional RAIOS incluindo Aurilização*. 2010. 74 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2010.

Neste trabalho se revisam os principais aperfeiçoamentos implementados no código computacional de simulação numérica de acústica de salas denominado *RAIOS*. Tais aperfeiçoamentos são divididos em quatro grupos: processo de importação de informação a partir de arquivos *DXF*; a implementação de novos parâmetros de qualidade acústica, assim como o cálculo do nível de pressão sonora; modificações para lidar com casos de acústica de exteriores (ruído urbano) e por último; inserção do módulo de realidade virtual acústica. Inicialmente, é apresentada uma breve revisão do estado anterior do código computacional *RAIOS* e, em seguida, os modelos que foram implementados no software. Os resultados obtidos foram precisos e os erros apresentados são justificados através da análise das características dos modelos e métodos adotados pelo simulador.

Palavras-chave: Simulação numérica de acústica de salas; Aurilização; Realidade virtual acústica; Simulação numérica de acústica urbana; Parâmetros de qualidade acústica; Importação de informação a partir de arquivos *DXF*.



## ABSTRACT

In this work, the most important improvements implemented in the computer code of numeric simulation of room acoustics, called *RAIOS*, are presented. These improvements are divided in four groups: Data importation process from *DXF* files; implementation of new acoustic quality parameters and steady state sound pressure level calculation; modifications in order to deal with cases of open field acoustics (urban noise); and implementation of the acoustic virtual reality module. Initially, a brief overview of the previous version of the computer code *RAIOS* is done. Then, the background theory of the procedures performed in the source code are presented. The results obtained were accurate and the encountered errors are justified through the characteristics analysis of the models and methods adopted by the simulator.

Keywords: Room acoustics numeric simulation; Auralization; Acoustic virtual reality; Urban acoustic numeric simulation; Acoustic quality parameters; Data importation from *DXF* files.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Subdivisão do icosaedro em triângulos equiláteros ( $n = 0,1,2,3$ ). . . . .	20
Figura 2.2	Energia distribuída entre os fenômenos de absorção, reflexão especular e reflexão difusa. . . . .	21
Figura 2.3	Divisão não-regular de uma superfície usando triângulos. . . . .	22
Figura 2.4	Ângulo sólido $\Omega_{FS}$ de uma superfície $S$ em relação ao ponto $F$ , situado sobre a superfície de partida. . . . .	24
Figura 2.5	Subdivisão das superfícies em elementos triangulares. . . . .	25
Figura 2.6	Transição de energia desde un elemento $i$ até um elemento $j$ . . . . .	25
Figura 2.7	Transição de energia na matriz $\mathbf{E}_D$ . . . . .	27
Figura 2.8	Dependência da precisão dos métodos como função do coeficiente médio de difusão. . . . .	28
Figura 2.9	Resposta Impulsiva Quadrática Especular ( $RIQ_E$ ). . . . .	29
Figura 2.10	Resposta Impulsiva Quadrática Difusa ( $RIQ_D$ ). . . . .	29
Figura 2.11	Resposta Impulsiva Quadrática Híbrida ( $RIQ_H = RIQ_E + RIQ_D$ ). . . . .	29

Figura 3.1	Menu <i>Draw</i> do <i>AutoCAD</i> . . . . .	32
Figura 3.2	Traçado de uma <i>3dPolyline</i> no sentido anti-horário. . . . .	33
Figura 3.3	Superfície plana com os dois vetores paralelos a dois dos seus lados e o vetor ortogonal ao plano, resultado do produto vetorial entre os dois. . . . .	35
Figura 3.4	Janela de controle no <i>RAIOS</i> : ingresso de um vértice de uma superfície plana. . . . .	35
Figura 4.1	Padrão de captação de um MF8. . . . .	38
Figura 4.2	Incidência sonora das reflexões laterais. . . . .	38
Figura 4.3	Três exemplos de <i>CD</i> (CHU, 1978). . . . .	39
Figura 4.4	Limite de audibilidade definido pelo <i>NPS</i> e a frequência (GINN, 1978). . . . .	41
Figura 4.5	Representação gráfica das curvas de ponderação A, B, C e D. . . . .	41
Figura 6.1	Resposta impulsiva de uma sala (esquemática). . . . .	46
Figura 6.2	Diagrama para implementação do modelo das <i>RIBQ</i> 's. . . . .	47
Figura 6.3	Implementação da Wavelet (a) pela decomposição em diversos estágios e (b) através de um banco de filtros equivalente. . . . .	48
Figura 6.4	Implementação da wavelet através de filtros esparsos. . . . .	49

Figura 7.1 Fluxograma do algoritmo de importação implementado no código computacional <i>RAIOS</i> . . . . .	52
Figura 7.2 Planta baixa original de uma sala em <i>AutoCAD</i> . . . . .	53
Figura 7.3 <i>3dPolylines</i> traçadas a partir da planta baixa, elevação e cortes originais em <i>AutoCAD</i> , vistas em duas perspectivas. . . . .	53
Figura 7.4 Tela do programa <i>RAIOS</i> depois de concluído o processo de importação de superfícies de contorno da sala da Fig 7.2. . . . .	53
Figura 7.5 <i>POLYLINE</i> representando uma fonte linear em <i>AutoCAD</i> . . . . .	54
Figura 7.6 Tela do programa <i>RAIOS</i> depois de concluído o processo de importação de fontes sonoras, para o número de fontes igual a: (a) 10, (b) 20 e (c) 30. . . . .	54
Figura 7.7 Modelo no <i>AutoCAD</i> com <i>POLYLINES</i> representando superfícies de contorno e fontes lineares. . . . .	55
Figura 7.8 Tela do programa <i>RAIOS</i> depois de concluído o processo de importação de superfícies e fontes sonoras lineares. . . . .	55
Figura 7.9 Parâmetro $D_{80}$ calculado pelo novo modelo implementado no <i>RAIOS</i> . . . . .	56
Figura 7.10 Parâmetro $C_{80}$ tomado da simulação feita no <i>RAIOS</i> para o <i>Round Robin</i> 3. . . . .	56
Figura 7.11 Parâmetro $C_{50}$ calculado pelo novo modelo implementado no <i>RAIOS</i> . . . . .	57

Figura 7.12 Parâmetro $D_{50}$ tomado da simulação feita no <i>RAIOS</i> para o <i>Round Robin 3</i> . . . . .	57
Figura 7.13 Parâmetro $G$ tomado da simulação feita no <i>RAIOS</i> para o <i>Round Robin 3</i> . . . . .	58
Figura 7.14 Parâmetro $LG$ calculado pelo novo modelo implementado no <i>RAIOS</i> . . . . .	58
Figura 7.15 Parâmetro $ST1$ calculado pelo novo modelo implementado no <i>RAIOS</i> . . . . .	59
Figura 7.16 Sala anecóica de forma cúbica com uma fonte sonora de 1 Watt de potência e três receptores alinhados à fonte. . . . .	60
Figura 7.17 $NPS$ por banda de oitava. . . . .	60
Figura 7.18 $NPS$ global e $NPS$ 's ponderados com as curvas A, B, C e D. . . . .	60
Figura 7.19 Foto aérea do setor de Copacabana escolhido para a comparação (Google earth). . . . .	61
Figura 7.20 Seis pontos foram medidos in situ e simulados pelos dois softwares ( <i>CADNA-A</i> e <i>RAIOS</i> ). À direita a janela do <i>RAIOS</i> . . . . .	63
Figura 7.21 Sala cúbica para validação do processo de realidade virtual acústica. . . . .	64
Figura 7.22 Amplitude <i>versus</i> tempo do som gerado no processo de aurilização (arquivo .wav) para a Cabeça Virtual 1. . . . .	64
Figura 7.23 Amplitude <i>versus</i> tempo do som gerado no processo de aurilização (arquivo .wav) para a Cabeça Virtual 2. . . . .	65

Figura 7.24 Modelo da sala de eventos em construção no Rio de Janeiro. ....	65
Figura 7.25 Sinal anecóico original, arquivo .wav. ....	66
Figura 7.26 Resultado da auralização no Receptor 6. ....	66
Figura 7.27 Resultado da auralização no Receptor 2. ....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Fragmento de um arquivo <i>DXF</i> com seu significado. ....	31
Tabela 3.2	Palavras reservadas para identificar uma <i>POLYLINE</i> e seus elementos. ....	32
Tabela 4.1	Utilização dos filtros de ponderação (GINN, 1978). ....	41
Tabela 4.2	Valores de ponderação por banda de oitava (em dB). ....	42
Tabela 6.1	Estrutura de dados de entrada para o processo de auralização. ....	49
Tabela 7.1	$C_{80}$ calculado analiticamente. ....	56
Tabela 7.2	$D_{50}$ calculado analiticamente. ....	57
Tabela 7.3	Resultados numéricos e analíticos para o cálculo do <i>NPS</i> . ....	59
Tabela 7.4	Valores dos níveis de potência sonora considerados nas fontes sonoras lineares. ....	62
Tabela 7.5	Coefficientes de absorção e difusão nas superfícies de contorno do cenário simulado. ....	62
Tabela 7.6	Medições experimentais e resultados numéricos do cálculo do <i>NPS</i> . ...	63
Tabela 7.7	Coefficientes de absorção e difusão dos materiais usados. ....	64

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Histórico</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>Revisão bibliográfica</b> .....	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Contribuição do trabalho</b> .....	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>O CÓDIGO COMPUTACIONAL <i>RAIOS</i></b> .....	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Método de traçado de raios</b> .....	<b>19</b>
2.1.1	Modelagem da fonte . . . . .	20
2.1.2	Modelagem das reflexões . . . . .	20
2.1.3	Modelagem das superfícies de contorno da sala . . . . .	22
2.1.4	Modelagem da recepção . . . . .	22
<b>2.2</b>	<b>Método de transição de energia</b> .....	<b>23</b>
2.2.1	Modelagem da fonte . . . . .	24
2.2.2	Modelagem das reflexões e das superfícies . . . . .	25
2.2.3	Modelagem da recepção . . . . .	26
2.2.4	Distribuição inicial da energia nas superfícies . . . . .	26
2.2.5	Processamento das reflexões difusas . . . . .	27
<b>2.3</b>	<b>O Método Híbrido</b> .....	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>IMPORTAÇÃO DE DADOS A PARTIR DE ARQUIVOS <i>DXF</i></b> ...	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>O padrão <i>DXF</i> para importação de informação</b> .....	<b>30</b>
3.1.1	A Entidade <i>POLYLINE</i> . . . . .	30
3.1.2	Busca de uma <i>POLYLINE</i> dentro de um arquivo <i>DXF</i> . . . . .	31



3.1.3	<i>3dPolyline</i> em <i>AutoCAD</i> . . . . .	32
<b>3.2</b>	<b>Cálculo do vetor normal</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>Comparação com o processo anterior</b> . . . . .	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>INCLUSÃO DE NOVOS PARÂMETROS</b> . . . . .	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Novos parâmetros de qualidade acústica</b> . . . . .	<b>36</b>
4.1.1	Definição a 80 ms, $D_{80}$ . . . . .	36
4.1.2	Clareza a 50 ms, $C_{50}$ . . . . .	37
4.1.3	Ganho lateral, $LG$ . . . . .	37
4.1.4	Fator de suporte, $ST1$ . . . . .	38
<b>4.2</b>	<b>Cálculo do nível de pressão sonora</b> . . . . .	<b>39</b>
4.2.1	Audibilidade . . . . .	40
<b>5</b>	<b>EXTENSÃO PARA ACÚSTICA URBANA</b> . . . . .	<b>43</b>
<b>5.1</b>	<b>Principais diferenças na simulação de acústica de interiores e acústica de exteriores</b> . . . . .	<b>43</b>
5.1.1	Fontes sonoras lineares . . . . .	44
<b>6</b>	<b>AURILIZAÇÃO</b> . . . . .	<b>45</b>
<b>6.1</b>	<b>A resposta impulsiva biauricular quadrática</b> . . . . .	<b>45</b>
6.1.1	Parte especular da $RIBQ$ . . . . .	46
6.1.2	Parte difusa da $RIBQ$ . . . . .	46
6.1.3	Modelagem das $HRTF$ 's via transformadas wavelet . . . . .	47
6.1.4	Considerações de programação para a implantação da rotina computacional de aurilização no código computacional $RAIOS$ . . . . .	48
<b>7</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E RESULTADOS</b> . . . . .	<b>51</b>
<b>7.1</b>	<b>Processo de Importação</b> . . . . .	<b>51</b>
7.1.1	Implementação Computacional . . . . .	51

7.1.2	Resultados da importação de dados . . . . .	52
<b>7.2</b>	<b>Validação dos novos parâmetros de qualidade acústica . . . . .</b>	<b>55</b>
7.2.1	Verificação dos resultados dos parâmetros $D_{80}$ e $C_{50}$ . . . . .	56
7.2.2	Verificação dos Resultados dos parâmetros $LG$ e $ST1$ . . . . .	57
<b>7.3</b>	<b>Validação do cálculo do nível de pressão sonora . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>7.4</b>	<b>Acústica Urbana . . . . .</b>	<b>61</b>
7.4.1	Cenário escolhido para a simulação . . . . .	61
<b>7.5</b>	<b>Aurilização . . . . .</b>	<b>63</b>
7.5.1	Resultados Gerais da simulação . . . . .	63
7.5.2	Exemplo prático em uma sala em construção . . . . .	65
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS . . . . .</b>	<b>68</b>
<b>8.1</b>	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>68</b>
8.1.1	Importação de informação . . . . .	68
8.1.2	Parâmetros de qualidade acústica e cálculo do nível de pressão sonora . . . . .	68
8.1.3	Acústica urbana . . . . .	69
8.1.4	Aurilização . . . . .	69
<b>8.2</b>	<b>Perspectivas . . . . .</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>72</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A propagação sonora em recintos fechados, devido ao grande conjunto de efeitos que a influenciam — como a reflexão, a difração, a absorção, a difusão e o amortecimento, dentre muitos outros — já torna sua análise muito mais difícil, por exemplo, do que a propagação em campo livre. Porém, devido ao avanço da tecnologia da computação e à evolução das linguagens de programação, é possível, hoje em dia, simular uma grande variedade de fenômenos da propagação de ondas sonoras. Os métodos numéricos transportam a realidade física ao domínio dos computadores e são uma das mais poderosas ferramentas de trabalho, disponíveis para arquitetos, engenheiros e acústicos, entre outros profissionais.

Uma adequada simulação do campo acústico vai permitir avaliar a funcionalidade de uma sala, ainda em projeto, o que representa uma grande oportunidade para melhorar a qualidade sonora do recinto otimizando os recursos disponíveis. Para salas já existentes, a avaliação acústica dada por um simulador numérico permitirá identificar eventuais problemas acústicos com um custo relativamente pequeno e, depois, testar virtualmente diversas soluções. Mais ainda, a partir da simulação do campo acústico, mediante a auralização, é possível reproduzir como um determinado conteúdo sonoro (discurso, música) seria percebido por um ser humano situado em diversos pontos da sala, fornecendo dessa maneira uma validação do projeto acústico de forma muito mais completa.

## 1.1 Histórico

A necessidade de contar com um software que permita prever o comportamento do campo acústico numa sala, fez com que no ano de 1991, um grupo de pesquisadores da Universidade Federal do Rio de Janeiro desenvolvesse a primeira versão do código computacional *RAIOS* — Room Acoustics Integrated and Optimized Software (ARAUJO et al., 1992; TENENBAUM et al., 1992). Desde então, o software tem passado por diversos processos de aperfeiçoamento, incorporando novos modelos de simulação e otimizando os já existentes.

No final do ano 2002, o software, que estava na sua versão 3, já tinha participado da inter-comparação internacional entre simuladores de acústica de salas, denominado “*Round Robin 3*” (BORK, 2005). Naquela ocasião, o código computacional *RAIOS* (CAMILO, 2003), que já contava com um modelo híbrido de traçado de raios (EMBRECHTS, 1982) e transição de energia (ALARCÃO et al., 2000) para acústica de salas, mostrou ser um dos melhores programas na área de simulação numérica de acústica de salas (TENENBAUM et al., 2006b).

Atualmente, as contínuas modificações do *RAIOS* estão a cargo dos pesquisadores do LIDAV (Laboratório de Instrumentação em Dinâmica, Acústica e Vibrações) no Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Foi nesse grupo onde os aperfeiçoamentos, implementados e descritos neste trabalho, foram formulados e que permitiram que o código computacional *RAIOS* chegasse à sua versão 4.

## 1.2 Revisão bibliográfica

Existe uma ampla variedade de textos publicados relacionados com simulação de campo acústico, assim como várias aplicações de tais estudos em forma de software. Entre os software mais destacados podem-se mencionar o *ODEON* (CHRISTENSEN, 2001), *CADNA-A* (DATAKUSTIK-GMBH, 2005), *COLISEO* (ALMEIDA et al., 1999), *CATT* (DALENBÄCK, 2002), entre outros.

Como foi sinalizado ao início deste capítulo, a acústica de salas envolve uma série de fenômenos pertinentes à propagação do som, portanto, uma simulação numérica adequada nem sempre pode ser alcançada com apenas um método numérico. A utilização de métodos híbridos (VORLÄNDER, 1989), além de reduzir notavelmente o custo computacional de cálculo, combinam as melhores características de vários métodos, alcançando representações mais realistas do campo acústico. Por tal motivo, os diversos softwares de simulação numérica de acústica de salas, usam atualmente uma variedade de métodos híbridos para computar suas predições (RINDEL, 2000). Para a representação das salas, eles contam com ferramentas visuais 3-D, e, em alguns casos, utilizam procedimentos incorporados para a importação de dados, armazenados em arquivos criados por aplicações *CAD*. Além do mais, os resultados não só se apresentam por meio de tabelas e gráficos para os olhos, mas também para os ouvidos através de técnicas de aurilização (KLEINER et al., 1993; VORLÄNDER, 2006).

Pode-se observar que, dentre as variáveis do problema em questão, está a pro-

cura de técnicas mais eficientes para reduzir o volume de operações de pesados processos recursivos. Tais processos estão presentes, principalmente, na técnica de auralização. Outro tema que tem demandado bastante atenção consiste em otimizar a interação entre o software e o usuário, o que se vê refletido em processos de importação de informação.

### 1.3 Contribuição do trabalho

Embora a efetividade do *RAIOS 3* tenha sido comprovada na inter-comparação *Round Robin 3*, com o passar do tempo, um software constantemente abre novas possibilidades de aperfeiçoamentos. Mais ainda depois de revisar questões já abordadas por outros programas similares. O presente trabalho se baseia justamente em buscar fornecer soluções para aquelas questões. Dentre elas estão o módulo de importação automática de dados a partir de arquivos CAD para o software, a inclusão de outros parâmetros de qualidade acústica, o cálculo do nível de pressão sonora nos receptores em regime permanente, adaptação do código computacional para simular casos de acústica de exteriores e, finalmente, o modelo de *Realidade Virtual Acústica*.

A seguir, de modo sucinto, descreve-se como o trabalho está organizado. No Capítulo 2, realiza-se uma descrição do software *RAIOS* no seu estado prévio à implantação dos aperfeiçoamentos. No Capítulo 3, detalham-se os principais componentes de um arquivo *DXF* que serão utilizados como padrão para importação de informação do modelo da sala. Além disso, é apresentada a formulação vetorial para definir automaticamente o vetor normal das superfícies de contorno importadas. No Capítulo 4, se descrevem os novos parâmetros de qualidade acústica que foram implementados. Também é explicado o fundamento teórico utilizado para o cálculo do Nível de Pressão Sonora (*NPS*). No Capítulo 5, explicam-se as modificações feitas no *RAIOS* para lidar com casos de acústica exterior, como acústica urbana. No Capítulo 6 é apresentado o modelo de auralização (TORRES, 2004) implantado no *RAIOS*, onde revisam-se brevemente os modelos adotados para gerar a Resposta Impulsiva Biauricular Quadrática (*RIBQ*), necessária para gerar a auralização. No Capítulo 7, são apresentados os principais resultados dos modelos implementados. Finalmente, no Capítulo 8, comenta-se as principais conclusões do trabalho e os próximos passos sugeridos para o aperfeiçoamento do código computacional *RAIOS*.

## 2 O CÓDIGO COMPUTACIONAL *RAIOS*

O código computacional *RAIOS* (Room Acoustics Integrated and Optimized Software), para simulação numérica de acústica de salas, modela o campo acústico existente em um recinto com geometria arbitrária, mediante o cálculo da resposta impulsiva em regime transiente. O programa *RAIOS* utiliza dois eficientes métodos para a modelagem numérica da propagação do som. O primeiro consiste na representação das reflexões especulares via método de traçado de raios acústicos (EMBRECHTS, 1982), e o segundo, visando modelar as reflexões difusas, utiliza o método de transição de energia modificado (ALARCÃO et al., 2000). Contudo, mesmo com adequada modelagem do fenômeno de propagação do som, não se pode obter uma boa representação do campo acústico, se não se faz uma correta modelagem de outros elementos tais como fontes, receptores e superfícies de contorno da sala.

Dito isso, neste capítulo serão discutidos muito brevemente os modelos que o software *RAIOS* utiliza para gerar a resposta impulsiva virtual da sala.

### 2.1 Método de traçado de raios

Aplicando os pressupostos da acústica geométrica (KUTTRUFF, 2000), a modelagem da onda sonora é feita através de vários *raios acústicos* retilíneos partindo da fonte sonora. Cada um deles possui informação do espectro de potência e da distância percorrida pela onda. Ao se propagar em linha reta, cada raio é afetado pelos efeitos de dissipação, devido à viscosidade do ar, e pelos fenômenos de absorção, reflexão especular e reflexão difusa que estão presentes quando o raio incide em uma das superfícies de contorno da sala. A reflexão especular é aquela que obedece à lei de Snell (SEMAT; BAUMEL, 1976). Isso quer dizer que, tanto o raio incidente, quanto o raio refletido e a normal à superfície estão no mesmo plano, e que o ângulo de incidência (ângulo formado pelo raio incidente e a normal) e o ângulo de reflexão (ângulo formado pelo raio refletido e a normal) são iguais. Quando uma parcela da energia se espalha por uma direção diferente da especular, esta

é considerada como reflexão difusa, ou não especular, também conhecida como fenômeno de espalhamento (Fig. 2.2).

### 2.1.1 Modelagem da fonte

O código computacional *RAIOS* utiliza um modelo de fonte que emite um grande número de raios (onidirecionalmente ou não), onde se procura obter a máxima homogeneidade na distribuição angular dos raios emitidos pela fonte. Isso é obtido mediante a subdivisão geodésica do icosaedro regular. A idéia é dividir recursivamente cada uma das faces triangulares originais em novos triângulos equiláteros. Esse processo recursivo (LEWERS, 1993) está ilustrado na Fig. 2.1. Após  $n$  subdivisões o número  $V$  de vértices é dado por

$$V = 2 + 10(4^n). \quad (2.1)$$

Projetando aqueles vértices em uma superfície esférica, concêntrica ao icosaedro, é possível obter os cossenos diretores e, portanto, as direções dos raios que serão emitidos. A energia sonora da fonte é repartida igualmente pelos raios, se a fonte for onidirecional.

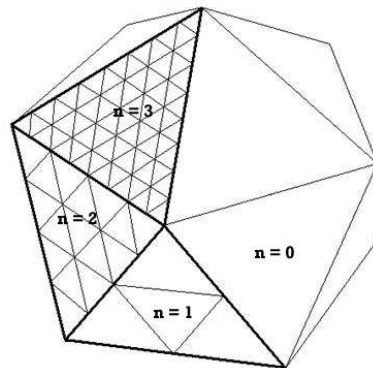


Figura 2.1: Subdivisão do icosaedro em triângulos equiláteros ( $n = 0,1,2,3$ ).

### 2.1.2 Modelagem das reflexões

O fenômeno da reflexão do raio acústico sobre uma das superfícies de contorno da sala deve ser modelado numericamente com muito cuidado, devido à sua fundamental importância na simulação numérica de acústica de salas. Vorländer e Mommertz (2000) propuseram um modelo, em que se baseou a norma ISO/WD17487 (2001), que introduz o coeficiente de difusão,  $\delta$ , responsável por representar numericamente a porção de energia refletida não-especularmente. O valor do coeficiente vai desde zero, para reflexões puramente

especulares, até um, para reflexões puramente difusas. Contudo, utilizar o método de traçado de raios para a simulação das reflexões difusas não é recomendável, nem mesmo viável, devido ao fato de que para cada raio incidente em uma superfície deveria-se gerar um grande número de raios que seriam emitidos para diferentes direções. Isso levaria a um crescimento exponencial no custo computacional do modelo. Portanto, o método dos raios somente é utilizado para processar as reflexões especulares. O processamento das reflexões difusas são abordadas na seção 2.2.

Na Fig. 2.2 é mostrado como é computada a redução de energia devido ao fenômeno da reflexão, com absorção e difusão. Aqui,  $E$  é a energia incidente na superfície,  $\alpha$  é o coeficiente de absorção, e  $\delta$  é o coeficiente de difusão. A energia absorvida é  $E\alpha$ ; a energia refletida difusamente é  $E(1-\alpha)\delta$ ; e a energia refletida specularmente é  $E(1-\alpha)(1-\delta)$ . A parcela da energia difusa é armazenada, juntamente ao instante de tempo em que ocorre a reflexão, para ser utilizada, posteriormente, no algoritmo que modela as reflexões difusas.

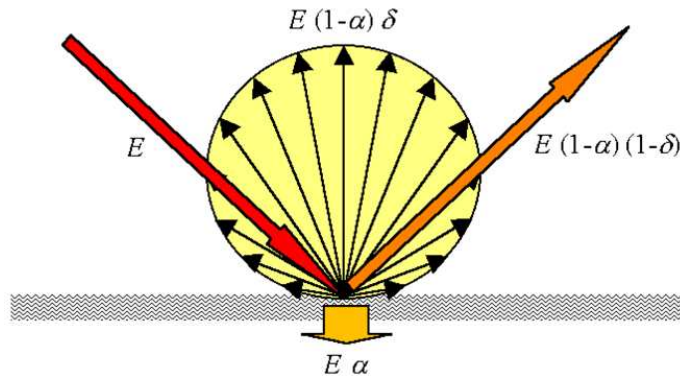


Figura 2.2: Energia distribuída entre os fenômenos de absorção, reflexão especular e reflexão difusa.

A energia do raio depois de  $N$  reflexões especulares é calculada pela expressão

$$E_N = \frac{E_F}{N_R} D_{\theta\phi} e^{-\gamma d} \prod_i^N (1 - \alpha_i)(1 - \delta_i), \quad (2.2)$$

onde  $E_F$  é a energia total emitida pela fonte;  $N_R$  é o número de raios utilizado;  $D_{\theta\phi}$  é a diretividade da fonte, função das coordenadas esféricas de azimuth,  $\theta$ , e elevação,  $\phi$ ;  $\gamma$  é o coeficiente de atenuação do ar,  $d$  é a distancia percorrida pelo raio; e  $\alpha_i$  e  $\delta_i$  são os coeficientes de absorção e difusão, respectivamente, da superfície  $i$ . Os parâmetros  $\alpha_i$ ,  $\delta_i$  e  $D_{\theta\phi}$  são considerados por banda de oitava, ou seja, dependem da frequência. No caso particular de uma fonte onidirecional, tem-se  $D_{\theta\phi} = 1$ .



### 2.1.3 Modelagem das superfícies de contorno da sala

O software *RAIOS* utiliza um modelo para simular as superfícies de contorno da sala, baseado em uma divisão não-regular das superfícies em triângulos, como mostra a Fig. 2.3

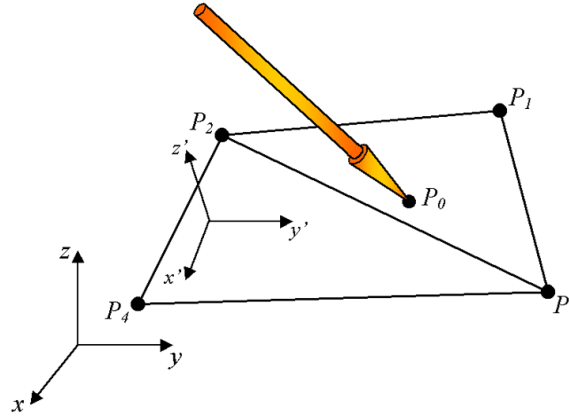


Figura 2.3: Divisão não-regular de uma superfície usando triângulos.

Para obter essa subdivisão, deve-se encontrar valores para  $\lambda_i$ , com  $i = 1, 2, 3$ , que satisfazem

$$P_0 = \sum_{i=1}^3 \lambda_i P_i, \quad (2.3)$$

onde  $P_0$  é o ponto de intersecção entre o raio e a superfície, e  $P_i$ , com  $i = 1, 2, 3$ , são os vértices do triângulo.  $P_0$  é um ponto interno se  $\sum_{i=1}^3 \lambda_i \leq 1$  e  $\lambda_i \geq 0$ .

A vantagem desta verificação é que ela é simples e rápida. Dividir as superfícies em triângulos, mesmo para um número elevado destes, reduz notavelmente a complexidade computacional e se traduz em uma significativa melhora para o método de traçado de raios.

### 2.1.4 Modelagem da recepção

Uma adequada modelagem da célula receptora é fundamental na simulação de acústica de salas. O código computacional *RAIOS* utiliza um método que transforma a energia que chega ao receptor em intensidade. Utiliza-se um disco (virtual, naturalmente) de recepção (área circular de imissão), podendo este girar em torno do ponto de medição, de maneira que todo raio acústico incida de forma ortogonal. A intensidade captada em um instante

de tempo  $t$  é dada por

$$I_R(t) = \frac{\sum_i E_i}{\pi r^2}, \quad (2.4)$$

onde  $\sum_i E_i$  é o somatório das energias de todos os raios acústicos que chegam ao receptor em um instante  $t$  e  $r$  é o raio do disco. Ao final do processamento, a resposta impulsiva média da região esférica  $D$  é definida por

$$\bar{I}(t) = \frac{1}{\pi r^2 \mathcal{V}} \int_D E(t, x, y, z) dV, \quad (2.5)$$

onde  $\mathcal{V} = 4\pi r^3/3$  e  $D$  é o domínio espacial esférico definido pela rotação do disco em torno de seu centro geométrico.

Adota-se, em geral, um valor de 15 cm para  $r$ , aproximadamente a mesma dimensão de uma cabeça humana. O momento exato da recepção é o mesmo da interceptação de um raio acústico com o disco.

## 2.2 Método de transição de energia

O método de transição de energia é utilizado para a simulação das reflexões difusas e está baseado na troca de energia entre a fonte, as superfícies de contorno e o receptor em intervalos de tempo  $\tau$ , iguais ao tempo característico da sala (ALARCÃO et al., 2000), definido por

$$\tau = \frac{4V}{cS}, \quad (2.6)$$

onde  $V$  é o volume da sala,  $c$  é a velocidade do som e  $S$  é a área total de todas as superfícies de contorno da sala. O intervalo,  $\tau$ , é também chamado de tempo de transição da sala e corresponde ao tempo de percurso da onda acústica ao longo do livre caminho médio da sala, ou seja,

$$l_m = c\tau = \frac{4V}{S}. \quad (2.7)$$

Isso quer dizer que o método está fundamentado em um campo sonoro perfeitamente difuso, como na hipótese adotada por Sabine (1932).

### 2.2.1 Modelagem da fonte

Inicialmente, utilizando o método de traçado de raios, distribui-se a energia emitida pela fonte sonora por todas as superfícies de contorno. A parcela de energia  $E_S$ , recebida pela superfície  $S$ , depois de  $N$  reflexões especulares, está definida pela expressão

$$E_S = \frac{E_F}{N_R} D_{\theta\phi} e^{-\gamma d} \left( \prod_i^N (1 - \alpha_i)(1 - \delta_i) \right) (1 - \alpha_S)\delta_S, \quad (2.8)$$

onde  $E_F$  é a energia total emitida pela fonte;  $N_R$  é o número de raios utilizado;  $D_{\theta\phi}$  é a diretividade da fonte,  $\gamma$  é o coeficiente de absorção (atenuação) do ar;  $d$  é a distancia percorrida pelo raio desde a fonte até chegar à superfície  $S$ ;  $\alpha_i$  e  $\delta_i$  são os coeficientes de absorção e difusão, respectivamente, da superfície  $i$ ; e  $\alpha_S$  e  $\delta_S$  são os coeficientes de absorção e difusão, respectivamente, da superfície  $S$ . O instante de tempo,  $t$ , no qual o raio chega à superfície é dado por

$$t = d/c, \quad (2.9)$$

onde  $c$  é a velocidade de propagação do som.

Em seguida, o método consiste em que, cada uma das superfícies vai atuar como uma nova fonte sonora, irradiando energia para as restantes, em proporção aos ângulos sólidos das últimas com relação ao centro geométrico da primeira, como ilustrado na Fig. 2.4.

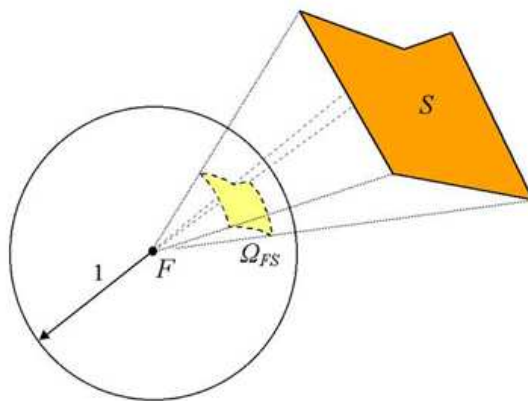


Figura 2.4: Ângulo sólido  $\Omega_{FS}$  de uma superfície  $S$  em relação ao ponto  $F$ , situado sobre a superfície de partida.

## 2.2.2 Modelagem das reflexões e das superfícies

Na versão modificada do método de transição de energia, cada superfície de contorno é subdividida em elementos triangulares (Fig. 2.5) — em número necessário à precisão requerida — para que, dessa maneira, as sub-superfícies fiquem pequenas e o cálculo dos ângulos sólidos seja feito com precisão. Em seguida, é processada a influência de cada

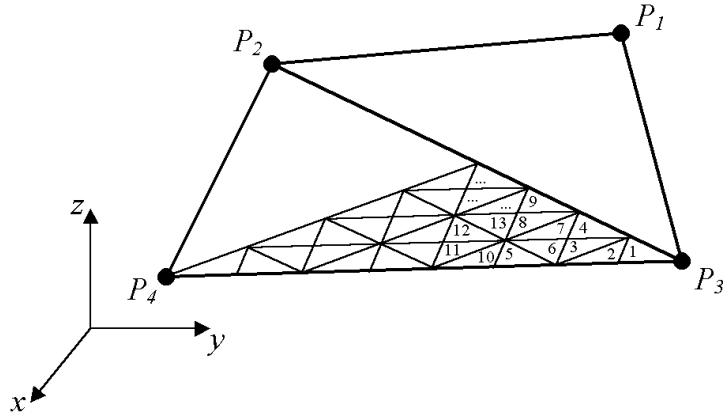


Figura 2.5: Subdivisão das superfícies em elementos triangulares.

elemento sobre os restantes. Cada elemento irradia a energia recebida desde o seu centro geométrico até todos os elementos visíveis da sala. A parcela de energia transmitida,  $\Psi_{ij}$  de um elemento  $i$  até um elemento  $j$  é dada por

$$\Psi_{ij} = (1 - \alpha_i) \frac{\Omega_{ij}}{\pi} \text{sen} \beta e^{-\gamma d_{ij}}, \quad (2.10)$$

onde  $\Omega_{ij}$  é o ângulo sólido do elemento de superfície  $j$  relativo ao elemento de superfície  $i$ ;  $\beta$  é o ângulo de elevação do elemento  $j$  relativo ao elemento de superfície  $i$ ; e  $d_{ij}$  é a distância entre elementos (Fig. 2.6).

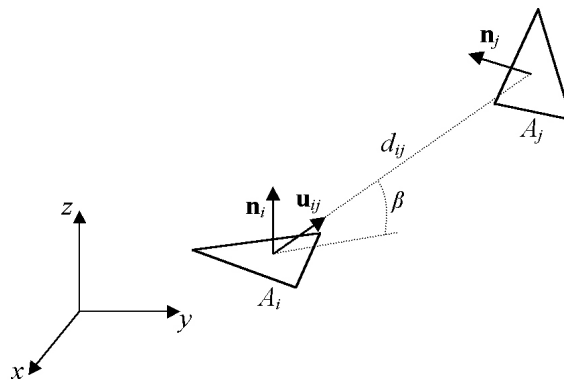


Figura 2.6: Transição de energia desde un elemento  $i$  até um elemento  $j$ .

### 2.2.3 Modelagem da recepção

Durante o processo de intercâmbio de energia entre os elementos triangulares das superfícies de contorno da sala, ocorre também a troca de energia entre cada elemento triangular e o receptor, caso este último seja visível ao primeiro. A soma de todas as quantidades de energia emitidas ao receptor  $R$  permite calcular a intensidade  $I_R$  mediante a expressão

$$I_R((k+1)\tau) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{E_{k_i}}{\pi d_{iR}^2} \text{sen}\beta \right), \quad (2.11)$$

onde  $n$  é o número total de elementos triangulares,  $E_{k_i}$  é a energia sonora associada ao elemento  $i$  após a  $k$ -ésima transição e  $d_{iR}$  é a distância entre o centro geométrico do elemento  $i$  e o receptor  $R$ . É considerado um tempo médio de percurso da energia entre cada elemento até o receptor de  $\tau/2$ .

### 2.2.4 Distribuição inicial da energia nas superfícies

Como foi apontado na Seção 2.1.2, o método de traçado de raios é utilizado para fornecer a distribuição inicial da energia difusa. Tal energia é armazenada numa matriz  $\mathbf{E}_D$  de dimensão  $n \times m$ ,

$$\mathbf{E}_D = \begin{pmatrix} E_{1,1} & E_{1,2} & E_{1,3} & \dots & E_{1,m-2} & E_{1,m-1} & E_{1,m} \\ E_{2,1} & E_{2,2} & E_{2,3} & \dots & E_{2,m-2} & E_{2,m-1} & E_{2,m} \\ E_{3,1} & E_{3,2} & E_{3,3} & \dots & E_{3,m-2} & E_{3,m-1} & E_{3,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{n-2,1} & E_{n-2,2} & E_{n-2,3} & \dots & E_{n-2,m-2} & E_{n-2,m-1} & E_{n-2,m} \\ E_{n-1,1} & E_{n-1,2} & E_{n-1,3} & \dots & E_{n-1,m-2} & E_{n-1,m-1} & E_{n-1,m} \\ E_{n,1} & E_{n,2} & E_{n,3} & \dots & E_{n,m-2} & E_{n,m-1} & E_{n,m} \end{pmatrix}, \quad (2.12)$$

onde  $n$  é o número de todos os elementos triangulares das superfícies de contorno da sala e  $m$  é um número inteiro igual ao tempo de reverberação aproximado,  $T_{60}$ , previamente estimado em milisegundos. Para cada reflexão especular, o valor correspondente na matriz é atualizado. No final do processamento especular, a matriz  $\mathbf{E}_D$  será uma representação espaço-temporal da distribuição da energia contida nas superfícies. Posteriormente, essa matriz refletirá a energia às outras superfícies em forma de energia difusa.

## 2.2.5 Processamento das reflexões difusas

Utilizando a matriz  $\mathbf{E}_D$ , obtida na etapa anterior e que contém a energia inicial a ser refletida difusamente, começa então o cômputo das transições de energia. Inicialmente, a energia é emitida desde todos os elementos que estejam na primeira coluna da matriz ( $t = 1$  milissegundo) para todos os elementos visíveis dentro da sala. Entende-se como elemento visível, aquele que tem um ângulo sólido positivo com relação ao primeiro elemento, de acordo com a Eq. 2.10. Dado que a matriz  $\mathbf{E}_D$  está organizada de maneira que cada coluna representa um passo na discretização do tempo (1 milissegundo), a energia de cada elemento vai se propagar à direita, de acordo como o tempo de propagação entre os elementos da sala, como ilustra a Fig. 2.7.

$$\mathbf{E}_D = \begin{pmatrix} 0 & E_{1,2} & E_{1,3} & E_{1,4} & E_{1,5} & E_{1,6} & \dots \\ 0 & E_{2,2} & E_{2,3} & E_{2,4} & E_{2,5} & E_{2,6} & \dots \\ E_{3,1} & E_{3,2} & E_{3,3} & E_{3,4} & E_{3,5} & E_{3,6} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ E_{n-2,1} & E_{n-2,2} & E_{n-2,3} & E_{n-2,4} & E_{n-2,5} & E_{n-2,6} & \dots \\ E_{n-1,1} & E_{n-1,2} & E_{n-1,3} & E_{n-1,4} & E_{n-1,5} & E_{n-1,6} & \dots \\ E_{n,1} & E_{n,2} & E_{n,3} & E_{n,4} & E_{n,5} & E_{n,6} & \dots \end{pmatrix}$$

Figura 2.7: Transição de energia na matriz  $\mathbf{E}_D$ .

O processo se repete iterativamente para cada discretização do tempo até chegar ao tempo  $t = T_{60}$  usado a seguinte relação recursiva

$$E_{j,t+\tau} \leftarrow E_{j,t+\tau} + E_{i,t} \cdot \Psi_{ij}, \text{ para } i = 1, 2, \dots \quad (2.13)$$

onde  $\Psi_{ij}$  é a parcela de energia transmitida, obtida com a Eq. 2.10. É evidente que a transição de cada elemento até o receptor tem que também ser computada para cada discretização do tempo, sempre que o receptor seja visível desde a posição do elemento que está sendo considerado, o que é dado por

$$I_R(t+t') = \frac{E_{i,t}}{\pi d_{iR}^2} \text{sen} \beta, \quad (2.14)$$

onde  $I_R(t+t')$  é a intensidade no receptor no instante  $t+t'$ , com  $t' = d_{iR}/c$ , sendo  $c$  a velocidade de propagação do som e  $d_{iR}$  a distancia entre o centro geométrico do elemento  $i$  e o centro do receptor.

## 2.3 O Método Híbrido

Complementando o que foi estabelecido no início deste capítulo, o método de traçado de raios é muito preciso para calcular as primeiras reflexões (VORLÄNDER, 1989), porém, não fornece uma boa aproximação para a cauda reverberante e os resultados ficam comprometidos se a sala for altamente difusiva (SUH; NELSON, 1999). Por outro lado, o método de transição de energia, devido à sua capacidade de representar as reflexões difusas, fornece boas simulações do campo acústico em salas mediana a altamente difusivas, sendo eficiente para gerar uma boa representação da cauda reverberante. A precisão de cada método varia em sentido oposto com respeito ao valor do coeficiente médio de difusão da sala em questão,  $\bar{\delta}$ , como mostra a Fig. 2.8.

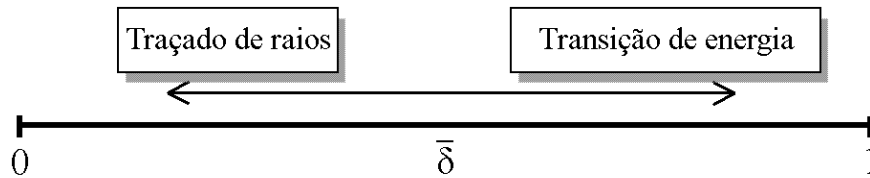


Figura 2.8: Dependência da precisão dos métodos como função do coeficiente médio de difusão.

O método híbrido, implementado no *RAIOS*, combina as melhores características de cada um dos dois métodos fornecendo uma resposta impulsiva quadrática híbrida. Ela é obtida mediante a soma da resposta impulsiva quadrática especular (traçado de raios) com a resposta impulsiva quadrática difusa (transição de energia). As Figs. 2.9, 2.10 e 2.11 mostram, respectivamente, as respostas computadas pelo método de traçado de raios, da transição de energia e a soma de ambas.

Cabe apontar que, embora as escalas das Figs. 2.9 e 2.10 mostrem que a energia especular é de 10 a 20 vezes maior que a energia difusa, existe uma diferença considerável entre a  $RIQ_E$  e a  $RIQ_H$ .

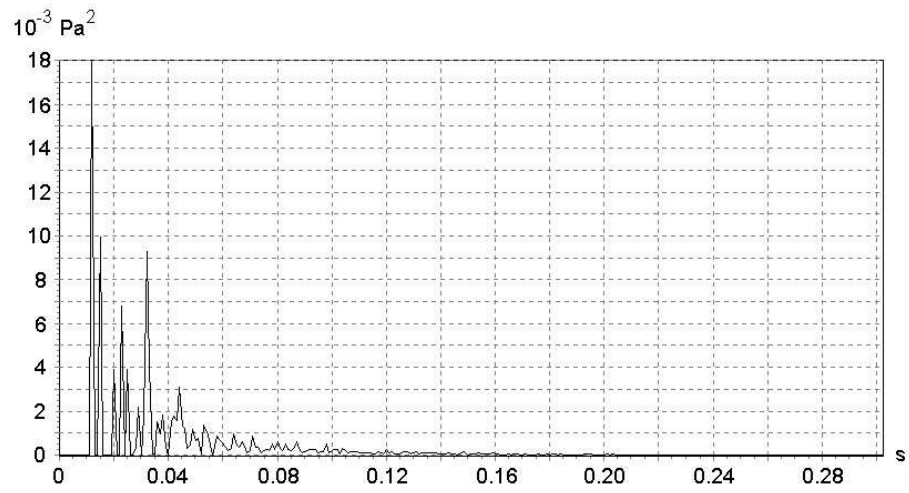


Figura 2.9: Resposta Impulsiva Quadrática Especular ( $RIQ_E$ ).

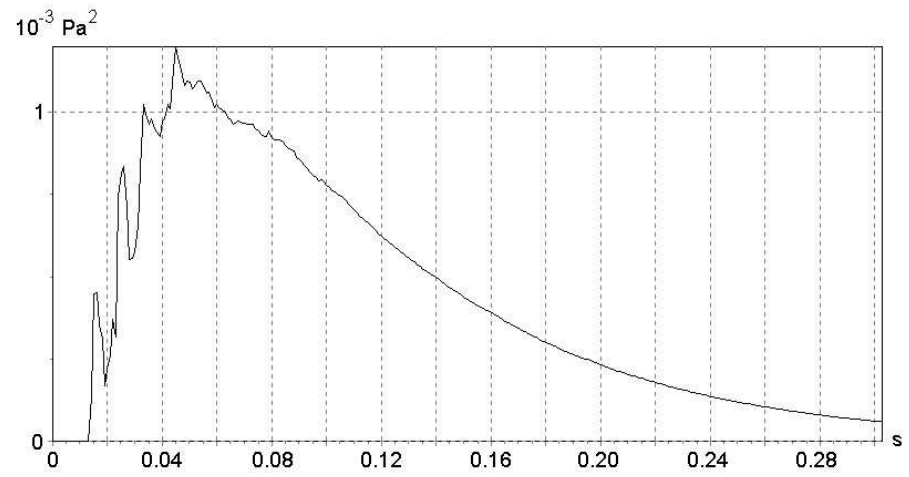


Figura 2.10: Resposta Impulsiva Quadrática Difusa ( $RIQ_D$ ).

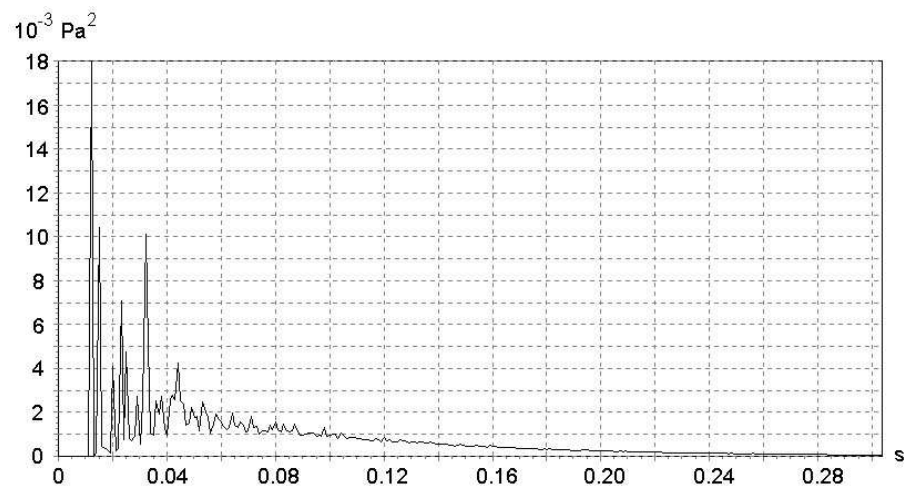


Figura 2.11: Resposta Impulsiva Quadrática Híbrida ( $RIQ_H = RIQ_E + RIQ_D$ ).



## 3 IMPORTAÇÃO DE DADOS A PARTIR DE ARQUIVOS *DXF*

Mesmo não sendo sua principal função, o código computacional *RAIOS* possui uma interface para edição geométrica de salas. Tal interface apresenta alguns aspectos que fazem com que a aplicação não possa ser utilizada rapidamente para diversos casos de estudo. Um dos motivos é o software ser um simulador acústico e não um modelador geométrico, tal como AutoCAD, Sketch-up, etc, que dispõem de ferramentas especificamente desenvolvidas para essa tipo de modelagem e que não fazem parte do escopo de um programa de simulação acústica.

### 3.1 O padrão *DXF* para importação de informação

Dada a existência de programas de CAD com anos no mercado, qualquer solução implementada no software *RAIOS* que tente emular as características dessas ferramentas, não só seria muito trabalhosa, mas também inferior. Assim, optou-se por desenvolver uma ferramenta de importação dos dados geométricos para o *RAIOS* a partir de um arquivo externo gerado por um programa de desenho 3-D, como o *AutoCAD*. Além disso, a maioria das salas, para as quais se deseja obter a simulação do campo acústico, é constituída de salas ainda em projeto, ou seja, disponíveis em arquivos *AutoCAD*.

O arquivo de dados formatados no padrão *DXF* (Data eXchange Format), criado pela *AutoDesk* para o intercâmbio de informação entre o *AutoCAD* e outros programas similares, se adapta perfeitamente às necessidades deste trabalho, dado que na atualidade esse padrão tornou-se universal para todos os programas de CAD e áreas relacionadas.

#### 3.1.1 A Entidade *POLYLINE*

O formato *DXF* constitui-se na *representação etiquetada* de toda a informação contida em um arquivo gráfico do software *AutoCAD*. Representação etiquetada significa que

cada elemento no arquivo está precedido por um valor inteiro que é chamado *código de grupo*. O valor do código de grupo permite identificar o tipo de objeto que vem a seguir e, uma vez dentro da seção do mesmo, o valor também serve para especificar o significado de cada um dos dados do dito objeto. No fragmento de um arquivo *DXF*, apresentado na Tab. 3.1, pode-se notar como os códigos de grupo das coordenadas (10, 20 e 30) não só precedem o valor, mas também indicam que significado têm para a subclasse “*AcDb3dPolylineVertex*”. Virtualmente, toda informação especificada pelo usuário pode ser representada em formato *DXF* (AUTODESK, 2006).

Tabela 3.1: Fragmento de um arquivo *DXF* com seu significado.

Fragmento do arquivo <i>DXF</i>	Significado
100	Indica que na continuação vem um marcador de subclasse.
<i>AcDbVertex</i>	Palavra reservada para subclasse.
100	Indica que na continuação vem um marcador de subclasse.
<i>AcDb3dPolylineVertex</i>	Palavra reservada para subclasse.
10	Indica que na continuação vem a coordenada em x.
15.1128	Coordenada do vértice em x.
20	Indica que na continuação vem a coordenada em y.
13.1128	Coordenada do vértice em y.
30	Indica que na continuação vem a coordenada em z.
7.11283	Coordenada do vértice em z.

Os objetos que têm representação gráfica dentro de um arquivo *DXF* são chamados de *entidades*. Dentre estas, existe uma de particular interesse para este trabalho, denominada *POLYLINE*. Devido às características dessa entidade, é possível representar com ela qualquer superfície plana. A entidade possui informação detalhada de cada um de seus vértices, além de poder ser uma linha fechada (iniciando e terminando no mesmo vértice). No caso particular de *3dPolyline*, que é uma subclasse de *POLYLINE*, a entidade pode ser construída em qualquer posição em um sistema de coordenadas cartesianas. Finalmente, os dados de posição dos seus vértices permitem que, assim que terminado o processo de importação, seja feita qualquer operação com a entidade no programa de destino (por exemplo, o cálculo, no programa *RAIOS*, do vetor normal à superfície).

### 3.1.2 Busca de uma *POLYLINE* dentro de um arquivo *DXF*

Para fazer uma procura dentro de um arquivo *DXF* existem *palavras reservadas* que permitem identificar os diversos objetos e entidades existentes. Essas palavras também

permitem encontrar, dentro de uma determinada seção, informação relevante de uma entidade. Para o caso de uma importação de dados, são apresentadas na Tab. 3.2 as palavras reservadas para uma *POLYLINE*.

Tabela 3.2: Palavras reservadas para identificar uma *POLYLINE* e seus elementos.

Palavras Reservadas	Significado
<i>POLYLINE</i>	Início da seção de <i>POLYLINE</i> .
<i>AcDbEntity</i>	<i>Layer</i> (Camada) relacionada a um objeto.
<i>AcDb3dPolyline</i>	Início de uma <i>3dPolyline</i> .
<i>VERTEX</i>	Início da seção de vértices.
<i>AcDb3dPolylineVertex</i>	Início da seção de coordenadas do vértice.

### 3.1.3 *3dPolyline* em *AutoCAD*

Dentro do *AutoCAD*, o controle do objeto *3dPolyline* pode ser alcançado através do menu *Draw*, como indica a Fig. 3.1. Com essa ferramenta podemos desenhar qualquer figura

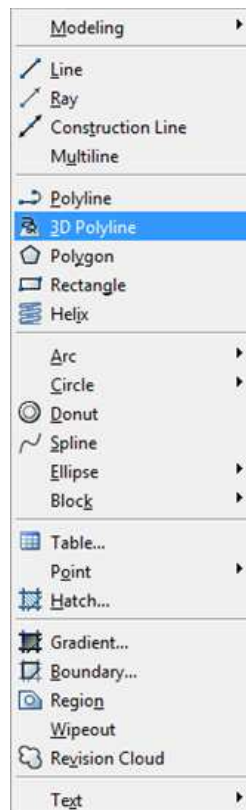


Figura 3.1: Menu *Draw* do *AutoCAD*.

no software *AutoCAD*. Contudo, no caso em que o objetivo seja representar as superfícies planas de contorno de uma sala no *RAIOS*, deve-se levar em conta as seguintes restrições:

1. Todos os vértices devem ser coplanares;
2. Deve-se desenhar uma linha fechada, utilizando no final o comando *Close*;
3. Para o correto funcionamento do processo de importação, deve-se considerar as limitações do programa destino, portanto, o número de vértices deve estar limitado a 200 (número máximo de pontos que uma superfície plana pode ter no *RAIOS*);
4. A unidade de comprimento utilizada deve ser o metro;
5. Os vértices devem ser definidos no sentido anti-horário (Fig. 3.2), dependendo do lado da superfície plana que será utilizado para a simulação acústica (na realidade esta não é uma limitação: a finalidade da mesma é poder, antecipadamente, decidir a direção do vetor normal ao plano, utilizando a regra da mão direita implementada em uma rotina explicada mais adiante).

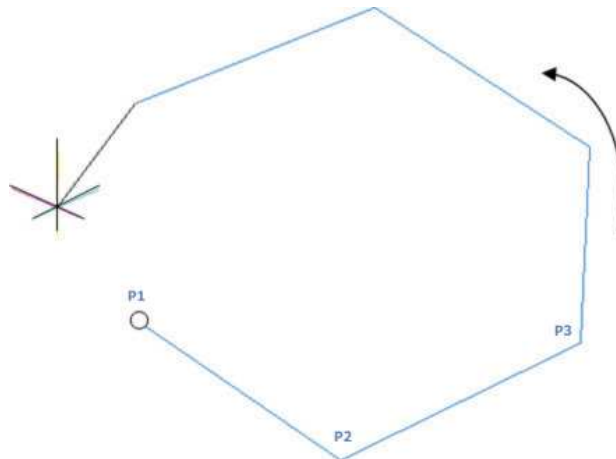


Figura 3.2: Traçado de uma *3dPolyline* no sentido anti-horário.

## 3.2 Cálculo do vetor normal

Uma das questões essenciais na modelagem computacional de acústica de salas diz respeito aos sentidos das normais das superfícies de contorno da sala. Para que o programa de simulação funcione adequadamente é absolutamente necessário que todas as normais apontem para o interior da sala. Isso está garantido pelo procedimento indicado no item 5 da Seção anterior.

O cálculo do vetor normal à superfície plana é feito a partir dos seus três primeiros pontos ou vértices ( $p_1, p_2, p_3$ ). Com esses pontos, são calculados dois vetores  $\mathbf{v}_A$  e  $\mathbf{v}_B$  que são respectivamente paralelos aos segmentos de reta definidos por  $\overline{p_2p_3}$  e  $\overline{p_1p_2}$ .

O vetor  $\mathbf{v}_A$  pode ser definido através dos seus componentes no sistema de eixos cartesianos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , como:

$$\mathbf{v}_A = (\mathbf{v}_{Ax}, \mathbf{v}_{Ay}, \mathbf{v}_{Az}). \quad (3.1)$$

Logo, se esse vetor é paralelo a um segmento de reta  $\overline{p_2p_3}$ , então seus componentes nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  serão iguais a:

$$\mathbf{v}_{Ax} = p_{3x} - p_{2x}; \quad (3.2)$$

$$\mathbf{v}_{Ay} = p_{3y} - p_{2y}; \quad (3.3)$$

$$\mathbf{v}_{Az} = p_{3z} - p_{2z}, \quad (3.4)$$

onde  $p_{3x}$  e  $p_{2x}$  são as coordenadas cartesianas em  $x$  e, analogamente, para as direções  $y$  e  $z$ . Semelhante procedimento é feito para determinar o vetor  $\mathbf{v}_B$  paralelo ao segmento  $\overline{p_1p_2}$ .

Uma vez calculados os vetores paralelos, obtém-se o produto vetorial entre eles para determinar um vetor ortogonal ao plano, na forma convencional

$$\mathbf{v}_A \times \mathbf{v}_B = ((\mathbf{v}_{Ay} \cdot \mathbf{v}_{Bz} - \mathbf{v}_{Az} \cdot \mathbf{v}_{By}), (\mathbf{v}_{Az} \cdot \mathbf{v}_{Bx} - \mathbf{v}_{Ax} \cdot \mathbf{v}_{Bz}), (\mathbf{v}_{Ax} \cdot \mathbf{v}_{By} - \mathbf{v}_{Ay} \cdot \mathbf{v}_{Bx})). \quad (3.5)$$

Finalmente, o vetor ortogonal encontrado mediante a Eq. 3.5 é normalizado para se obter o vetor unitário normal à superfície, ou seja,

$$\mathbf{v}_{NS} = \frac{\mathbf{v}_A \times \mathbf{v}_B}{|\mathbf{v}_A \times \mathbf{v}_B|}. \quad (3.6)$$

A Fig. 3.3 ilustra o procedimento do cálculo do vetor normal a uma superfície, nesse caso um triângulo.

### 3.3 Comparação com o processo anterior

No *RAIOS*, para criar uma superfície era necessário ingressar manualmente as três coordenadas de cada vértice do plano, através dos controles mostrados na Fig. 3.4. Levando em consideração que o *RAIOS* não possui uma janela de verificação para conferir as coordenadas de um ponto, uma vez que este fosse ingressado, o usuário estava obrigado a construir, em separado, um registro das coordenadas de cada ponto do plano. Portanto, a criação de uma sala era dificultada tanto pelos primitivos controles do programa como

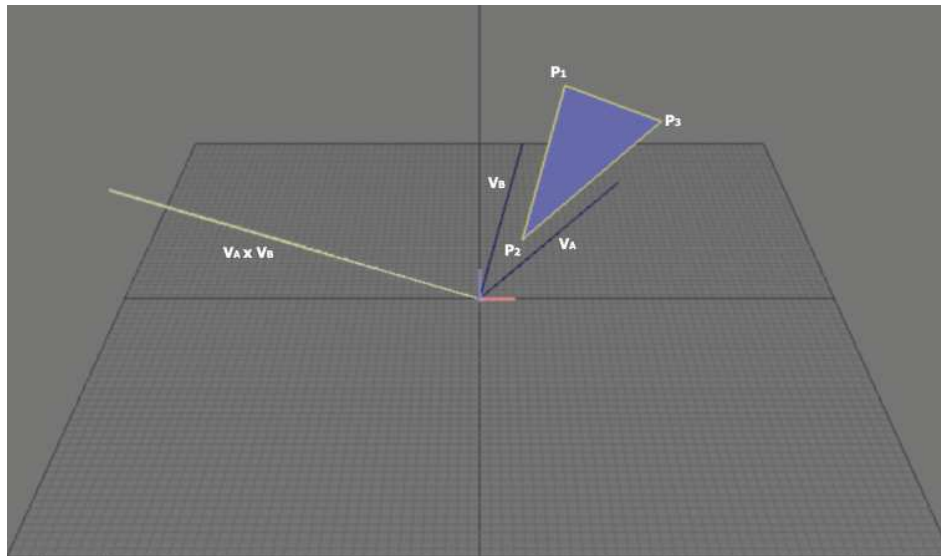


Figura 3.3: Superfície plana com os dois vetores paralelos a dois dos seus lados e o vetor ortogonal ao plano, resultado do produto vetorial entre os dois.

também pela constante verificação no registro criado pelo usuário, principalmente no caso em que duas superfícies possuam vértices comuns.

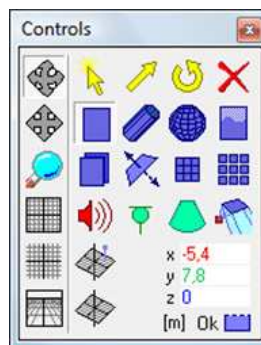


Figura 3.4: Janela de controle no *RAIOS*: ingresso de um vértice de uma superfície plana.

No *AutoCAD*, na construção de qualquer figura plana, as coordenadas de cada vértice são imediatamente identificáveis (e alteráveis, se necessário) no programa, bastando um simples clique de mouse sobre o ponto desejado, fazendo com que seja desnecessário ter um registro em separado. Além do mais, é fácil tomar um vértice de uma superfície já criada para utilizá-lo como parte integrante de outro plano, resolvendo rapidamente a questão de superfícies com vértices comuns.

## 4 INCLUSÃO DE NOVOS PARÂMETROS

Os aspectos psicoacústicos na assim chamada *acústica de salas* constituem um problema bastante complexo, principalmente porque as impressões subjetivas dos ouvintes são influenciadas por diversos fatores, muitos dos quais não-acústicos. Contudo, existe um conjunto de parâmetros de qualidade acústica que estão baseados numa formulação matemática bem estabelecida (ISO3382, 1997), o que dá um enfoque objetivo. A maioria desses parâmetros é formulada a partir da resposta impulsiva quadrática (*RIQ*), captada por um receptor posicionado num determinado ponto da sala. A partir da *RIQ*, obtém-se a curva de decaimento (*CD*) que expressa o nível de pressão sonora vs. tempo, em decibels. A *CD* também é utilizada para o cálculo de alguns dos parâmetros, como o  $T_{30}$ . Inclusive, é possível obter, a partir da *CD*, o nível de pressão sonora (*NPS*) em regime permanente para um par fonte–receptor, como será discutido adiante.

### 4.1 Inclusão de parâmetros de qualidade acústica

O código computacional *RAIOS*, antes deste trabalho, já calculava uma série de parâmetros de qualidade acústica, quais sejam,  $T_{30}$  (tempo de reverberação), *EDT* (tempo de decaimento inicial),  $D_{50}$  (definição a 50 ms),  $C_{80}$  (clareza a 80 ms), *TS* (tempo central), *G* (fator de ganho), *LF* (fração de energia lateral) e *LFC* (cosseno da fração de energia lateral). Os novos parâmetros implementados são o  $D_{80}$  (definição a 80 ms),  $C_{50}$  (clareza a 50 ms), *LG* (ganho lateral) e *ST1* (fator de suporte) (BERANEK, 1996; VORLÄNDER, 2008; SABINE, 1932).

#### 4.1.1 Definição a 80 ms, $D_{80}$

O parâmetro definição, *D*, é a razão entre duas integrais temporais da pressão sonora quadrática. A primeira definida desde a chegada do som direto ( $t = 0$ ) até transcorridos 50 ms e a segunda também definida desde a chegada do som direto até o “infinito”. Esse

parâmetro permite conhecer qual é o peso energético dos primeiros 50 ms em relação ao peso energético total da *RIQ*. É assumido que dentro dos primeiros 50 ms, depois da chegada do som direto, aparecerá a parcela das primeiras reflexões que são particularmente importantes para a inteligibilidade da palavra (VORLÄNDER, 2008). Ao se falar do peso energético dos primeiros 80 ms, se dá atenção à impressão de transparência em peças musicais rápidas, onde se precisa reconhecer detalhes musicais por trás da *cortina* de reverberação. Logo o fator  $D_{80}$ , definido pela Eq. 4.1, é utilizado para conhecer qual é a definição musical de uma sala.

$$D_{80} = \frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \times 100\%. \quad (4.1)$$

Cabe apontar que o parâmetro em questão, embora expresso em percentual, guarda uma forte correlação com o  $C_{80}$ , expresso em decibels. Esta relação é definida por

$$D_{80} = \frac{10^{(20+C_{80})/10}}{1 + 10^{C_{80}/10}}. \quad (4.2)$$

#### 4.1.2 Clareza a 50 ms, $C_{50}$

O fator de clareza  $C$  expressa, em decibels, a razão entre a energia inicial e a energia reverberante (BERANEK, 1996). A energia inicial é considerada desde a chegada do som direto até 50 ms (para a inteligibilidade da palavra) ou 80 ms (para a impressão de transparência em peças musicais). O fator de clareza  $C_{50}$  é definido por

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt}. \quad (4.3)$$

Analogamente, como foi apontado para os parâmetros  $D_{80}$  e  $C_{80}$ , o fator de clareza  $C_{50}$  é uma expressão correlacionada ao parâmetro  $D_{50}$ , estando relacionados pela equação

$$C_{50} = 10 \log \frac{D_{50}}{100\% - D_{50}}. \quad (4.4)$$

#### 4.1.3 Ganho lateral, $LG$

Uma dimensão de impressão espacial é o envolvimento do ouvinte (listener envelopment - LEV). Ele é causado pelas reflexões laterais tardias (VORLÄNDER, 2008). A impressão



de envolvimento está descrita pelo parâmetro de ganho lateral,  $LG$ ,

$$LG = 10 \log \frac{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p_8^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt}, \quad (4.5)$$

onde  $p_8$  representa a pressão sonora da resposta impulsiva obtida usando um arranjo de microfones com padrão de diretividade em forma de 8 (Microfone Figura 8 - MF8) orientado no eixo horizontal que atravessa os ouvidos do ouvinte. O  $p_{10}$  é a pressão sonora captada em campo livre a uma distancia de 10 metros. Os MF8's captam o som igualmente no eixo da cápsula ( $0^\circ$  e  $180^\circ$ ), rejeitando o som que chega a  $90^\circ$  e a  $270^\circ$ , como ilustrado na Fig. 4.1.

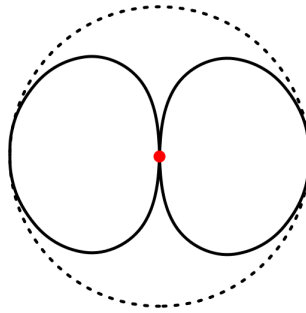


Figura 4.1: Padrão de captação de um MF8.

Para representar tal padrão de captação computacionalmente,  $p_8^2(t)$  pode ser escrito como  $(p \cos \vartheta)^2(t)$  (VORLÄNDER, 2008), onde  $\vartheta$  é o ângulo de incidência das reflexões laterais (Fig. 4.2)

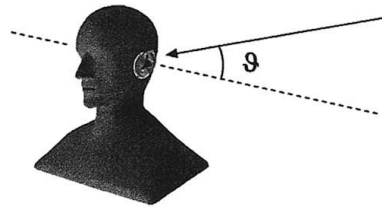


Figura 4.2: Incidência sonora das reflexões laterais.

#### 4.1.4 Fator de suporte, $ST1$

O *Suporte do Palco* é um atributo acústico para salas de concerto e é mensurado pelo fator de suporte ou  $ST1$ . Esse parâmetro se presta para verificar as condições de conjunto e balanço entre setores da orquestra. O fator de suporte, expresso em dB, é uma média

especial da razão entre a energia sonora impulsiva de uma fonte sonora onidirecional que chega ao músico, distanciada de 1 m da fonte, nos primeiros 10 ms, e aquela que chega no intervalo entre 20 ms e 100 ms no mesmo ponto (BERANEK, 1996). O  $ST1$  é dado por

$$ST1 = 10 \log \frac{\int_{20\text{ms}}^{100\text{ms}} p_8^2(t) dt}{\int_0^{10\text{ms}} p^2(t) dt}. \quad (4.6)$$

## 4.2 Cálculo do nível de pressão sonora

A medida mais usual, quando se trata da *amplitude* da onda sonora é o  $NPS$ . Esse nível é expresso em escala logarítmica como a razão entre a pressão media quadrática e o quadrado da pressão de referência, da seguinte maneira:

$$NPS = 10 \log \frac{\bar{p}^2}{p_r^2}, \quad (4.7)$$

onde a pressão de referência, internacionalmente adotada em acústica, é  $p_r = 2 \times 10^{-5} \text{Pa}$ . Esse nível é, portanto, relativo, expressando uma razão entre energias, e medido adimensionalmente em dB (deciBel).

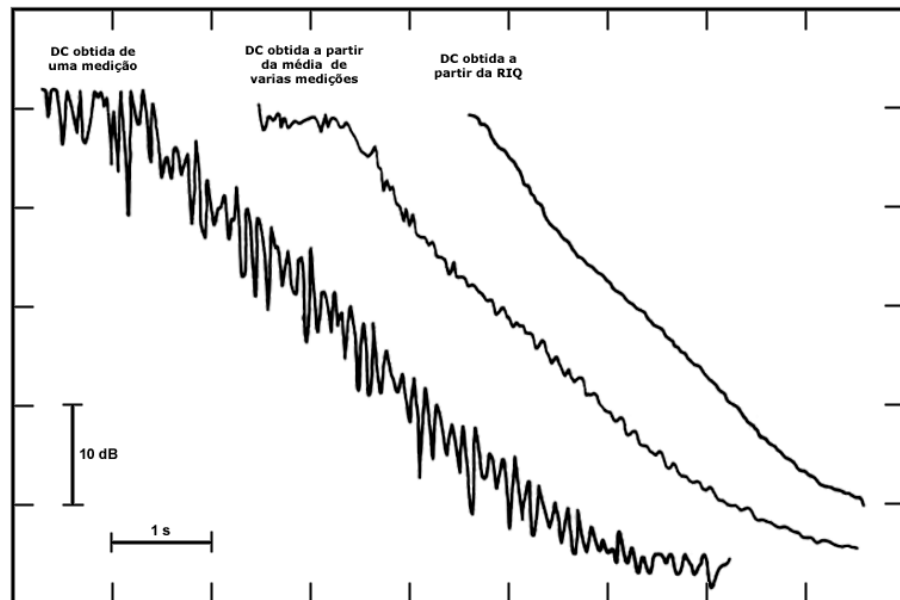


Figura 4.3: Três exemplos de  $CD$  (CHU, 1978).

Quando uma fonte sonora emite um ruído branco em regime permanente em uma sala sem ruído de fundo, o valor do  $NPS$  captado em um receptor aumenta durante um curto intervalo de tempo até o campo sonoro alcançar uma distribuição espaço-temporal

estacionária. Uma vez nesse estado estacionário, para determinar o tempo de reverberação da sala ( $T_{60}$ ) a fonte era desligada e o decaimento do  $NPS$  era medido. O  $T_{60}$  é o tempo necessário para o  $NPS$  decair 60 dB. Devido às oscilações aleatórias presentes no ruído branco era necessário fazer um conjunto grande de medições. O número de medições devia ser considerável para poder determinar uma adequada média que representaria a curva de decaimento.

Schroeder (1965) demonstrou matematicamente que com apenas uma medição, depois de excitar a sala com um impulso unitário,  $\delta(t)$ , e captar a  $RIQ$ , era possível obter a mesma curva de decaimento que se obteria com infinitos ensaios com ruído branco (ver Fig. 4.3). Pode-se, então, concluir que o primeiro valor da  $CD$ , obtida a partir da  $RIQ$ , vai corresponder ao valor do  $NPS$ , captado por um receptor determinado, quando o campo sonoro alcança o estado estacionário, depois que a sala é submetida a um ruído branco emitido por uma fonte sonora em regime permanente.

Contudo, devido ao fato de que o código computacional  $RAIOS$  calcula as curvas de decaimento por banda de oitava, foi preciso unificar aqueles valores para obter o nível global,  $NPS_G$ , da seguinte maneira

$$NPS_G = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{NPS_i}{10}}, \quad (4.8)$$

onde  $n$  é o número de bandas de oitava em consideração, e  $NPS_i$  é o nível de pressão sonora na banda  $i$ .

O resultado do cálculo do  $NPS$  no  $RAIOS$  é apresentado por banda de oitava, assim como no nível global.

### 4.2.1 Audibilidade

Existe uma característica de percepção subjetiva humana do som que é função da intensidade sonora e da frequência. Ela é chamada de *audibilidade* (ou volume sonoro). Na Fig. 4.4 é possível observar como um tom puro, com uma intensidade de 20 dB e uma frequência de 1 kHz é perfeitamente audível. Por outro lado, outro tom, da mesma intensidade, mas com uma frequência de 100 Hz não poderia ser ouvido, devido ao fato de ficar abaixo do limiar da audição (GINN, 1978).

Devido ao comportamento não linear do ouvido humano, as impressões subjetivas auditivas não podem ser modeladas adequadamente por um sistema de técnicas lineares. Por isso, foram desenvolvidos filtros de ponderação (ver Fig. 4.5) com base na resposta em

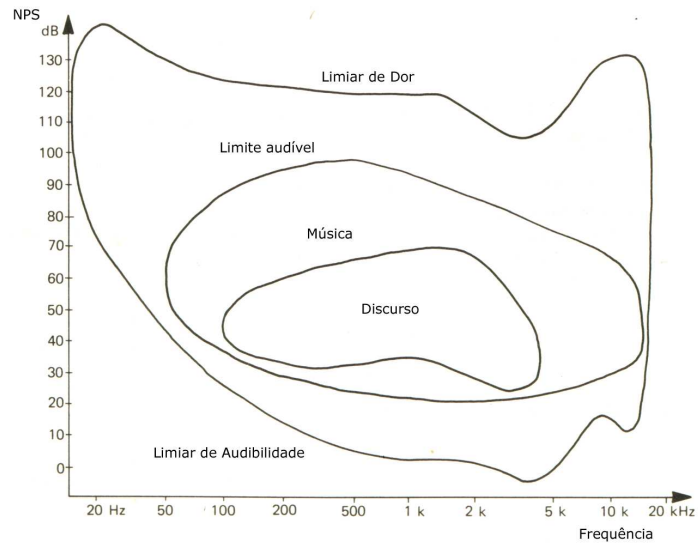


Figura 4.4: Limite de audibilidade definido pelo *NPS* e a frequência (GINN, 1978).

frequência do ouvido humano. Na prática, dependendo do volume sonoro (ver Tab 4.1), é suficiente trabalhar com uns poucos filtros fixos por banda de oitava.

Tabela 4.1: Utilização dos filtros de ponderação (GINN, 1978).

Filtro de ponderação	Utilização
A	Volume sonoro baixo (20 dB até 55 dB)
B	Volume sonoro médio (55 dB até 85 dB)
C	Volume sonoro alto (85 dB até 140 dB)
D	Volume sonoro alto de alta frequência

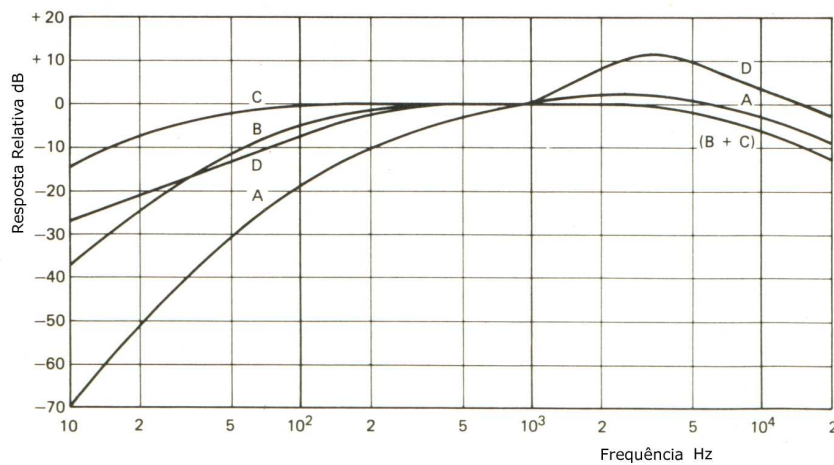


Figura 4.5: Representação gráfica das curvas de ponderação A, B, C e D.

Para obter o  $NPS$  global ponderado por alguma das curvas,  $NPS_{GP}$ , basta somar um valor de ponderação determinado ao nível de pressão sonora por banda de oitava,  $NPS_i$ , da seguinte maneira

$$NPS_{GP} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{NPS_i + VP_i}{10}}, \quad (4.9)$$

onde  $VP_i$  representa o valor de ponderação por banda de oitava. Os valores de  $VP_i$  estão apresentados na Tab. 4.2 (IEC60651, 1979).

Tabela 4.2: Valores de ponderação por banda de oitava (em dB).

Filtro de ponderação	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
A	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0
B	-4,2	-1,3	-0,3	0,0	-0,1	-0,7
C	-0,2	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,8
D	-6,0	-2,0	0,0	0,0	8,0	11,0

Os níveis ponderados também foram incluídos no RAIOS e podem ser observados no nível global ou por banda de oitava.

## 5 EXTENSÃO PARA ACÚSTICA URBANA

O ruído urbano é tema ambiental muito importante, principalmente com o aumento do tráfego de automóveis em grandes cidades. A poluição sonora é um fator relevante em problemas de saúde pública e, por tal motivo, demanda medidas para ser contido e reduzido. Atualmente, a avaliação do ruído numa cidade constitui um passo necessário no planejamento do crescimento urbano. A avaliação pode ser alcançada através da adaptação de um software de simulação acústica, para estimar, por exemplo, o NPS em diferentes lugares do modelo. É necessário tomar especial cuidado com as novas variáveis introduzidas pelo caso em questão. Entre as principais dificuldades está o fato de lidar com combinações de diferentes fontes sonoras, de características estatísticas, que contribuem para o campo acústico.

Recentemente, uma série de estudos, com softwares de predição, têm sido realizados em grandes cidades, especialmente em países europeus onde as políticas ambientais são tomadas em importante consideração e o mapeamento de ruído das grandes cidades ou regiões críticas (como proximidades de aeroportos) tem sido efetuado (BARRIGON et al., 2002; PINTO et al., 2005; SANTOS; VALADO, 2004).

A seguir são apresentados os principais ajustes feitos ao código computacional *RAIOS*, com o objetivo de abordar problemas de propagação em campo aberto e propor um modelo para simular o ruído do tráfego de automóveis.

### 5.1 Principais diferenças entre acústica de interiores e acústica de exteriores

A principal diferença, entre uma simulação acústica de uma sala e de um ambiente de exteriores, está no tipo de fontes sonoras que influenciam o campo acústico. Em um recinto fechado, geralmente, se utilizam fontes pontuais. Já em uma representação de acústica de exteriores, além das fontes sonoras pontuais, existem as do tipo linear e até

as de superfície, podendo elas estar em movimento ou serem estáticas. Outras diferenças se encontram em elementos não presentes em salas como, por exemplo, vegetação, vento, cachoeiras (NARANJO et al., 2009a).

Do ponto de vista de simulação, um ambiente urbano pode ser modelado como um espaço fechado, se às superfícies de contorno, que representam o espaço aberto, forem atribuídas um coeficiente de absorção,  $\alpha$ , igual a 1 (superfície totalmente absorvente). Em geral, um enfoque simplificado, que toma médias para os coeficientes de absorção e difusão para fachadas e pavimento, pode levar a resultados consistentes.

### 5.1.1 Fontes sonoras lineares

Para representar o ruído dos automóveis, foi utilizado o processo padronizado para transformar dados estatísticos do tráfego em uma fonte linear, definida como potência sonora por unidade de comprimento (RLS90, 1990). O nível, definido pela norma RLS90, corresponde ao NPS, em campo livre, de um ponto situado a 25 metros de uma fonte linear infinita. Portanto, é preciso calcular o nível de potência sonora necessário para que a fonte produza a pressão definida no ponto de referência.

A solução que foi proposta no código *RAIOS*, consiste em representar a fonte linear como uma sucessão de fontes pontuais ao longo das linhas de tráfego. Isso foi implementado usando a flexibilidade do procedimento de importação de informação descrito no capítulo 3 da seguinte maneira:

- Foi novamente aproveitada a flexibilidade da entidade *POLYLINE* para definir a reta (ou conjunto de retas interligadas) onde serão distribuídas as fontes sonoras.
- Aproveitando a categorização em *Layers* das entidades em um arquivo *DXF*, utilizou-se o nome do *Layer*, em primeira instância, para diferenciá-la de uma superfície de contorno e depois, também, para definir dois dados importantes das fontes sonoras: o número de fontes que serão distribuídas ao longo da entidade e o nível de potência delas.

Cabe mencionar que a norma RLS90 (1990), considera o espectro de emissão do ruído de tráfego, porém, tal compensação espectral, por ora, não foi implementada no código computacional *RAIOS*. Nos resultados, que serão apresentados no Capítulo 7, foram utilizadas fontes estáticas emitindo ruído branco em regime permanente para o cálculo do *NPS*.

## 6 AURILIZAÇÃO

Com o auxílio da realidade virtual acústica pode-se gerar, em um simulador de campo acústico em salas, a sensação auditiva real que um ouvinte teria em diversos pontos da sala. Essa sensação auditiva não tem nada a ver com sistemas 5.1 e similares, presentes em sistemas de áudio “surround”. Estamos falando de sensações auditivas que efetivamente podem transportar o ouvinte para o interior de uma sala ainda em projeto. Para tal, será necessário gerar a *aurilização*, que é baseada na resposta impulsiva biauricular.

### 6.1 A resposta impulsiva biauricular quadrática

A resposta de um sistema linear, inicialmente em repouso, a um impulso  $\delta(t)$  é conhecido como resposta impulsiva (*RI*). Baseados na operação da convolução, ao conhecer a *RI* de um sistema linear, pode-se determinar sua resposta a qualquer sinal. Contudo, para poder representar a sensação auditiva humana, é necessário fazer-se o produto de convolução das *RIQ* (pressões sonoras quadráticas com suas direções e tempos de chegada), geradas pelo código computacional *RAIOS*, com as respostas impulsivas associadas à cabeça humana (*HRIR - Head Related Impulse Response*). O sinal biauricular obtido, conhecido como Resposta Impulsiva Biauricular Quadrática (*RIBQ*), deve ainda ser convoluído com um sinal anecóico (discurso, canto, música etc.) que se deseja ouvir na sala, de modo a produzir a impressão desejada.

Como foi explicado no Capítulo 2, o código computacional *RAIOS* utiliza um modelo híbrido composto de dois métodos para gerar a *RIQ*. Isso obriga que a obtenção dos dados iniciais, necessários para o cálculo da *RIBQ*, seja feito em duas etapas. A primeira utiliza as vantagens do método de traçado de raios para calcular a influência do som direto e das primeiras reflexões e a segunda tem como base o método de transição de energia para modelar a parte difusa ainda nas primeiras reflexões e a cauda reverberante (ver Fig. 6.1).

Depois, utilizando a modelagem das *HRTF*'s (*HRIR*'s expressas no domínio da



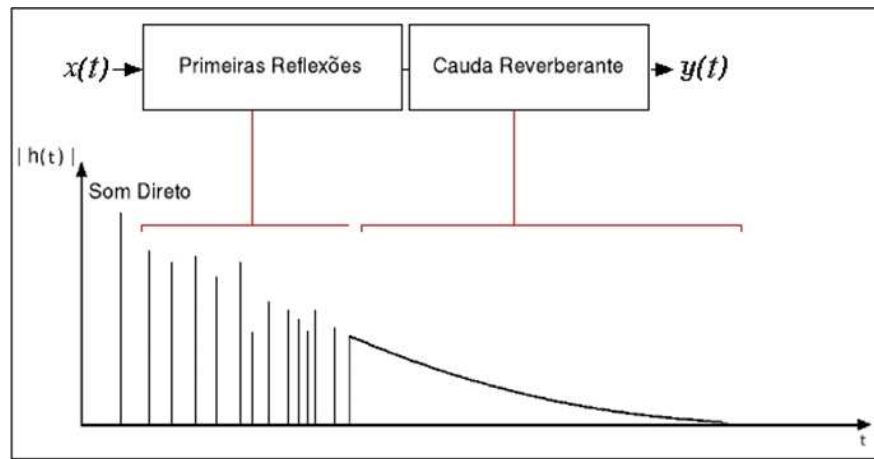


Figura 6.1: Resposta impulsiva de uma sala (esquemática).

frequência) formulado por Torres et al. (2002), se inicia o processo de convolução, primeiro com os dados iniciais e finalmente com o sinal anecóico.

### 6.1.1 Parte especular da *RIBQ*

Considerando um par fonte-receptor e aplicando os pressupostos da acústica geométrica (KUTTRUFF, 2000), a modelagem da parte especular da onda sonora admite vários raios acústicos retilíneos partindo onidirecionalmente da fonte sonora. Depois de colidir com as superfícies de contorno da sala, uma parte desses raios alcança o receptor, carregando a informação do tempo e direção de chegada, bem como de seu espectro, depois de ser afetado pelos efeitos de dissipação pela viscosidade do ar e pelos fenômenos de absorção, reflexão especular e reflexão difusa. Logicamente, a quantidade de raios que chegam ao receptor será inferior à quantidade de raios que são emitidos pela fonte, sendo relativamente simples armazenar a informação que posteriormente será utilizada para criar a *RIBQ* (TENENBAUM et al., 2006a).

### 6.1.2 Parte difusa da *RIBQ*

No caso da parte difusa, o método de transição de energia implementado no código computacional *RAIOS*, como foi explicado no Capítulo 2, cria uma matriz na qual é armazenada, para cada superfície de contorno, a parcela de energia que será refletida difusamente, assim como o seu tempo de chegada. Depois, se transmite a energia a todos os elementos visíveis pelo ângulo sólido formado entre estes e a superfície de partida. Nesse caso, logicamente, pelo tratamento individual que deve receber cada dado, vai se criar um problema quanto

à quantidade de informação a ser processada. Por exemplo, supondo uma discretização do tempo de 1 ms, e assumindo que  $200 \times 10^3$  raios partem da fonte, levando consigo informação energética por banda de oitava e que cada raio será refletido cerca de 50 vezes, em média, em três segundos de simulação vai se ter uma quantidade aproximada de  $2,4 \times 10^{11}$  cargas de energia difusa distribuída nas superfícies de contorno da sala, das quais a grande maioria irá a fornecer informação ao receptor. Além do mais, cada um desses dados levará informação da direção de chegada, exigindo tanto um tamanho de armazenamento bastante elevado, como também um grande tempo de cálculo para poder processar toda a informação. Portanto, o modelo implementado (ver Fig. 6.2) utiliza, por ora, um reverberador artificial para representar a cauda reverberante nas *RIBQ*'s (TORRES, 2004).

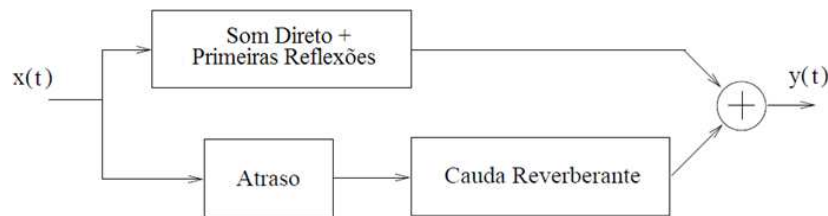


Figura 6.2: Diagrama para implementação do modelo das *RIBQ*'s.

### 6.1.3 Modelagem das *HRTF*'s via transformadas wavelet

A audição humana tem uma resolução angular que varia entre 5 e 20 graus, dependendo da direção do som incidente (BLAUERT, 1997). Tal Resolução requer que o conjunto de *HRTF*'s, tenha aproximadamente 1400 funções, uma para cada direção e para cada ouvido. No processo de aurilização formulado por Torres (2004), foram adotadas 710 funções de transferência para cada ouvido. Cada uma dessas funções corresponde a um filtro *FIR* (Finite Impulse Response), ao qual será aplicado o processo de redução explicado a seguir.

Essa simplificação foi realizada com sucesso através da modelagem das *HRTF*'s por transformadas wavelets e filtros esparsos (TORRES et al., 2002, 2004), onde obteve-se uma redução de aproximadamente 70% em relação à sua implementação tradicional. Assim, uma *HRIR*, que originalmente possuía 100 coeficientes no tempo, pôde ser implementada por uma transformada wavelet acrescida de um conjunto de 30 coeficientes. A transformada discreta wavelet pode ser obtida escolhendo-se adequadamente os coeficientes dos filtros protótipos  $H^0(z)$  e  $H^1(z)$ , e ordená-los como mostra a estrutura

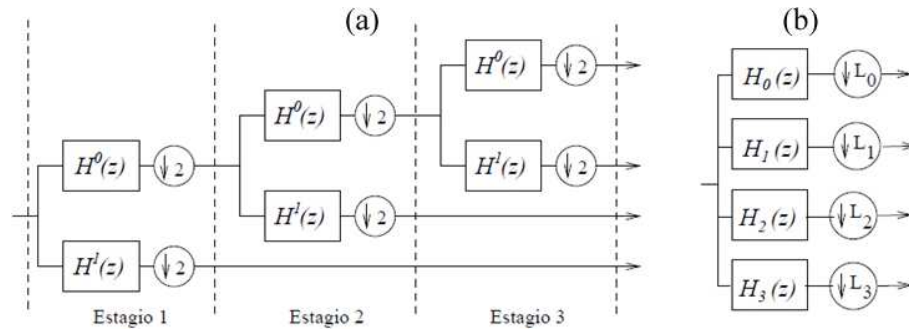


Figura 6.3: Implementação da Wavelet (a) pela decomposição em diversos estágios e (b) através de um banco de filtros equivalente.

(VAIDYANATHAN, 1993) da Fig. 6.3a. Naquele caso, os correspondentes filtros de análise equivalentes  $H_m(z)$  da Fig. 6.3b estão relacionados com os filtros de análise de duas bandas (passa-alto e passa-baixo),  $H^0(z)$  e  $H^1(z)$  da Fig. 6.3a, por

$$H_0(z) = \prod_{k=0}^{J-1} H^0(z^{2^k}), \quad (6.1)$$

e

$$H_m(z) = H^1(z^{2^{J-m}}) \prod_{k=0}^{J-1-m} H^0(z^{2^k}), \quad (6.2)$$

com  $m + 1, \dots, M - 1$ , onde  $M = J + 1$  é o número de sub-bandas e  $J$  é o número de estágios da decomposição de múltipla-resolução.

A estrutura mostrada na Fig. 6.4 é capaz de modelar qualquer sistema de resposta impulsiva finita. Devido ao fato que as *HRIR*'s são funções com um tempo finito de decaimento, elas podem ser consideradas como sistemas *FIR*. Dito isso, os coeficientes das *HRIR*'s são modelados por um grupo de filtros esparsos, em  $G_m(z^{Lm})$ , para  $m = 0, 1, \dots, M - 1$ , os quais processam os resultados das transformadas wavelet. Os filtros esparsos são filtros *FIR*, onde os coeficientes diferentes de zero estão separados por  $Lm - 1$  zeros, onde  $Lm$  é o fator de espaçamento da sub-banda  $m$ .

#### 6.1.4 Considerações de programação para a implantação da rotina computacional de aurilização no código computacional *RAIOS*

Embora o código computacional *RAIOS* e a rotina computacional de aurilização tenham sido desenvolvidos na linguagem de programação C++, é necessário ter um cuidado es-

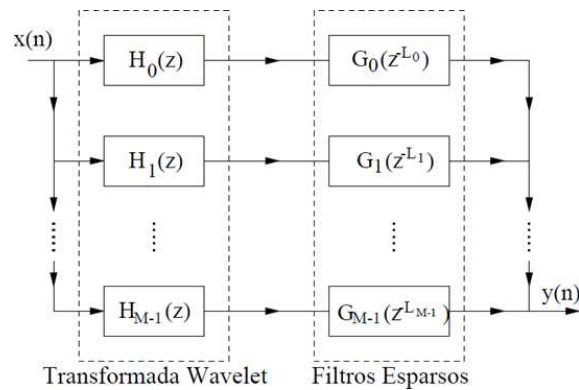


Figura 6.4: Implementação da wavelet através de filtros esparsos.

pecial nas pequenas diferenças que existem de um compilador a outro. Foi, então, preciso modificar a rotina de auralização para corrigir as inconsistências entre compiladores, de maneira que a nova seção de código pudesse funcionar como um módulo do *RAIOS*, porém, completamente independente de todos os outros processos do software, até completar o estágio de testes para a completa interligação.

Uma vez realizado o procedimento acima, foi necessário trabalhar nos dados de saída do *RAIOS* e nos dados de entrada do módulo de auralização. O primeiro passo nesse sentido foi gerar uma estrutura de dados (ver Tab. 6.1) que armazene os dados necessários para gerar as RIBQ's.

Tabela 6.1: Estrutura de dados de entrada para o processo de auralização.

Descrição	Número de dados	Tipo de dado	Total
Direção de chegada do raio	3	Float	12 bytes
Tempo de chegada	1	Float	4 bytes
Energia por banda de oitava	8	Float	32 bytes
TOTAL	12	Float	48 bytes

Reforçando o que já foi assinalado na Seção 6.1.2, pode-se observar que, para cada um dos raios acústicos que chegam ao receptor (ou cabeça virtual), o tamanho da informação é relativamente alta, portanto a utilização da informação fornecida pela simulação das reflexões difusas faria com que tenha-se que trabalhar com estruturas de dados de tamanho superior a 500 Mb, mesmo para salas pouco reverberantes. O armazenamento de dita estrutura de dados é desejável no caso que, mais tarde, seja necessário realizar reprocessamentos dos dados com o objetivo de refinar os resultados da auralização. Desta maneira, evitaria-se repetir todo o processamento da simulação acústica.

A rotina de auralização introduzida no *RAIOS*, utiliza outros dados de entrada que são obtidos de arquivos externos, mantendo o esquema pré-integração com o *RAIOS*. Tal informação se refere ao banco de dados das *HRIR*'s, o arquivo .wav com o som anecóico que vai ser processado, o destino (lugar no *HD*) onde se armazena o arquivo de saída do processo de auralização, entre outros.

## 7 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos dos modelos discutidos anteriormente e implementados no código *RAIOS*. Tais resultados são apresentados de forma numérica e/ou gráfica, dependendo do modelo em consideração, para, a seguir, serem avaliados e discutidos.

### 7.1 Processo de Importação

#### 7.1.1 Implementação Computacional

O procedimento de importação das superfícies de contorno da sala, implementado no código computacional *RAIOS*, pode ser representado pelo fluxograma da Fig. 7.1 (NARANJO et al., 2009b). Adicionalmente, após o processo de importação terminar, foram programadas uma série de rotinas de verificação automática, de forma que elas atuem como um filtro das limitações 1, 2 e 3, listadas na seção 3.1.3.

Para o processo de importação das *POLYLINES* que representam fontes lineares, foram realizados alguns ajustes ao algoritmo anterior.

- Depois de preestabelecer uma formatação especial para o nome do *Layer* da *POLYLINE*, foram colocados elementos condicionantes no código, de maneira que seja possível diferenciar as superfícies de contorno da sala e as fontes sonoras lineares.
- Os vértices da entidade *POLYLINE* são usados para calcular vetores diretores. O somatório dos seus módulos, fornece o comprimento da entidade.
- Baseados no valor obtido no item anterior, foi programado um procedimento que, dependendo do número de fontes especificado no nome do *Layer*, distribui as fontes pontuais ao longo da *POLYLINE*, de maneira equidistante.

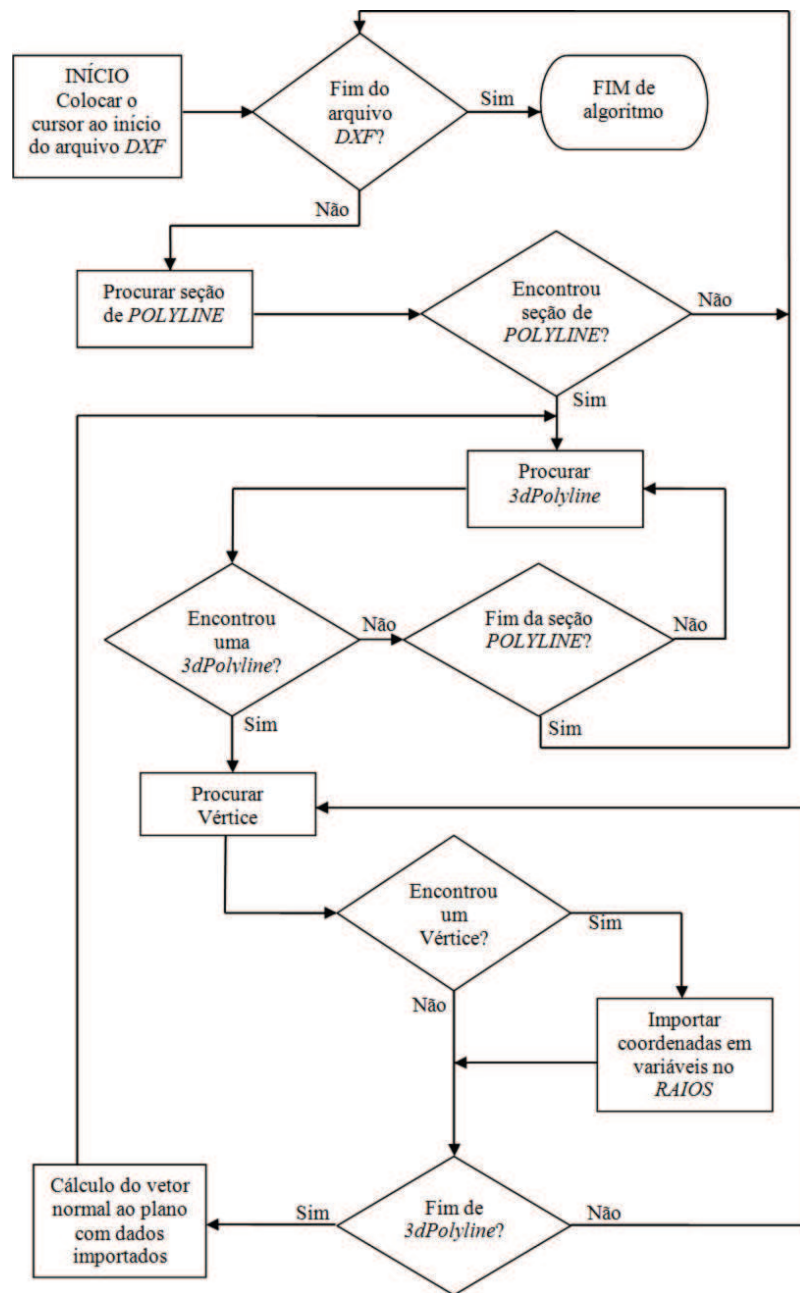


Figura 7.1: Fluxograma do algoritmo de importação implementado no código computacional *RAIOS*.

### 7.1.2 Resultados da importação de dados

A seguir, são apresentados os resultados obtidos, classificados segundo o processo que os gera.

As Figs. 7.2 a 7.4 ilustram o processo de importação desde o desenho original em *AutoCAD*, Fig. 7.2, até a sala no módulo de edição do software *RAIOS*, Fig. 7.4.

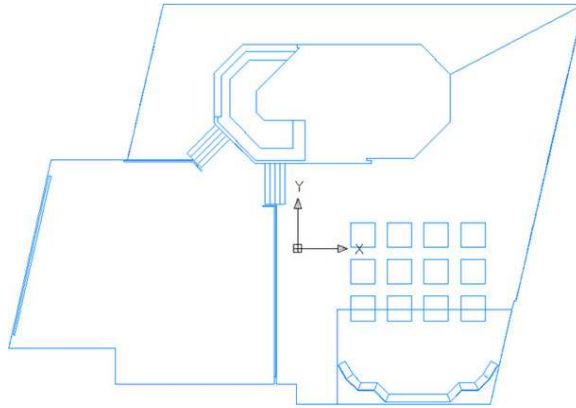


Figura 7.2: Planta baixa original de uma sala em *AutoCAD*.

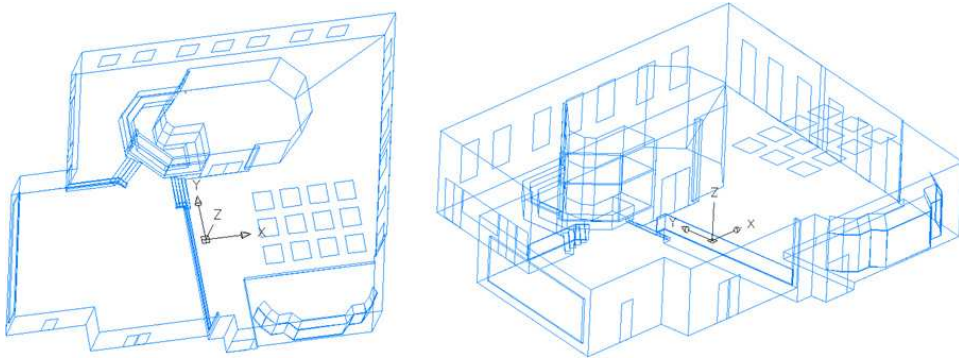


Figura 7.3: *3dPolylines* traçadas a partir da planta baixa, elevação e cortes originais em *AutoCAD*, vistas em duas perspectivas.

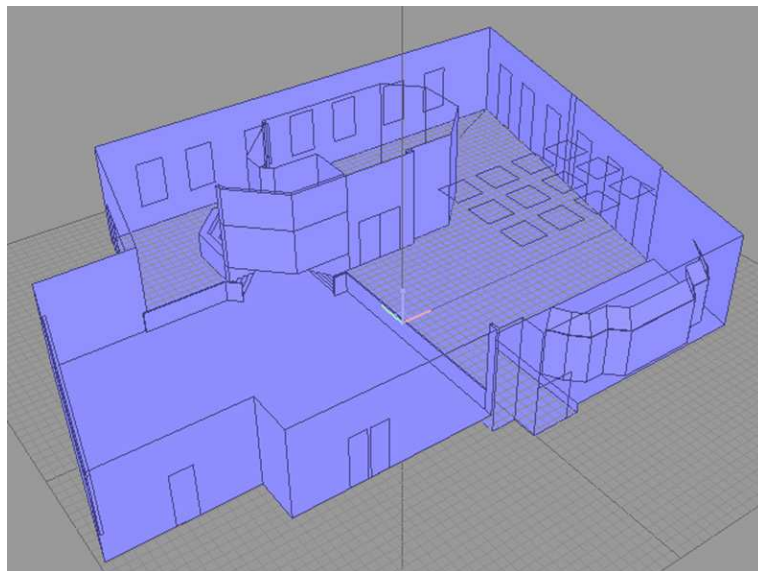


Figura 7.4: Tela do programa *RAIOS* depois de concluído o processo de importação de superfícies de contorno da sala da Fig 7.2.



A Fig. 7.5 ilustra o desenho de uma *POLYLINE*, em *AutoCAD*, que servirá como o eixo onde serão colocadas uma serie de fontes sonoras. Na Fig. 7.6, são apresentados três resultados da importação, onde o parâmetro de número de fontes para cada caso foi 10, 20 e 30, respectivamente.

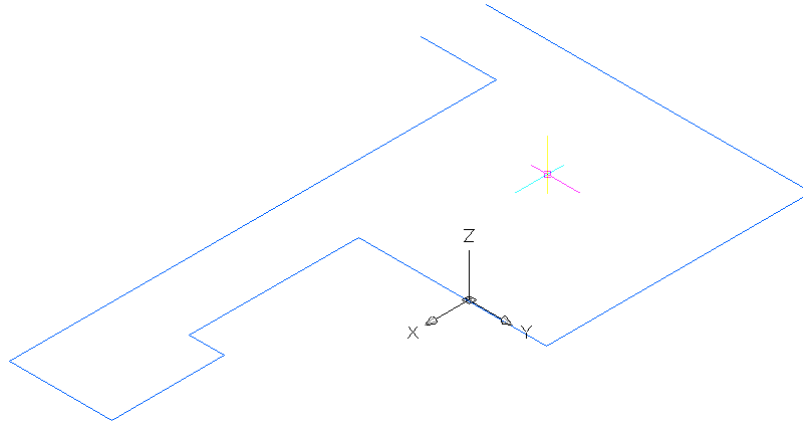


Figura 7.5: *POLYLINE* representando uma fonte linear em *AutoCAD*.

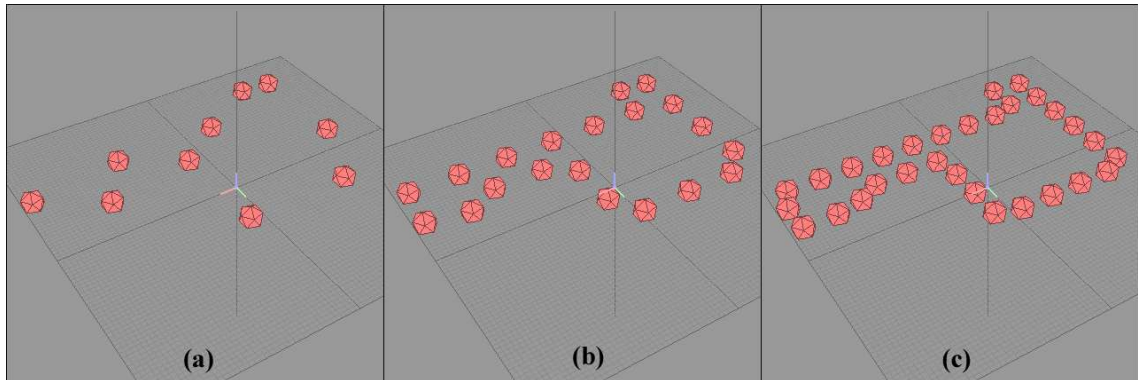


Figura 7.6: Tela do programa *RAIOS* depois de concluído o processo de importação de fontes sonoras, para o número de fontes igual a: (a) 10, (b) 20 e (c) 30.

Finalmente, as Figs. 7.7 e 7.8 ilustram o exemplo de importação, onde a entidade *POLYLINE* representa tanto superfícies de contorno, como fontes sonoras lineares.

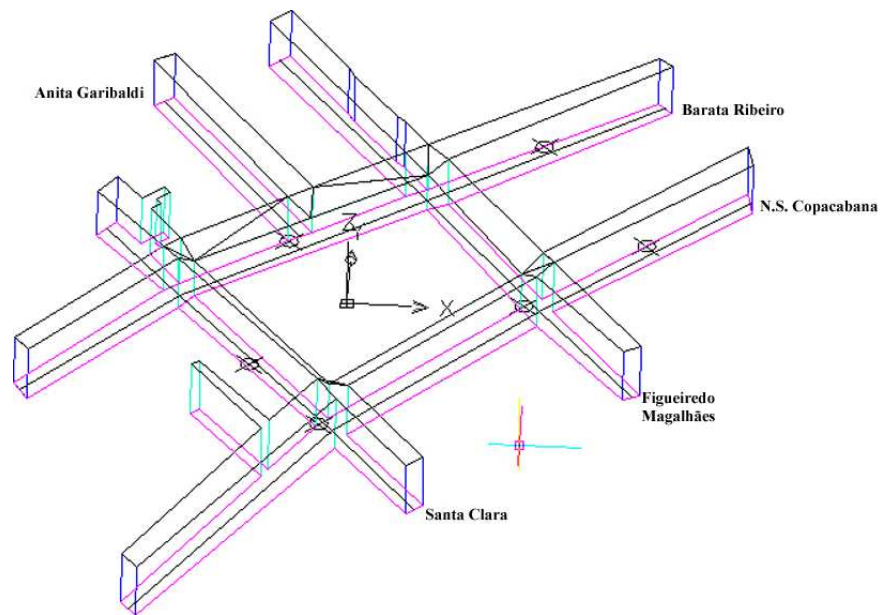


Figura 7.7: Modelo no *AutoCAD* com *POLYLINES* representando superfícies de contorno e fontes lineares.

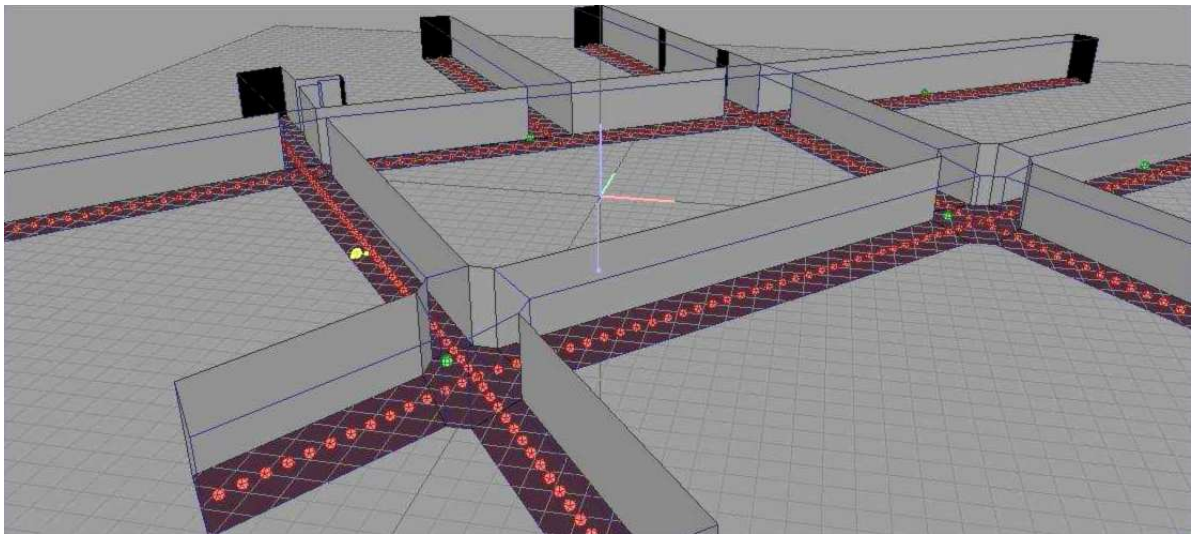


Figura 7.8: Tela do programa *RAIOS* depois de concluído o processo de importação de superfícies e fontes sonoras lineares.

## 7.2 Novos parâmetros de qualidade acústica

Para conferir os resultados obtidos com os novos parâmetros de qualidade acústica implementados neste trabalho ( $D_{80}$ ,  $C_{50}$ ,  $LG$  e  $ST1$ ), fez-se uma comparação com parâmetros similares que foram testados com êxito no *Round Robin 3*. Por exemplo, os resultados do parâmetro  $D_{80}$  são comparados com os resultados já conferidos do parâmetro  $C_{80}$ , e assim por diante.

### 7.2.1 Verificação dos resultados dos parâmetros $D_{80}$ e $C_{50}$

Tomando em consideração que o parâmetro  $D_{80}$  tem uma relação claramente definida com o  $C_{80}$  — já validado com êxito anteriormente (BORK, 2005; TENENBAUM et al., 2006b) — mediante a Eq. 4.4, pode-se, então, verificar a consistência dos valores do parâmetro  $D_{80}$  (ver Fig. 7.9).

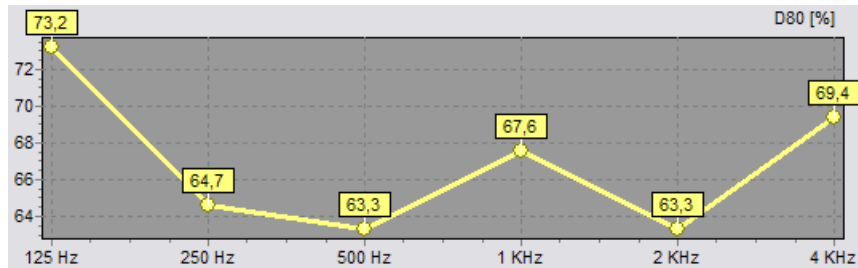


Figura 7.9: Parâmetro  $D_{80}$  calculado pelo novo modelo implementado no *RAIOS*.

Aplicando a fórmula analítica com esses valores, obtém-se o  $C_{80}$  para cada banda de oitava. Os resultados são mostrados na Tab. 7.1.

Tabela 7.1:  $C_{80}$  calculado analiticamente.

Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Resultado	4,4	2,6	2,4	3,2	2,4	3,6

Os valores obtidos coincidem com os valores do parâmetro  $C_{80}$  tomados da simulação feita para o *Round Robin 3* (ver Fig. 7.10).

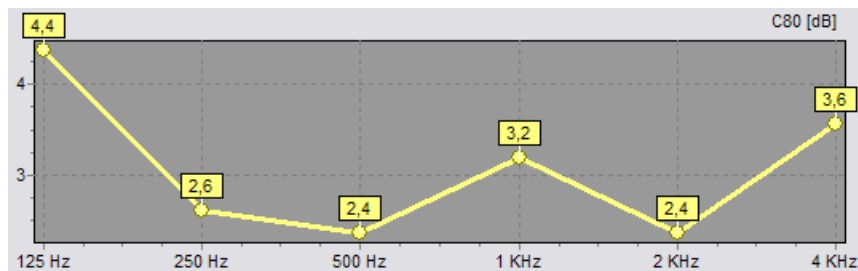


Figura 7.10: Parâmetro  $C_{80}$  tomado da simulação feita no *RAIOS* para o *Round Robin 3*.

Utilizando um procedimento similar é validado o parâmetro  $C_{50}$ , aplicando a Eq. 4.2 e verificando o resultado obtido com os valores do parâmetro  $D_{50}$ .

Os resultados, obtidos para o  $D_{50}$  aplicando a fórmula analítica, são apresentados na Tab. 7.2.

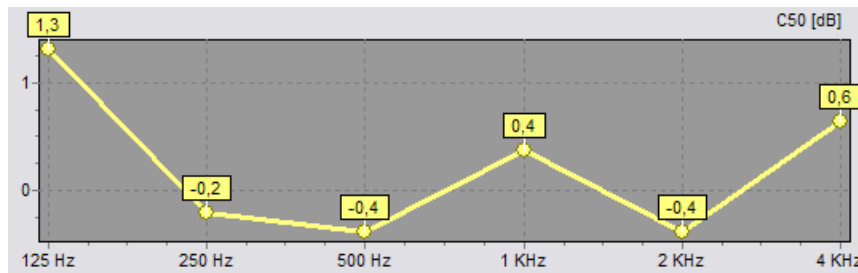


Figura 7.11: Parâmetro  $C_{50}$  calculado pelo novo modelo implementado no *RAIOS*.

Tabela 7.2:  $D_{50}$  calculado analiticamente.

Frequência	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Resultado	57,5	48,9	47,8	52,1	47,8	53,7

Os valores obtidos coincidem com os valores do parâmetro  $D_{50}$  tomados da simulação feita para o *Round Robin 3* (ver Fig. 7.12).

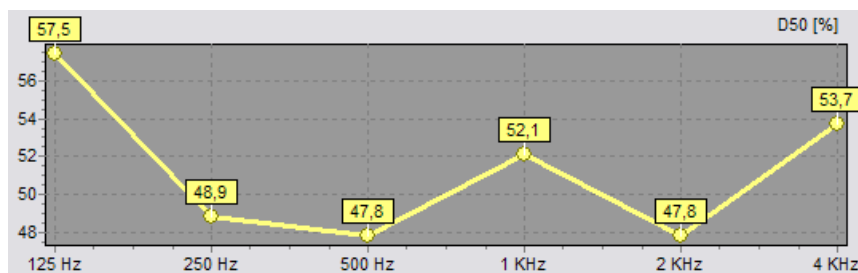


Figura 7.12: Parâmetro  $D_{50}$  tomado da simulação feita no *RAIOS* para o *Round Robin 3*.

## 7.2.2 Verificação dos Resultados dos parâmetros $LG$ e $ST1$

O parâmetro de ganho lateral,  $LG$ , embora não tenha uma fórmula definida que o relacione diretamente com outro parâmetro, tem semelhanças na sua formulação com o parâmetro  $G$ . Considerando que o último foi calculado no *RAIOS* e validado no *Round Robin 3*, uma análise comparativa de ambos resultados, apresentados mais adiante em gráficos por banda de oitava, permitiria obter uma idéia geral do nível de concordância entre os parâmetros  $LG$  e  $G$ .

Tanto o parâmetro  $G$ , como o  $LG$ , comparam um valor de energia da *RIQ* com a energia do som direto a uma distancia de 10 m. No caso do  $G$ , o valor representa a energia total do estado estacionário (Seção 4.2) contida na integral da *RIQ*. Enquanto isso, o  $LG$  considera principalmente a energia presente na cauda reverberante da *RIQ*,

aliás, captada com o padrão *MF8* que favorece a chegada do som lateral. O anterior claramente indica que o valor do *LG* vai ser sempre menor com relação ao valor do *G*. É natural presumir, que em uma sala difusiva, que vai fornecer mais energia para a cauda reverberante, além de espalhar o som em todas direções, a diferença entre os parâmetros *G* e *LG* diminuirá. A análise anterior permite, então, afirmar que efetivamente existe um certo nível de concordância entre os resultados do *G* e o *LG* apresentados nas Figs. 7.13 e 7.14 respectivamente.

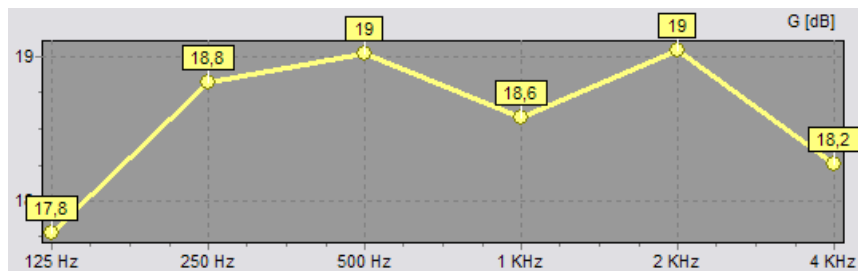


Figura 7.13: Parâmetro *G* tomado da simulação feita no *RAIOS* para o *Round Robin 3*.

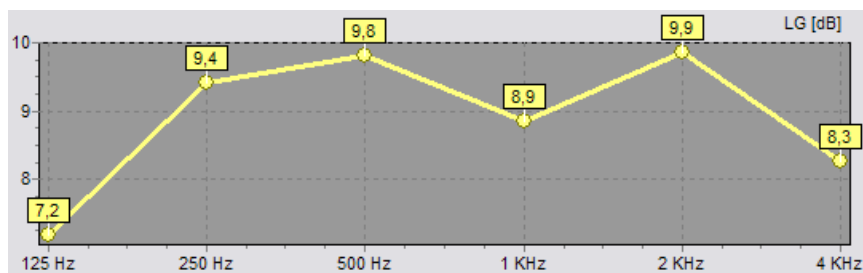


Figura 7.14: Parâmetro *LG* calculado pelo novo modelo implementado no *RAIOS*.

A falta de resultados experimentais para o fator de suporte, *ST1*, no *Round Robin 3*, impossibilitaram uma validação de resultados para esse parâmetro. Adicionalmente, os demais parâmetros não apresentam características similares importantes com relação ao *ST1*, não permitindo que seja realizada uma comparação equivalente como foi feito para o parâmetro *LG*. Porém, cabe apontar que, da mesma forma como aconteceu com os outros parâmetros, a formulação foi cuidadosamente observada. A Fig. 7.15 apresenta os resultados obtidos.

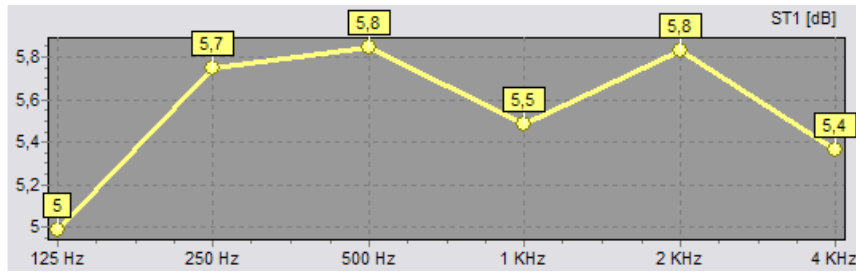


Figura 7.15: Parâmetro  $ST1$  calculado pelo novo modelo implementado no *RAIOS*.

### 7.3 Validação do cálculo do nível de pressão sonora

Quando se fala de propagação esférica em campo livre com fonte pontual e onidirecional, os três níveis sonoros principais — potência ( $NWS$ ), intensidade ( $NIS$ ) e pressão ( $NPS$ ) — são iguais numericamente, no instante que a onda percorreu aproximadamente 0,2821 m desde a fonte. A distância mencionada corresponde ao raio de uma esfera de 1 m<sup>2</sup> de superfície. No caso mais geral, a relação entre  $NWS$  e  $NPS$ , está definida por

$$NPS = NWS - 20 \log \frac{r_2}{r_1}, \quad (7.1)$$

onde  $r_1$  é o raio da esfera de superfície de área unitária e  $r_2$  é a distância entre a fonte sonora onidirecional e o receptor.

Considerando que as fontes sonoras virtuais no *RAIOS* simulam propagação esférica (Seção 2.1.1), um teste preliminar consiste em emular, no software, as condições descritas anteriormente para verificar se o modelo para o cálculo do  $NPS$  fornece resultados similares aos da fórmula analítica (Eq. 7.1). Os resultados a seguir apresentam uma simulação de propagação em uma câmara anecóica, onde três receptores foram alinhados com a fonte sonora e separados 0,2821 m, 1 m e 4 m, respectivamente dela (Fig. 7.16).

A Tab. 7.3 mostra os resultados obtidos analiticamente e os compara com os resultados obtidos numericamente.

Tabela 7.3: Resultados numéricos e analíticos para o cálculo do  $NPS$ .

Distância da fonte sonora de 1 Watt de potência	Resultado analítico	Resultado numérico	Erro
0,2821 m	120 dB	120.5 dB	0.5 dB
1 m	109 dB	109.2 dB	0.2 dB
4 m	97 dB	97.1 dB	0.1 dB

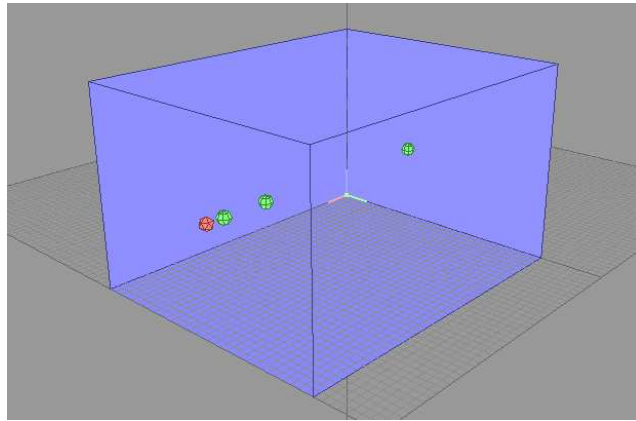


Figura 7.16: Sala anecóica de forma cúbica com uma fonte sonora de 1 Watt de potência e três receptores alinhados à fonte.

A Fig. 7.18 mostra os níveis de pressão sonora global, juntamente com os níveis de pressão sonora por banda de oitava computados pelo *RAIOS*. Observe que, tratando-se de uma sala anecóica, só há som direto, não havendo filtragem por absorção, portanto, os níveis por banda são todos iguais.

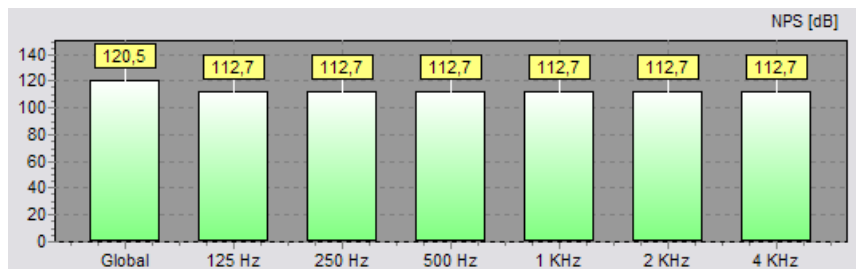


Figura 7.17: *NPS* por banda de oitava.

A Fig. 7.18 mostra os níveis de pressão sonora global e filtrados pelas curvas de ponderação A, B, C e D.

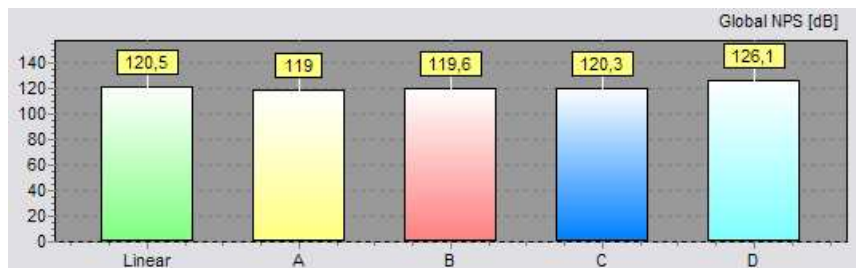


Figura 7.18: *NPS* global e *NPS*'s ponderados com as curvas A, B, C e D.

## 7.4 Acústica Urbana

Os resultados da simulação de acústica exterior, especificamente o caso de acústica urbana, constituem mais uma validação do processo do cálculo do *NPS* aplicando a curva de ponderação A e do processo de importação de *POLYLINES* representando fontes sonoras lineares.

### 7.4.1 Cenário escolhido para a simulação

No presente trabalho, foi escolhida a zona localizada na parte central do bairro de Copacabana, no Rio de Janeiro, limitada pela avenida Atlântica e a rua Toneleros e pelas ruas Raimundo Corrêa e Siqueira Campos, como mostra a Fig. 7.19. A escolha foi feita com o objetivo de comparar os resultados obtidos com o *RAIOS*, com aqueles obtidos em um trabalho de predição anterior feito com o software comercial *CADNA-A* (PINTO; MARDONES, 2009). Tal trabalho conta com dados de medições feitas *in-loco*, com os quais é possível fazer uma análise de resultado mais completa. A topografia da região e as dimensões dos prédios foram obtidas de um modelo CAD da cidade do Rio de Janeiro, aproveitando a capacidade de importação de informação do *RAIOS*, recentemente implementada.



Figura 7.19: Foto aérea do setor de Copacabana escolhido para a comparação (Google earth).

De acordo com a norma RLS90 (1990), mencionada no Capítulo 5, os dados são



traduzidos em várias fontes lineares cujo *NWS* está definido por unidade de comprimento. No caso do *RAIOS*, como foi explicado anteriormente, a fonte linear se divide em uma serie de fontes pontuais sobre as linhas de tráfego. Os valores de potência considerados para ambos softwares são apresentados na Tab. 7.4.

Tabela 7.4: Valores dos níveis de potência sonora considerados nas fontes sonoras lineares.

Nome da rua	Potencia estimada com a norma RLS90 (dB/m)	Comprimento simulado (m)	<i>NWS</i> da fonte (dB)
Anita Garibaldi	54.6	161	90.0
Barata Ribeiro	72.1	516	112.5
Figueiredo Magalhães	68.5	407	107.9
N. S. Copacabana	72.6	588	113.6
Santa Clara	65.7	345	104.4

Como mencionado na Seção 5.1, foram utilizadas médias para os coeficientes de absorção e difusão dos materiais que, corriqueiramente, constituem as fachadas. Os valores escolhidos são apresentados na Tab. 7.5.

Tabela 7.5: Coeficientes de absorção e difusão nas superfícies de contorno do cenário simulado.

Superfície	Coeficientes de absorção por banda (Hz)						Coeficientes de difusão por banda (Hz)					
	125	250	500	1k	2k	4k	125	250	500	1k	2k	4k
Pavimento	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,10	0,12	0,15	0,2	0,25	0,30
Fachadas	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,10	0,12	0,15	0,2	0,25	0,30
Céu	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Os receptores virtuais, foram posicionados nos mesmos lugares onde foram feitas as medições, como ilustra a Fig. 7.20.

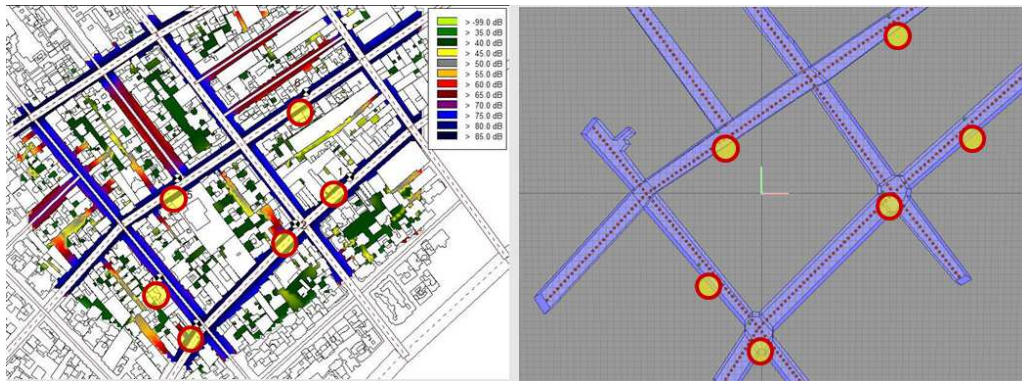


Figura 7.20: Seis pontos foram medidos in situ e simulados pelos dois softwares (*CADNA-A* e *RAIOS*). À direita a janela do *RAIOS*

Finalmente, os resultados da simulação são apresentados na Tab. 7.6.

Tabela 7.6: Medições experimentais e resultados numéricos do cálculo do *NPS*.

N°	Receptor Localização	Medição	<i>NPS</i> (dBA)		Erro (dBA)	
			<i>CADNA</i>	<i>RAIOS</i>	<i>CADNA</i>	<i>RAIOS</i>
01	N.S.Copacabana, 610	76.0	78.2	77.1	2.2	1.1
02	N.S.Copacabana/F.Magalhães	74.3	74.7	77.1	0.4	2.8
03	N.S.Copacabana/S.Clara	73.5	73.6	76.3	0.1	2.8
04	Santa Clara, 98	70.5	70.6	72.7	0.1	2.2
05	B.Ribeiro/A.Garibaldi	71.8	73.3	75.4	1.5	3.6
06	B.Ribeiro, 432	77.6	77.4	76.6	-0.2	-1.0

## 7.5 Aurilização

### 7.5.1 Resultados Gerais da simulação

Um processo de realidade virtual acústica, embora baseado em diversas técnicas e modelos físico-matemáticos, precisa ser validado pela subjetividade humana. Com isso em mente, criou-se inicialmente uma sala de forma cúbica ( $1728 \text{ m}^3$ ) para executar um teste inicial simples (ver Fig. 7.21). A fonte sonora (icosaedro vermelho) foi colocada no meio da sala com uma elevação de 4 metros sobre o chão. Dois receptores (esferas verdes) foram colocados à esquerda e à direita, separados 3,5 metros da fonte e com a mesma elevação. Os três elementos estão sobre uma linha que é ortogonal a um par de paredes de propriedades (A) com altos coeficientes de absorção e difusão. As paredes à frente e atrás dos receptores (B) são mais refletoras (baixos coeficientes de absorção), ver Tab. 7.7.

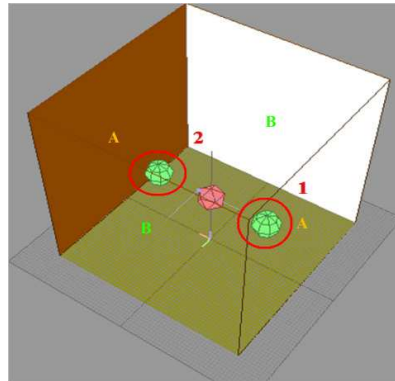


Figura 7.21: Sala cúbica para validação do processo de realidade virtual acústica.

Tabela 7.7: Coeficientes de absorção e difusão dos materiais usados.

Descrição do material	Coeficiente	Banda de frequência					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Paredes A	$\alpha$	0,12	0,1	0,14	0,22	0,06	0,12
<i>Difusor Omni64</i>	$\delta$	0,8	0,76	0,69	0,67	0,68	0,67
Paredes B	$\alpha$	0,01	0,08	0,08	0,25	0,11	0,05
<i>Drywall</i>	$\delta$	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05
Teto	$\alpha$	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
<i>Telha</i>	$\delta$	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05
Chão	$\alpha$	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
<i>Ladrilho de cerâmica</i>	$\delta$	0,15	0,13	0,11	0,09	0,07	0,05

Para obter o efeito desejado, as partes frontais das cabeças virtuais (receptores) foram posicionadas de frente a uma das paredes refletoras, de maneira que no Receptor 1, o ouvido direito fique diretamente orientado para a fonte sonora, enquanto que, no Receptor 2, ocorre o contrario. O resultado do processo foi satisfatório, indicando que a amplitude no ouvido esquerdo do Receptor 1, ver Fig. 7.22, é menor do que a amplitude no ouvido direito. O oposto ocorre para o Receptor 2, ver Fig. 7.23.



Figura 7.22: Amplitude *versus* tempo do som gravado no processo de auralização (arquivo .wav) para a Cabeça Virtual 1.

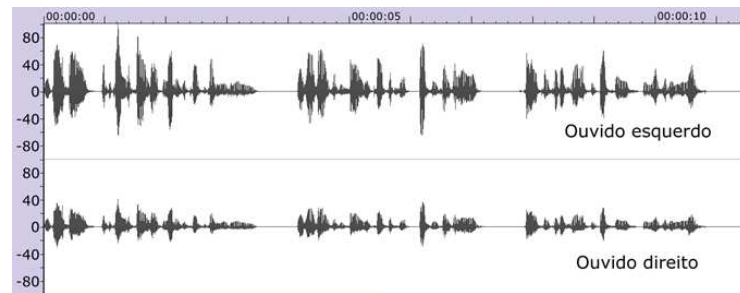


Figura 7.23: Amplitude *versus* tempo do som gerado no processo de aurilização (arquivo .wav) para a Cabeça Virtual 2.

### 7.5.2 Exemplo prático em uma sala em construção

Foi feito, em seguida, um teste de aurilização em uma sala de eventos musicais, atualmente em construção na cidade do Rio de Janeiro, RJ. Há uma fonte sonora no palco — à frente da concha acústica — e sete receptores estão espalhados pelo recinto, ver Fig. 7.24. À esquerda, vê-se uma superfície extensa, recoberta com material absorvente acústico. Os retângulos representam difusores sonoros, colocados no teto, à frente da fonte sonora.

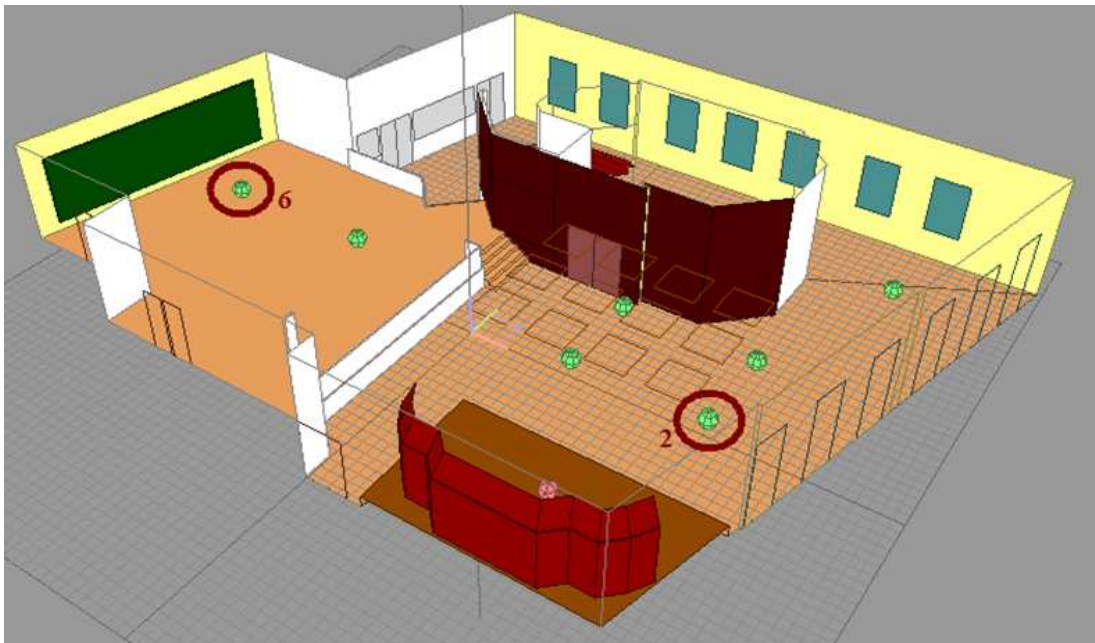


Figura 7.24: Modelo da sala de eventos em construção no Rio de Janeiro.

Considerando que as todas as cabeças estão orientadas para a mesma direção, os resultados obtidos na aurilização dependeram, como é natural, de sua posição. A

seguinte é mostrado o sinal anecóico (ver Fig. 7.25) original e dois resultados do processo de aurilização.

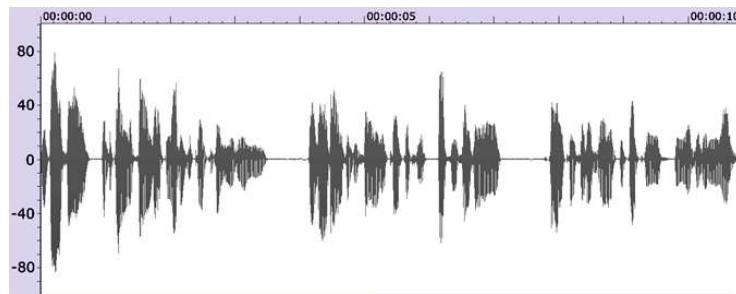


Figura 7.25: Sinal anecóico original, arquivo .wav.

A Fig. 7.26 mostra os sinais .wav nos dois ouvidos do Receptor 6, indicando uma maior amplitude no ouvido esquerdo, como era de se esperar.

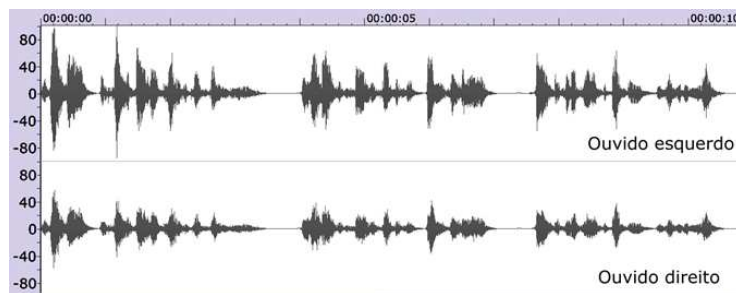


Figura 7.26: Resultado da aurilização no Receptor 6.

A Fig. 7.27 apresenta os sinais nos dois ouvidos do Receptor 2, que se encontra bem próximo à fonte, do lado direito da sala. Os resultados foram também consistentes

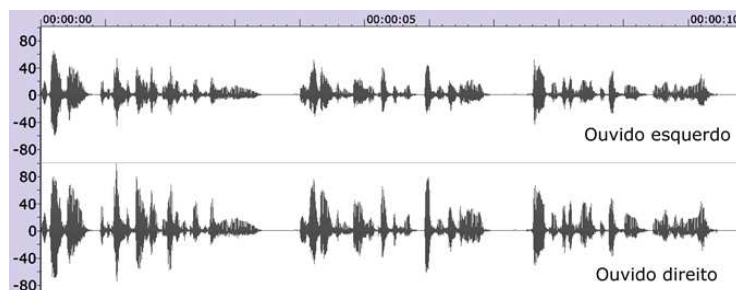


Figura 7.27: Resultado da aurilização no Receptor 2.

nesse caso, onde a maior amplitude foi apreciada no ouvido direito, porém não apresentando a mesma diferença inter-auricular observada na Fig. 7.26, como é natural.

Cabe apontar, que as Figs. 7.22, 7.23, 7.26 e 7.27, embora sejam uma representação gráfica dos arquivos .wav, produzidos durante o processo de auralização, estão longe de ilustrar adequadamente um resultado de realidade virtual acústica. Isso só pode ser alcançado *ouvindo*, com ajuda de fones de ouvido, a reprodução dos arquivos de som para recriar a sensação de espacialidade.

## 8 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

### 8.1 Conclusões

As principais conclusões deste trabalho, agrupadas por modelo implementado são as descritas a seguir.

#### 8.1.1 Importação de informação

- Apesar do existir um trabalho no desenho das *3dPolylines* a partir de planta(s) baixa(s) e elevação(ões), o procedimento de importação é muito mais eficiente, rápido e preciso do que editar normalmente a sala diretamente no módulo de edição do código computacional *RAIOS*.
- A vantagem principal de utilizar a importação de dados, naturalmente, é a possibilidade de trabalhar com salas desenhadas em *AutoCAD* ou programas similares, garantindo, dessa forma, a fidelidade da mesma.

#### 8.1.2 Parâmetros de qualidade acústica e cálculo do nível de pressão sonora

- Baseados nos resultados de parâmetros de qualidade acústica validados no *Round Robin 3*, o cálculo dos novos parâmetros foi implementado adequadamente, inclusive o cálculo do nível de pressão sonora global e por banda de oitava em regime permanente, bem como com filtros de ponderação.
- No procedimento para o cálculo do *NPS*, observou-se que o erro diminuía à medida que a separação entre a fonte e o receptor aumentava. Provavelmente, a explicação está no fato de que os receptores utilizam um disco de recepção de 15 cm de raio, para adaptar o comportamento dos receptores com uma cabeça humana. A fórmula analítica permite conhecer o *NPS* em um ponto, portanto, pelo tamanho do raio do

disco, está se captando mais energia do que a verdadeira. À medida que a distância aumenta, os raios acústicos ficam mais esparsos, de maneira que o receptor capta menos raios, representando de melhor maneira o comportamento de um receptor pontual, o que melhora o resultado.

### 8.1.3 Acústica urbana

- No presente trabalho, foi comparado um software comercial, específico para simulação de ruído urbano, com o código computacional *RAIOS*, adaptado para simular casos de propagação de som em campo aberto. O *NPS* em pontos específicos do bairro de Copacabana, no Rio de Janeiro, foi calculado pelos programas computacionais e comparados com medições feitas no local.
- Os resultados obtidos na simulação de acústica urbana, constituem uma validação adicional do cálculo do *NPS* e a aplicação das curvas de ponderação.
- A média do erro obtido com o *RAIOS* foi de aproximadamente 2,2 dBA, que está dentro da faixa de incerteza para tais aplicações e medições. Portanto, o código computacional *RAIOS* também pode ser considerado uma ótima ferramenta para simular ambientes urbanos.
- Provavelmente, a principal causa das diferenças entre os resultados se deve ao fato de se ter utilizado fontes sonoras com espectro de potência plano. Cabe novamente apontar que a simulação com o *RAIOS* não considerou as características espectrais do ruído do tráfego.

### 8.1.4 Aurilização

- O modelo de aurilização, em sua fase preliminar, foi implantando com êxito, sem ter alterado o funcionamento tanto do código *RAIOS* como da rotina computacional de realidade virtual acústica.
- Foi conferido que o processo de aurilização de uma sala, ainda em fase de projeto, permite avaliar como determinado conteúdo sonoro (discurso, música) seria percebido por um ser humano situado em diversos pontos da mesma, validando, desse modo, o projeto acústico.
- Os resultados da aurilização são consistentes com os objetivos dos testes realizados,



porém, um modelo de realidade virtual acústica não pode ser validado, aliás, nem estaria completo, sem a avaliação subjetiva humana.

- Contudo, a aurilização implementada utilizou uma cauda reverberante artificial, que não confere inteira fidedignidade à aurilização.

## 8.2 Perspectivas

Os próximos passos sugeridos no desenvolvimento do código computacional *RAIOS* são descritos a seguir.

1. Otimizar a interface do módulo de aurilização, de forma que o processo funcione sob parâmetros que o *RAIOS* defina para a rotina de aurilização, diminuindo ao máximo o uso de arquivos externos.
2. É muito importante considerar o tamanho dos dados que serão processados no simulador para que o tempo de processamento esteja dentro de parâmetros aceitáveis. Portanto, é muito importante estudar maneiras de reduzir o tamanho dos dados fornecidos pelo processo de simulação das reflexões difusas, para que se possa incluir a cauda reverberante real, fornecendo maior fidedignidade na aurilização.
3. Obter a *RIB* não quadrática de maneira que os parâmetros de qualidade acústica bi-auriculares, como a família dos IACC (Inter Aural Cross-Correlation) possam ser obtidos.
4. Executar uma serie de experimentos para contar com dados reais para completar os testes de verificação dos processos implementados neste trabalho.
5. Adequar o cálculo do *NPS* introduzindo um fator de correção (função da distancia existente entre fonte-receptor).
6. Devido ao volume da informação, gerada na simulação de campo acústico, é necessário implementar, no código computacional *RAIOS*, um sistema de banco de dados para armazenar e centralizar o uso de toda a informação. Tal implementação, além de sistematizar e otimizar os processos de cálculo feitos pelo software, vai eliminar a dependência de arquivos externos que ficam desatualizados com novas versões do simulador, fornecendo propriedades de escalabilidade ao código computacional *RAIOS*.

7. Incluir um módulo para modelar o fenômeno de difração do som.
8. Segundo a norma ISO3382 (1997), os parâmetros acústicos devem ser calculados para cada banda de oitava entre 125 Hz e 4 kHz. Portanto, a quantidade de coeficientes, tanto de absorção como de difusão, tem que ser igual ao número de bandas de oitava. Atualmente, o procedimento de ingresso desta informação é feito manualmente para cada elemento constitutivo da sala. Para evitar este inconveniente, tem que se programar um sistema de *Layers* (camadas). Uma *Layer* é um elemento abstrato que vai armazenar todas as superfícies planas que sejam do mesmo material, de maneira que os coeficientes de absorção e difusão sejam também os mesmos. Assim, ao relacionar os coeficientes à *Layer*, na realidade, se estaria relacionando aqueles valores a cada uma das superfícies incluídas neste elemento.
9. Complementando o item anterior, e para fugir completamente de qualquer possibilidade de erro humano, deve-se incluir uma tabela de coeficientes de absorção e difusão da maioria dos materiais de construção mais corriqueiramente utilizados, de maneira que, no momento de se dar valores a uma *Layer*, o usuário possa consultar uma base de dados e escolher os coeficientes do material a ser utilizado.
10. Incluir um módulo para simulação dos modos das salas, fenômeno proeminente nas baixas frequências, onde nenhum dos simuladores participantes do *Round Robin 3* apontaram resultados plenamente satisfatórios, se confrontados com as medições nessa faixa do espectro (TENENBAUM et al., 2006b).

## REFERÊNCIAS

- ALARCÃO, D.; COELHO, J. L. B.; TENENBAUM, R. A. On modeling of room acoustics by a sound energy transition approach. *Proceedings of EEA Symposium on Architectural Acoustics*, Madrid, 2000.
- ALMEIDA, A. M.; ABREU, T.; FONSECA N.; COELHO, J. L. B. COLISEO, uma técnica eficiente para acústica de salas com base num processo de markov. *30ª TECNIA-CÚSTICA*, Avila, Espanha, 1999.
- ARAUJO, M. A. N.; TENENBAUM, R. A.; BALLESTEROS, M. L. Reverberation chamber computer-aided desing. *Proceedings of the 21th Intenational Conference on Noise Control Engineering*, Toronto, Canada, v. 2, p. 719–722, 1992.
- AUTODESK. DXF reference. *Autodesk, Inc.*, 2006.
- BARRIGON, J. M.; GÓMEZ V.; MÉNDEZ, J. A.; VILCHEZ R.; TRUJILLO, J. An environmental noise study in the city of Cáceres, Spain. *Applied Acoustics*, n. 63, p. 1061–1070, 2002.
- BERANEK, L. *Concert and Opera Halls: How They Sound*. 1º Ed. New York: Acoustical Society of America, 1996.
- BLAUERT, J. Spatial hearing. *The MIT Press, Cambridge*, 1997.
- BORK, I. Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation - Part II: Calculations. *Acta Acustica united with Acustica.*, v. 91, n. 4, p. 753–763, 2005.
- CAMILO, T. S. Método híbrido para simulação numérica de acústica de salas: Combinação dos métodos de traçado de raios e transição de energia. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- CHRISTENSEN, C. L. ODEON, a design tool for auditorium acoustics, noise control and loudspeaker systems. *Proc. Institute of Acoustics*, v. 23, n. 8, p. 137–144, 2001.
- CHU, W. T. Comparison of reverbelration measurements using schroeder's impulse method and decay-curve averaging method. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 63, n. 5, p. 1444–1450, 1978.
- DALENBÄCK, B. I. The rediscovery of diffuse reflection in room acoustics prediction. *ASA Cancoun*, PowerPoint presentation, 2002.
- DATAKUSTIK-GMBH. CADNA manual v3.4. Greifenberg, Germany., 2005.
- EMBRECHTS, J. J. Randomly traced sound ray tecniques. *Acustica*, v. 51, p. 285–295, 1982.

- GINN, K. B. *Architectural Acoustics*. DK-2850 Naerum, Denmark: Bruel and Kjaer, Naerum Offset, 1978. 29–33 p.
- IEC60651. Sound level meters. 1979.
- ISO3382. Acoustics - measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. 1997.
- ISO/WD17487. Acoustics - measurement of the sound scattering properties of surfaces. 2001.
- KLEINER, M.; DALENBÄCK, B. I.; SVENSSON, P. Auralization - an overview. *JAES*, v. 11, n. 41, p. 861–875, 1993.
- KUTTRUFF, H. *Room Acoustics*. London 4<sup>o</sup> Ed.: Spon Press, 2000. 89–114 p.
- LEWERS, T. A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics. *Applied Acoustics*, v. 38, p. 161–178, 1993.
- NARANJO, J. F. L.; PINTO, F. A. N. C.; TORRES J. C. B.; TENENBAUM, R. A. Acoustic simulator for urban noise analysis. *30<sup>o</sup> CILAMCE*, Buzios-Brasil, 2009a.
- NARANJO, J. F. L.; TENENBAUM, R. A.; TORRES J. C. B.; MELO, V. S. G. Simulação numérica de acústica de salas: Aperfeiçoamentos no código computacional *RAIOS* para importação de arquivos. *XII Encontro de Modelagem Computacional*, Rio de Janeiro - Brasil, 2009b.
- PINTO, F. A. N. C.; MARDONES, M. D. M. Noise mapping of densely populated neighborhoods - example of Copacabana, Rio de Janeiro-Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, n. 155, p. 309–318, 2009.
- PINTO, F. A. N. C.; SLAMA, J.; ISNARD, N. Sensitivity of noise mapping results to the geometric input data. *The 2005 Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- RINDEL, J. H. The use of computer modeling in room acoustics. *Journal of Vibroengineering*, v. 4, n. 3, p. 41–72, 2000.
- RLS90. Richtlinie für den Lärmschutz an Straßen. *Lärmschutz an Strassen*, August, 1990.
- SABINE, P. E. *Acoustics and Architecture*. New York: McGraw-Hill, 1932.
- SANTOS, L. C.; VALADO, F. The municipal noise map as planning tool. *Acústica. Guimarães, Portugal, paper ID:162*, 2004.
- SCHROEDER, M. R. New method for measuring reverberation time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 37, n. 6, p. 1187–1188, 1965.
- SEMAT, H.; BAUMEL, P. *Fundamentos de Física*. México: Nueva Editorial Interamericana, 1976. 398–399 p.
- SUH, J. S.; NELSON, P. A. Measurement of transient response of rooms and comparison with geometrical acoustic models. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 105, n. 4, p. 2304–2371, 1999.

- TENENBAUM, R. A.; CAMILO, T. S.; TORRES J. C. B.; GERGES, S. N. Y. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part 1 - theoretical and numerical aspects. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 29, n. 2, p. 211–221, 2006a.
- TENENBAUM, R. A.; CAMILO, T. S.; TORRES J. C. B.; STUTZ, L. T. Hybrid method for numerical simulation of room acoustics: Part 2 - validation of the computational code *RAIOS 3*. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 29, n. 2, p. 223–231, 2006b.
- TENENBAUM, R. A.; SLAMA, J. G.; BALLESTEROS, M. L. Numerical simulation of room acoustics: A new approach for source modeling. Paper F6-11. *Proceedings of 14th International Congress on Acoustics*, Beijing, China, v. 3, 1992.
- TORRES, J. C. B. Sistema de aurilização eficiente utilizando transformadas wavelets. Tese de doutorado. PEE/COPPE, UFRJ, 2004.
- TORRES, J. C. B.; PETRAGLIA, M. R.; TENENBAUM, R. A. Auralização de salas utilizando wavelets para modelagem das HRTFs. *Seminário de Engenharia de Áudio*, 2002.
- TORRES, J. C. B.; PETRAGLIA, M. R.; TENENBAUM, R. A. An efficient wavelet-based HRTF model for auralization. *Acustica united with Acta Acustica*, v. 90, n. 1, 2004.
- VAIDYANATHAN, P. P. Multirate systems and filter banks. *Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey*, 1993.
- VORLÄNDER, M. Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 86, n. 1, p. 172–178, 1989.
- VORLÄNDER, M. Building acoustics: From prediction models to auralization. *Proceedings of Acoustics*, Christchurch, New Zealand, 2006.
- VORLÄNDER, M.; MOMMERTZ, E. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. *Applied Acoustics*, v. 60, p. 187–199, 2000.
- VORLÄNDER, M. *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlin Heidelberg: Springer, 2008.