

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E DE COMPUTAÇÃO

**TÉCNICAS PARA SÍNTESE DE REVERBERAÇÃO SONORA EM  
AMBIENTES 2D E 3D**

Autor:

---

Diego Corrêa Reixach

**Banca Examinadora:**

Orientador:

---

Luiz Wagner Pereira Biscainho, D.Sc.

Co-orientador:

---

Fábio Pacheco Freeland, D.Sc.

Examinador:

---

Sergio Lima Netto Ph.D.

Examinador:

---

Marcio Nogueira de Souza D.Sc.

DEL

Setembro de 2007

# Agradecimentos

- Primeiramente aos meus pais, Roberto e Sueli, pelo suporte e incentivo. Além de serem exemplos de conduta e luta, foram essenciais para que eu superasse momentos difíceis ao longo dessa jornada. Agradeço também à minha irmã Laís, que, mesmo sem saber, faz com que eu tente me superar sempre para que um dia eu me torne a pessoa que ela diz a todos que eu sou.
- À minha querida avó, Nilza, que mesmo com sua idade avançada, sempre se mostrava interessada nos meus estudos e orgulhosa do “netinho”. Infelizmente não pôde me ver vivendo a alegria de terminar o curso de engenharia.
- Ao grande amigo e orientador, com todo o significado que essa palavra possui, Luiz Wagner Pereira Biscainho, que ajudou a superar as barreiras encontradas e me ensinou a prezar pela qualidade dos trabalhos produzidos.
- Ao co-orientador Fábio Pacheco Freeland, que além de sempre me transmitir uma tranqüilidade fundamental, foi capaz de me tirar de vários becos-sem-saída ao longo do desenvolvimento do projeto, ensinando-me muito sobre como encarar os desafios.
- Ao grupo especial de amigos que ganhei durante o curso, que tornaram essa jornada muito mais leve e prazerosa: André Berbert Ozório, Bruno de Figueiredo Melo e Souza, Daniel Magalhães Moura Neto, Fernando Luiz Valente de Souza, Henrique Oscar Duran Lira, Leonardo Vieira Gullo, Ramon de Menezes Pedrosa Andrade, Vicente Roxo Mundim.
- Aos demais amigos que estiveram à minha volta durante esse período de grandes mudanças. Os momentos de alegria vividos com eles foram tão importantes para meu crescimento quanto aqueles vividos dentro de sala de aula.

# Resumo

Este trabalho aborda a implementação de diferentes algoritmos para a síntese de reverberação sonora na geração do som tridimensional. A adição da síntese de reverberação a um sistema de geração de som tridimensional torna possível a obtenção de resultados ainda mais próximos ao real, pois insere os efeitos do ambiente sobre o som.

Inicialmente, são discutidos brevemente os fatores relevantes para se dar noção de espacialidade a um som. Em seguida, faz-se um estudo de diferentes métodos para a obtenção das informações de reverberação, escolhendo dois desses métodos para implementação. Faz-se a implementação dos algoritmos escolhidos para ambientes com apenas duas dimensões, o que já é suficiente para se fazer uma análise comparativa do desempenho dos métodos. Além disso, formula-se um dos métodos para três dimensões.

O primeiro método testado é o chamado método das imagens; em seguida, aborda-se o método do traçado de raios (*beam tracing*). Os resultados obtidos são analisados e então discute-se a possibilidade de utilização desses métodos nas soluções de geração de som tridimensional *online*.

# Palavras-Chave

Reverberação, som tridimensional, áudio.

# Conteúdo

|  |           |
|--|-----------|
| Agradecimentos   | ii        |
| Resumo   | iii       |
| Palavras-Chave   | iv        |
| Conteúdo   | v         |
| <b>1 Introdução</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Contextualização . . . . .                                   | 1         |
| 1.2 Aplicações . . . . .   | 4         |
| 1.3 Objetivos . . . . .  | 4         |
| 1.4 Organização do trabalho . . . . .                            | 5         |
| <b>2 Noções de Espacialidade</b>                                 | <b>7</b>  |
| 2.1 Alguns modelos . . . . .                                     | 9         |
| 2.1.1 Posicionamento . . . . .                                   | 9         |
| 2.1.1.1 Estéreo e <i>Surround</i> . . . . .                      | 9         |
| 2.1.1.2 HRTF ( <i>Head-Related Transfer Function</i> ) . . . . . | 10        |
| 2.1.2 Reverberação . . . . .                                     | 11        |
| 2.1.2.1 Método das imagens . . . . .                             | 11        |
| 2.1.2.2 <i>Beam tracing</i> - O traçado de feixes . . . . .      | 11        |
| <b>3 Método das Imagens</b>                                      | <b>13</b> |
| 3.1 Exposição do método . . . . .                                | 13        |
| 3.2 Conceitos matemáticos . . . . .                              | 14        |
| 3.2.1 Duas dimensões . . . . .                                   | 14        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.2.2    | Três dimensões . . . . .                         | 16        |
| 3.3      | Descrição do algoritmo . . . . .                 | 20        |
| 3.3.1    | Fontes inaudíveis . . . . .                      | 22        |
| 3.3.2    | Organização dos dados de reverberação . . . . .  | 23        |
| 3.3.3    | Exemplificação . . . . .                         | 23        |
| 3.4      | Conclusões . . . . .                             | 25        |
| <b>4</b> | <b>Método do <i>Beam Tracing</i></b>             | <b>28</b> |
| 4.1      | Introdução . . . . .                             | 28        |
| 4.2      | <i>Ray tracing</i> . . . . .                     | 28        |
| 4.3      | <i>Beam tracing</i> . . . . .                    | 30        |
| 4.3.1    | Visibilidade dos oclusores . . . . .             | 30        |
| 4.3.2    | <i>Beam tree</i> . . . . .                       | 32        |
| 4.3.3    | O ouvinte . . . . .                              | 33        |
| 4.3.4    | Particionamento do ambiente . . . . .            | 33        |
| 4.4      | <i>Beam tracing</i> no espaço dual . . . . .     | 35        |
| 4.4.1    | Motivação . . . . .                              | 35        |
| 4.4.2    | Espaço dual x Espaço cartesiano . . . . .        | 36        |
| 4.4.2.1  | Transformação dos principais elementos . . . . . | 36        |
| 4.4.3    | Diagramas de visibilidade . . . . .              | 38        |
| 4.4.4    | O algoritmo . . . . .                            | 41        |
| 4.5      | Conclusões . . . . .                             | 45        |
| <b>5</b> | <b>Implementação do <i>Software</i></b>          | <b>46</b> |
| 5.1      | Considerações gerais . . . . .                   | 46        |
| 5.2      | Método das imagens . . . . .                     | 46        |
| 5.3      | Método do <i>beam tracing</i> . . . . .          | 50        |
| 5.4      | Interfaces de entrada e saída . . . . .          | 50        |
| 5.5      | Resultados . . . . .                             | 52        |
| 5.5.1    | Método das imagens . . . . .                     | 52        |
| 5.5.2    | Traçado de feixes . . . . .                      | 53        |
| 5.5.3    | Testes subjetivos . . . . .                      | 54        |

**6 Conclusão** **55**  
6.1 Trabalhos Futuros . . . . . 56

# Lista de Figuras

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Exemplo de caminhos percorridos pelo som entre fonte e ouvinte. . . . .                       | 2  |
| 1.2  | Separação das reflexões em categorias . . . . .   | 3  |
| 1.3  | Esquema geral de um sistema para geração de som espacial. . . . .                             | 5  |
| 2.1  | Sistema Estéreo: geração de uma fonte virtual (fantasma) entre duas caixas acústicas. . . . . | 10 |
| 2.2  | Oclusão de um obstáculo por outro . . . . .   | 12 |
| 3.1  | Reflexão de um ponto $X$ em relação a uma reta conhecida $r$ . . . . .                        | 14 |
| 3.2  | Reta $r'$ perpendicular a $r$ que liga $X$ a $X'$ . . . . .                                   | 15 |
| 3.3  | Reflexão de um ponto $X$ em relação a um plano conhecido $P$ . . . . .                        | 17 |
| 3.4  | Reflexão de um ponto $X$ . . . . .  | 18 |
| 3.5  | Reflexão de um ponto $X$ . . . . .  | 19 |
| 3.6  | Representação das fontes virtuais encontradas até reflexões de segunda ordem                  | 21 |
| 3.7  | Exemplo de caso com fontes inaudíveis . . . . .   | 23 |
| 3.8  | Fontes inaudíveis gerando fontes audíveis . . . . .   | 24 |
| 3.9  | Resultado final do algoritmo . . . . .  | 25 |
| 3.10 | Cálculos de reverberação para sala quadrada . . . . .   | 27 |
| 4.1  | Método do <i>ray tracing</i> . . . . .  | 29 |
| 4.2  | Traçado dos caminhos de propagação através de feixes. . . . .                                 | 29 |
| 4.3  | Encontrando os segmentos ativos de cada ocluser . . . . .                                     | 31 |
| 4.4  | Encontrando a propagação de feixes . . . . .  | 31 |
| 4.5  | Traçando a árvore de feixes . . . . .   | 32 |
| 4.6  | Busca em pós-ordem na árvore de feixes . . . . .  | 33 |
| 4.7  | Divisão do ambiente em células convexas . . . . .   | 34 |
| 4.8  | Mapeamento da divisão dos feixes para dois ambientes convexas interligados                    | 35 |



|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.9  | A transformação de um ponto para o espaço dual leva a uma reta. . . . .                          | 37 |
| 4.10 | A transformação de um segmento de reta para o espaço dual leva a um feixe. . . . .               | 37 |
| 4.11 | Encontrando as funções de visibilidade . . . . .   | 39 |
| 4.12 | Passo-a-passo para encontrar uma função de visibilidade . . . . .                                | 40 |
| 4.13 | Mudança do segmento ativo . . . . .  | 41 |
| 4.14 | Entrada da posição da fonte e sua representação no espaço dual . . . . .                         | 42 |
| 4.15 | Diagrama em blocos das etapas percorridas para se chegar às informações de reverberação. . . . . | 43 |
| 4.16 | Representação completa no espaço paramétrico: obstáculos, fonte e ouvinte. . . . .               | 44 |
| 5.1  | Teste do método das imagens para reflexões até a segunda ordem em salas triangulares. . . . .    | 47 |
| 5.2  | Teste do método das imagens para salas quadradas até terceira ordem. . . . .                     | 48 |
| 5.3  | Caso onde várias fontes audíveis são geradas a partir de fontes inaudíveis . . . . .             | 48 |

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Contextualização

Atualmente, existem diversas formas de se dar ao ouvinte uma noção de espacialidade do som. As soluções comerciais mais difundidas são a de som estéreo e *surround-sound*. Além dessas, existem soluções que lidam com aspectos mais complexos e envolvem técnicas de processamento digital de sinais, para que seja possível criar uma noção de espacialidade mais completa, incluindo não só o efeito lateral como também a sensação de elevação da fonte sonora. Nesse caso, utilizam-se cálculos envolvendo as funções de transferência relacionadas à cabeça (HRTFs), conforme descrito em [1].

As técnicas envolvendo HRTFs podem ser utilizadas, de maneira diferente em cada caso, para dar ao ouvinte a sensação de espacialidade através de caixas acústicas ou de fones-de-ouvido.

No entanto, nas soluções citadas anteriormente, a geração do som tridimensional leva em consideração apenas o caminho direto entre a fonte sonora e o ouvinte. Isso impõe uma limitação ao sistema, pois não leva em consideração os efeitos da imersão de tais elementos em um ambiente fechado, como uma sala. Neste caso, para que a noção de espacialidade seja recriada, é essencial a inclusão das alterações provocadas pelo ambiente sobre o som em questão. Tais alterações decorrem principalmente das reflexões do som nos anteparos que possam existir, tais como paredes e outros objetos. Na Figura 1.1 pode-se notar esse efeito. A onda sonora que parte da fonte pode se refletir em diversos obstáculos e chegar ao ouvinte através de diferentes percursos. Naquela figura percebemos alguns percursos: o direto, o de primeira ordem e o de segunda ordem, que são os primeiros dos diferentes

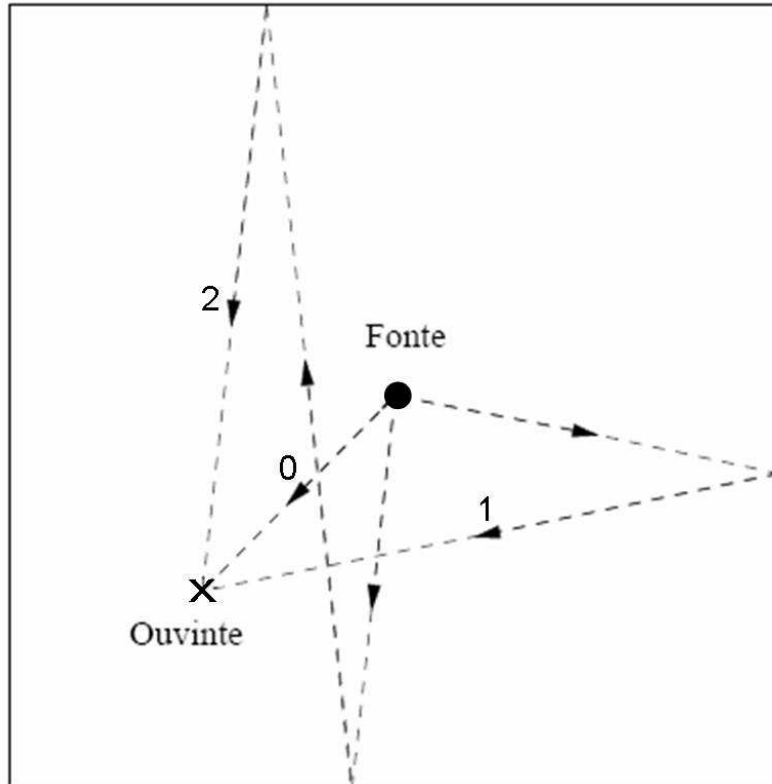


Figura 1.1: Exemplo de caminhos percorridos pelo som entre fonte e ouvinte: 0 representa o percurso direto entre fonte e ouvinte, enquanto que os caminhos 1 e 2 indicam exemplos que ocorrem após uma e duas reflexões, respectivamente.

percursos executados pela frente sonora. Esses percursos são determinados pela geometria do ambiente.

Uma rápida análise faz com que se conclua que existem infinitos percursos possíveis entre fonte sonora e ouvinte. Para que seja possível recriar de forma prática o efeito decorrente destas reflexões, deve-se adotar um critério para limitar o número de percursos calculados e, por conseguinte, as diferentes frentes de onda sonora que chegam ao ouvinte, com diferentes direções e intensidades e em diferentes instantes de tempo.

Essas reflexões podem ser separadas em duas categorias, ilustradas na Figura 1.2 [2]:

- Primeiras reflexões (*early reverberation*) - São compostas por ondas sonoras refletidas nos objetos existentes e se diferenciam da frente de onda original tanto em direção quanto no tempo. Nessa fase a densidade de eventos sonoros é tal que o ouvido humano é capaz de distinguir os caminhos independentemente, o que contribui para o conhecimento das informações espaciais do ambiente.

- Reflexões tardias (*late reverberation*) - São compostas pelas ondas sonoras refletidas que atingem o ouvinte tardiamente e interferem na percepção do som. Nessa fase tem-se uma resposta semelhante a um ruído com função de decaimento exponencial, de baixa potência. A densidade de eventos sonoros é tal que o ouvido humano não é capaz de distingui-los independentemente, e tal efeito usualmente é modelado por aproximações estatísticas, perceptuais.

A partir disso, pode-se definir um primeiro critério visando ao cálculo dos percursos referentes somente à primeira categoria de reflexões.

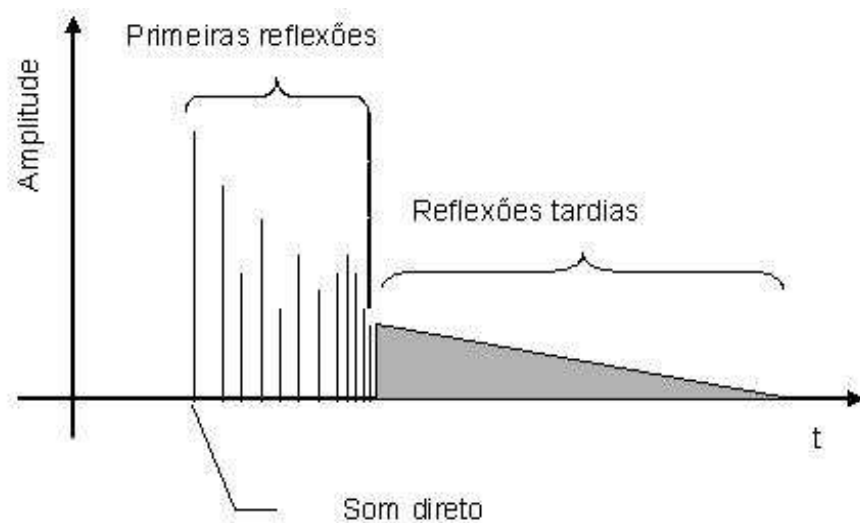


Figura 1.2: Separação das reflexões em categorias: as primeiras reflexões são uma repetição discreta do evento sonoro, enquanto que as reflexões tardias ocorrem de maneira difusa.

Para tornar possível a síntese sonora enriquecida com os efeitos das reflexões da onda sonora, torna-se necessário conhecer não apenas a posição da fonte sonora relativamente ao ouvinte, mas também o ambiente em que a fonte e o ouvinte estão imersos. O presente trabalho visa a estudar e implementar dois algoritmos para o cálculo dos diferentes caminhos feitos pelo som até que chegue ao ouvinte, sendo conhecido o ambiente onde se propaga o som. Para que os efeitos de reverberação possam ser incluídos nos sistemas de geração de som tridimensional em tempo real, deve-se ter como meta a menor complexidade possível dos algoritmos implementados, buscando-se todas as otimizações cabíveis.

## 1.2 Aplicações

A utilização de efeitos tridimensionais de som já é amplamente difundida na indústria de entretenimento. Atualmente, são facilmente encontrados jogos que utilizam tais efeitos; principalmente naqueles em perspectiva de primeira pessoa, onde o jogador está representado pelo personagem cujas ações está controlando, pode-se conseguir um realismo muito maior incluindo-se informações de ambientação do som.

Sempre se pôs o foco no aprimoramento da realidade gráfica nesse tipo de aplicação como determinante do interesse do público, mas já ficou demonstrado que investir no realismo sonoro eleva dramaticamente o padrão de qualidade atribuído pelos usuários ao produto.

Não só a indústria de jogos eletrônicos pode utilizar tais técnicas. Há alguns anos notou-se uma espécie de revolução nas salas de cinema brasileiras. Naquele momento, as maiores mudanças ocorridas foram decorrentes da busca de melhor qualidade de som, apostando em técnicas derivadas do som estéreo. Começava-se a utilizar o som *surround*, multi-caixas e outras variações. A indústria cinematográfica é, portanto, mais um campo onde se encontra aplicação para a síntese de reverberação sonora juntamente com o posicionamento.

Ainda no campo de som tridimensional, vale citar uma nova técnica, chamada *Dolby Virtual Speaker* [3], lançada pelo laboratório *Dolby*, que permitiria criar os mesmos efeitos de um sistema dotado de 5.1 canais utilizando apenas duas caixas acústicas, no lugar de 6. Para isso são calculados modelos considerando a suposta posição do ouvinte e a sua localização em relação às caixas acústicas.

Com essa técnica é possível obter resultados bem mais próximos aos reais sem abrir mão do conforto e da praticidade das caixas acústicas, em oposição ao uso de fones-de-ouvido.

Inúmeras outras aplicações podem ser pensadas como extensão das já citadas; dentre elas, pode-se citar a utilização de efeitos em gravações de shows e concertos em CDs e DVDs para conferir ao usuário a sensação de estar presente no local da gravação.

## 1.3 Objetivos

Este projeto tem como principal objetivo realizar um estudo comparativo de duas diferentes técnicas de síntese de reverberação sonora, e em seguida estudar a viabilidade de adição dessas técnicas a um sistema de geração de som tridimensional. A Figura 1.3 mostra um esquema geral de como é gerado o som com informações de espacialidade.

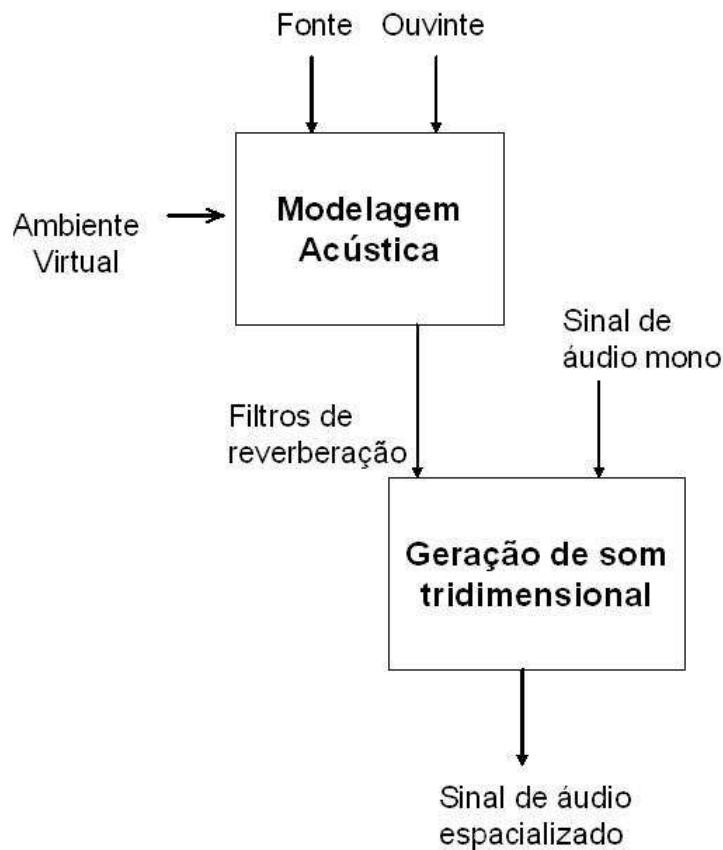


Figura 1.3: Esquema geral de um sistema para geração de som espacial.

Pretende-se avaliar a complexidade dos algoritmos que implementam cada uma das técnicas, bem como levantar vantagens e desvantagens de cada um. O desempenho desses métodos será aferido para ambientes em duas dimensões, o que é suficiente para chegar aos objetivos desejados.

Optou-se por considerar apenas os efeitos da *early reverberation*, que portanto é o tema de interesse do projeto. A *late reverberation* não será considerada, mas poderia ser modelada a partir de modelos estatísticos.

## 1.4 Organização do trabalho

O presente trabalho foi dividido em duas grandes partes. Na primeira será abordado o método de síntese de reverberação sonora a partir do método das imagens proposto por J. Borish [4]. Será feita uma explicação sobre o funcionamento do método, além de uma exposição dos princípios e das transformações geométricas utilizadas. A partir disso, será desenvolvido um algoritmo para a implementação do método utilizando duas dimensões e

então far-se-á uma discussão dos resultados obtidos. O mesmo roteiro pode ser seguido para a utilização do método em três dimensões.

A segunda parte do trabalho propõe-se a estudar uma técnica mais recente para a síntese de reverberação. O método desenvolvido em [5] será analisado e explicado; então, será mostrada uma implementação sua para duas dimensões.

Em seguida será feita a comparação do desempenho dos métodos expostos.

# Capítulo 2

## Noções de Espacialidade

Antes de passar aos métodos utilizados para simular os efeitos de reverberação, faz-se necessário expor como tal efeito é gerado, além de como este fenômeno é interpretado pela audição humana.

Para uma correta compreensão dos fatores envolvidos na síntese de som tridimensional, deve-se levar em consideração duas características inerentes a ele:

1. Posicionamento
2. Ambientação

Tais características são percebidas pelo cérebro humano por conta de inúmeros fenômenos que ocorrem na propagação do som. Para que seja possível produzir artificialmente som tridimensional, de modo a dar ao ouvinte a impressão de posicionamento da fonte sonora no espaço, deve-se conhecer tais fenômenos e buscar modelos que permitam recriá-los.

Os elementos que devem ser considerados nesta síntese são os seguintes:

- Atenuação com a distância - Sabe-se [6] que o som sofre uma atenuação de 6dB na sua intensidade com a duplicação da distância percorrida. O nível de intensidade sonora (NIS), em função da distância percorrida, é dado por:

$$\text{NIS}(d) = \text{NIS}_{\text{base}} - 6 \log_2 \frac{d}{d_{\text{base}}},$$

onde  $\text{NIS}(d)$  representa o nível de intensidade sonora a uma distância  $d$  e  $\text{NIS}_{\text{base}}$  representa o nível de intensidade sonora a uma distância  $d_{\text{base}}$  da fonte sonora, tomado como nível de referência.



- Absorção de altas frequências - Este efeito, também conhecido como dispersão atmosférica, atua como um filtro passa-baixas com frequência de corte proporcional à distância percorrida pela onda sonora. Este efeito é observado principalmente para distâncias de propagação superiores a 15 metros, e pode-se obter a frequência de corte ( $F_{\text{corte}}$ ) deste filtro por [6]:

$$F_{\text{corte}} = F_{\text{max}} - (d - 15)\Delta f,$$

sendo  $d$  a distância percorrida pelo som,  $F_{\text{max}}$  a frequência de corte máxima do filtro e  $\Delta f$  a variação da frequência de corte por metro.

- Atraso com a distância - Sabendo que a velocidade de propagação do som no ar é de aproximadamente 340 m/s, verifica-se que existe um atraso inerente ao som, dependendo da distância percorrida, dado por:

$$\Delta t(d) = \frac{d}{c},$$

onde  $c$  é a velocidade de propagação do som no ar, aproximadamente igual a 340 m/s para uma temperatura ambiente de 25°C, e  $t$  é o tempo que a onda sonora leva para percorrer a distância  $d$ .

- *ILD (Interaural Level Difference)* - A diferença de nível interaural é a diferença das intensidades das frentes de onda que chegam a cada uma das orelhas. Esta diferença de nível ocorre, principalmente, por causa da sombra que a cabeça do ouvinte cria para as orelhas.
- *ITD (Interaural Time Difference)* - A diferença de tempo interaural decorre das diferentes distâncias percorridas pela frente de onda sonora até atingir cada uma das orelhas.
- Pina auricular - A pina auricular (parte externa da orelha) atua como um conjunto de filtros, preparando o som para que seja analisado pelo cérebro. Os efeitos da pina devem ser recriados em um sistema que gere sinais binaurais (para utilização com fones-de-ouvido).
- Efeito *Doppler* - Quando existe movimento relativo entre o ouvinte e a fonte, o que se observa é que a frequência da onda que chega ao ouvinte é diferente daquela emitida

pela fonte. Quando existe uma aproximação entre os dois, percebe-se um aumento na frequência do som; quando há um afastamento, acontece o oposto. A variação entre a frequência  $f_O$  do sinal emitido e a frequência  $f_R$  do sinal recebido pode ser expressada da seguinte forma:

$$\Delta_{\text{Doppler}} = \frac{f_R}{f_O} = \frac{1 - \frac{n \cdot v_O}{c}}{1 - \frac{n \cdot v_S}{c}},$$

onde  $v_S$  é a velocidade da fonte sonora,  $v_O$  é a velocidade do ouvinte e  $n$  indica a direção de movimento entre fonte e ouvinte: se a distância entre os dois estiver aumentando utiliza-se  $n = 1$ ; caso esteja diminuindo, utiliza-se  $n = -1$ .

- Reverberação - Este efeito é muito importante para a sensação de realismo do som gerado, principalmente em eventos sonoros que ocorrem em ambientes fechados. É gerado pela reflexão das ondas sonoras em anteparos e a absorção ocorrida em cada uma dessas reflexões, dependendo, portanto, das características do ambiente, da posição da fonte e da posição do ouvinte.

## 2.1 Alguns modelos

### 2.1.1 Posicionamento

Dar ao ouvinte a impressão de posicionamento de uma fonte sonora é o primeiro passo para se conseguir o efeito de tridimensionalidade do som. Abaixo serão expostas brevemente algumas das soluções encontradas na literatura.

#### 2.1.1.1 Estéreo e *Surround*

O sistema estéreo, apresentado primeiramente por Clément Ader em 1881, é o que permite dar ao ouvinte uma mínima noção de espacialidade do som, podendo posicionar a fonte sonora em uma região limitada do espaço, como se vê na Figura 2.1.

Para isto, são utilizadas caixas acústicas com canais monoaurais independentes, mas relacionados. A partir da diferença de nível e fase dos sinais de cada um desses canais, é possível criar a sensação de posição de uma fonte sonora. Apesar de ser mais comum a apresentação desse sistema com dois canais, pode-se utilizar um número qualquer de canais, como os sistemas multicanal 5.1 e 6.1, muito utilizados em produções cinematográficas. À

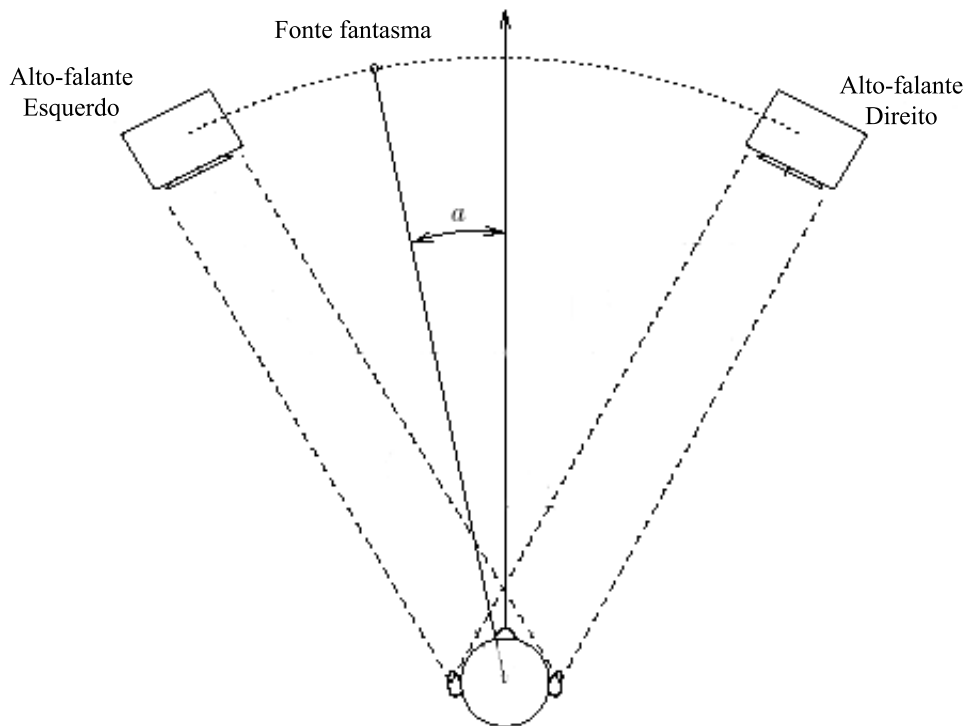


Figura 2.1: Sistema Estéreo: geração de uma fonte virtual (fantasma) entre duas caixas acústicas.

primeira solução, com duas caixas acústicas, dá-se o nome de sistema estéreo, enquanto que à segunda é atribuído o nome de som *surround*.

Utilizando-se fones-de-ouvido em vez de caixas acústicas, a princípio também se pode simular a presença de uma fonte sonora em uma posição relativa ao ouvinte.

### 2.1.1.2 HRTF (*Head-Related Transfer Function*)

As HRTFs são filtros que modelam os efeitos da cabeça e da pina na propagação do som. Para cada direção de propagação desejada, uma diferente HRTF deve ser aplicada para gerar o som tridimensional.

Um boneco do conjunto torso-cabeça com orelhas equipadas com microfones implantados permite fazer a medição das HRTFs para fontes localizadas em diversas posições. Em seguida, para se obter as HRTFs para outras posições, podem-se utilizar técnicas que interpolem as funções medidas.

O uso de HRTFs gera resultados bastante realísticos no que diz respeito ao posicionamento da fonte sonora. Originalmente, seu emprego foi idealizado para soluções binaurais com fones-de-ouvido, mas já existem soluções baseadas em HRTFs no contexto de caixas

acústicas.

## 2.1.2 Reverberação

Diversos métodos foram propostos para se chegar a uma síntese eficiente de reverberação sonora. Apesar da evolução dos métodos, estes continuam apresentando um alto custo computacional; por isso são usados apenas para a síntese da *early reverberation*, que ocorre aproximadamente até os primeiros 80ms após o evento sonoro. A *late reverberation* é aproximada por modelos estatísticos e perceptivos.

### 2.1.2.1 Método das imagens

Este método não leva em consideração a natureza ondulatória da propagação do som, já que utiliza um tratamento puramente geométrico. Desta forma, o conceito de onda é substituído pelo de raios sonoros, não permitindo modelar efeitos como a difração e a refração das ondas sonoras. Esta aproximação é equivalente a considerar que o comprimento das ondas sonoras é muito pequeno em relação aos obstáculos do ambiente, ou seja, a fidelidade é maior para frequências mais altas.

Para chegar às informações de reverberação através do método das imagens, deve-se encontrar a imagem da fonte original refletida em relação a cada um dos anteparos existentes na sala. Para melhor compreensão, pode-se fazer uma analogia direta com a reflexão de um objeto em um espelho.

Cada imagem gerada vai dar origem, também, a uma nova frente de onda, partindo de uma nova direção e com uma distância maior para o ouvinte. Estas características se traduzem em frentes de onda chegando em momentos diferentes ao ouvinte, vindo de diferentes direções. A princípio, essas são as informações básicas de que um sistema necessita para fazer a síntese da reverberação.

Este método será objeto de estudo do Capítulo 3.

### 2.1.2.2 *Beam tracing* - O traçado de feixes

Este método busca uma alternativa para se encontrar as informações de reverberação de uma forma mais eficiente que o método das imagens. Ele utiliza o conceito de feixes de ondas sonoras para poder mapear quais obstáculos são atingidos e, conseqüentemente, quais são aqueles que influenciarão nas reflexões das ondas sonoras.

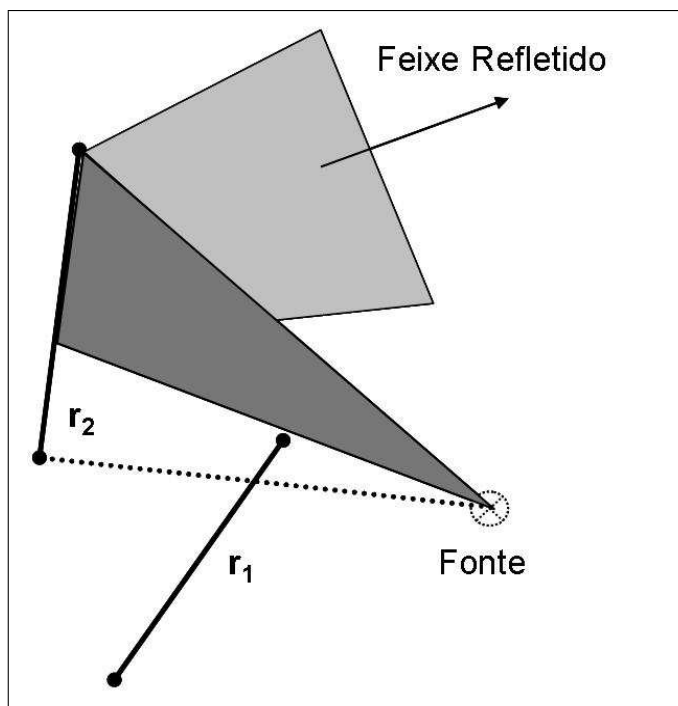


Figura 2.2: Oclusão de um obstáculo por outro: o obstáculo  $r_1$  causa uma sombra no obstáculo  $r_2$  utilizado para reflexão do feixe.

Resumidamente, o que é feito é analisar como os feixes de som se propagam no ambiente em questão e qual o comportamento desses feixes ao atingirem um obstáculo. Deve-se estudar a reflexão e a divisão desses feixes, pois somente depois de conhecer os obstáculos atingidos é que serão feitas as reflexões da fonte sonora para se encontrar cada uma das fontes virtuais de interesse.

Esse método permite que sejam tratados os casos em que um obstáculo causa uma sombra em outro obstáculo, conforme se vê na Figura 2.2. Além disso, também é possível utilizar essa técnica para se modelar os fenômenos físicos da difração e da refração das ondas sonoras.

Como será visto posteriormente, a estruturação das etapas envolvidas nesta técnica permite um processamento mais eficiente. Isto acontece porque parte dos cálculos não precisa ser refeita mesmo que haja uma modificação do ambiente em questão. Assim, este método se torna uma boa escolha para casos onde existe, por exemplo, a movimentação do ouvinte.

Este método será objeto de estudo do Capítulo 4.

# Capítulo 3

## Método das Imagens

### 3.1 Exposição do método

O método das imagens [4] calcula as posições das imagens virtuais da fonte sonora e utiliza essas posições para obter as características das diferentes frentes de onda que chegam ao ouvinte. Para isto, faz-se necessário conhecer *a priori* as coordenadas do ambiente onde a fonte está imersa, bem como as coordenadas da própria fonte e do ouvinte.

Uma vez que todas essas informações sejam conhecidas, são feitas múltiplas reflexões desta fonte em relação a cada um dos anteparos do ambiente até que um determinado critério de parada seja atingido. O limite deste cálculo pode ser definido pelo número máximo de reflexões desejadas ou pelo atraso máximo que se deseja entre o som direto e o som refletido.

O segundo critério se mostra mais adequado, pois independe das dimensões do ambiente para modelar a *early reflection* apropriadamente; por isso será utilizado no nosso algoritmo.

Para a implementação deste algoritmo, é necessário conhecer a transformação que deve ser aplicada a um ponto para se chegar às coordenadas de um ponto refletido em relação a um dado anteparo. Em 3.2.1 e 3.2.2 será demonstrada esta transformação para duas e três dimensões, respectivamente.

## 3.2 Conceitos matemáticos

### 3.2.1 Duas dimensões

Queremos chegar à transformação que se deve aplicar a um ponto  $X$  de coordenadas conhecidas  $(x_0, y_0)$  para chegarmos às coordenadas do ponto  $X'$  de coordenadas  $(x_1, y_1)$ , sendo este ponto  $X'$  a imagem obtida por espelhamento do ponto em relação à reta  $r$ , de equação  $ax + by + c = 0$ , conforme a Figura 3.1.

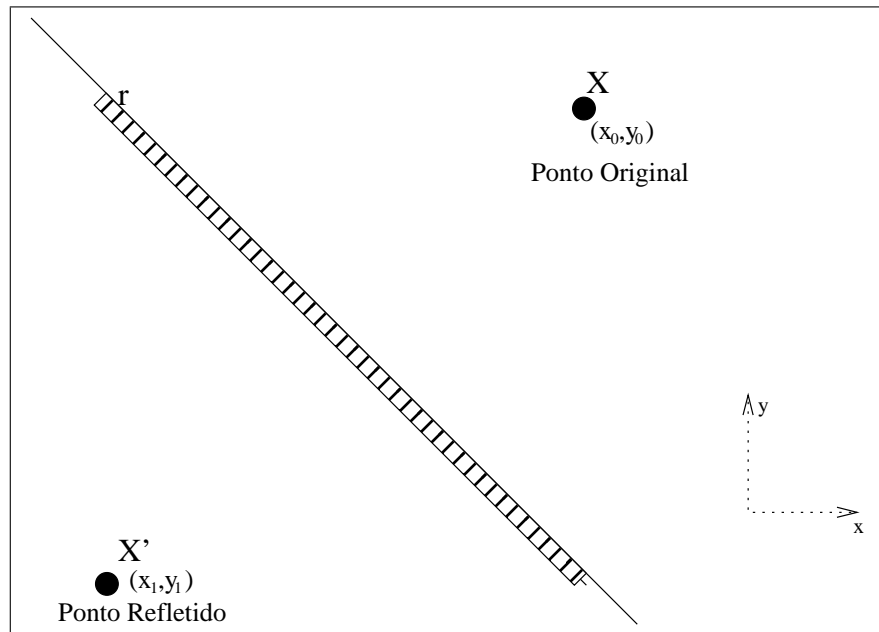


Figura 3.1: Reflexão de um ponto  $X$  em relação a uma reta conhecida  $r$ .

Podemos manipular a equação da reta  $r$  para chegarmos a sua forma reduzida:

$$r : y = -\frac{a}{b}x - \frac{c}{b}. \quad (3.1)$$

Existe uma única reta  $r'$  perpendicular a  $r$  que liga os pontos  $X$  e  $X'$ , conforme a Figura 3.2. Para obtermos a equação desta reta, podemos aplicar o fato de o produto dos coeficientes angulares destas duas retas dever ser igual a  $-1$ . Assim, temos:

$$\begin{aligned} r' : y &= mx + n \\ m \cdot -\frac{a}{b} &= -1 \Rightarrow m = \frac{b}{a} \\ r' : y &= \frac{b}{a}x + n. \end{aligned} \quad (3.2)$$

O ponto  $X$  é conhecido e pertence à reta  $r'$ ; substituindo em (3.2), temos:

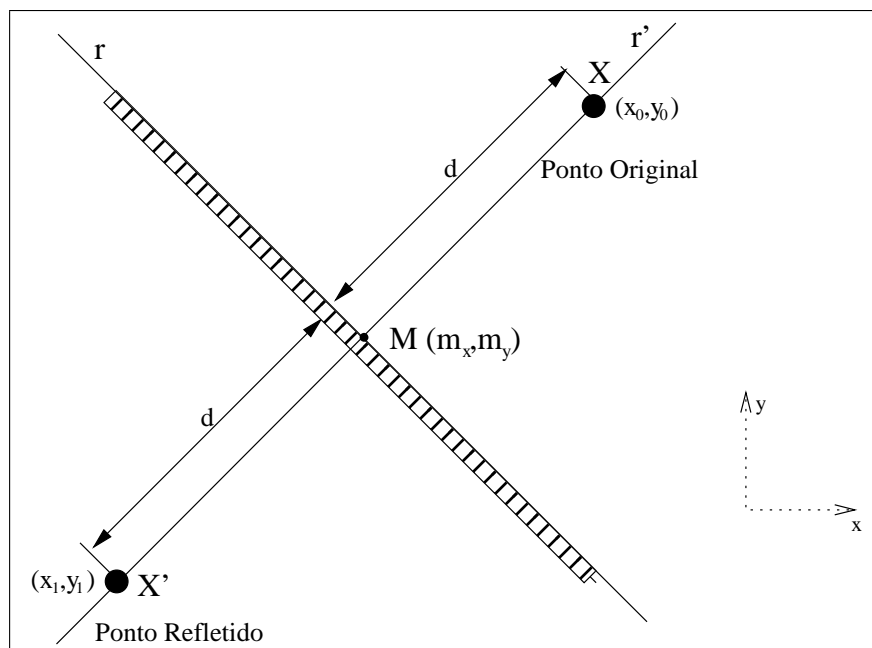


Figura 3.2: Reta  $r'$  perpendicular a  $r$  que liga  $X$  a  $X'$ .

$$r' : y_0 = -\frac{b}{a}x_0 + n.$$

Logo:

$$n = -\frac{b}{a}x_0 + y_0.$$

Finalmente, temos a equação da reta perpendicular a  $r$  passando pelo ponto  $X$ :

$$r' : y = -\frac{b}{a}x - \frac{b}{a}x_0 + y_0. \quad (3.3)$$

Igualando (3.1) e (3.3) podemos encontrar as coordenadas do ponto  $M(m_x, m_y)$  de interseção entre as duas retas:

$$m_x = \frac{b^2x_0 - aby_0 - ac}{a^2 + b^2} \quad (3.4)$$

$$m_y = \frac{a^2y_0 - abx_0 - bc}{a^2 + b^2}. \quad (3.5)$$

Conhecidas as coordenadas do ponto  $M$ , é possível obter as coordenadas do ponto desejado. Basta lembrar que a distância entre  $X$  e  $M$  deve ser igual à distância entre  $M$  e  $X'$ , ou seja:

$$\Delta x = m_x - x_0$$



$$\Delta y = m_y - y_0,$$

de onde se tira:

$$x_1 = m_x + \Delta x = 2m_x - x_0$$

$$y_1 = m_y + \Delta y = 2m_y - y_0.$$

Concluindo, tem-se que:

$$x_1 = \frac{(b^2 - a^2)x_0 - 2aby_0 - 2ac}{a^2 + b^2} \quad (3.6)$$

$$y_1 = \frac{(a^2 - b^2)y_0 - 2abx_0 - 2bc}{a^2 + b^2}. \quad (3.7)$$

### 3.2.2 Três dimensões

Para um ambiente modelado em três dimensões, tomam-se a fonte sonora por um ponto e os anteparos por planos. Será utilizado um roteiro similar àquele utilizado para duas dimensões, com o objetivo de se chegar à transformação que, aplicada a um ponto  $X$  de coordenadas  $(x_0, y_0, z_0)$ , fornece as coordenadas do ponto  $X'$ ,  $(x_1, y_1, z_1)$ , refletido em relação a um plano  $P$ , como mostra a Figura 3.3.

Primeiramente, é necessário encontrar a equação da reta  $r'$ , perpendicular ao plano  $P$  de equação  $ax + by + cz + d = 0$ . Para isso, fazem-se necessárias algumas considerações.

Dado um ponto qualquer no espaço, de coordenadas  $(x, y, z)$ , pode-se obter um vetor  $\hat{u}$  que aponte para o ponto  $X$  fazendo-se:

$$\hat{u} = (x - x_0, y - y_0, z - z_0). \quad (3.8)$$

Sabe-se que dado um plano de equação  $ax + by + cz + d = 0$ , o vetor dado por  $\hat{v} = (a, b, c)$  é perpendicular a ele. Para que o vetor  $\hat{u}$  seja perpendicular ao plano, deve-se fazer, conforme ilustrado na Figura 3.4,

$$\hat{u} = t\hat{v}. \quad (3.9)$$

Utilizando as equações (3.8) e (3.9) chega-se à seguinte seqüência de igualdades:

$$x = x_0 + ta \quad (3.10)$$

$$y = y_0 + tb \quad (3.11)$$

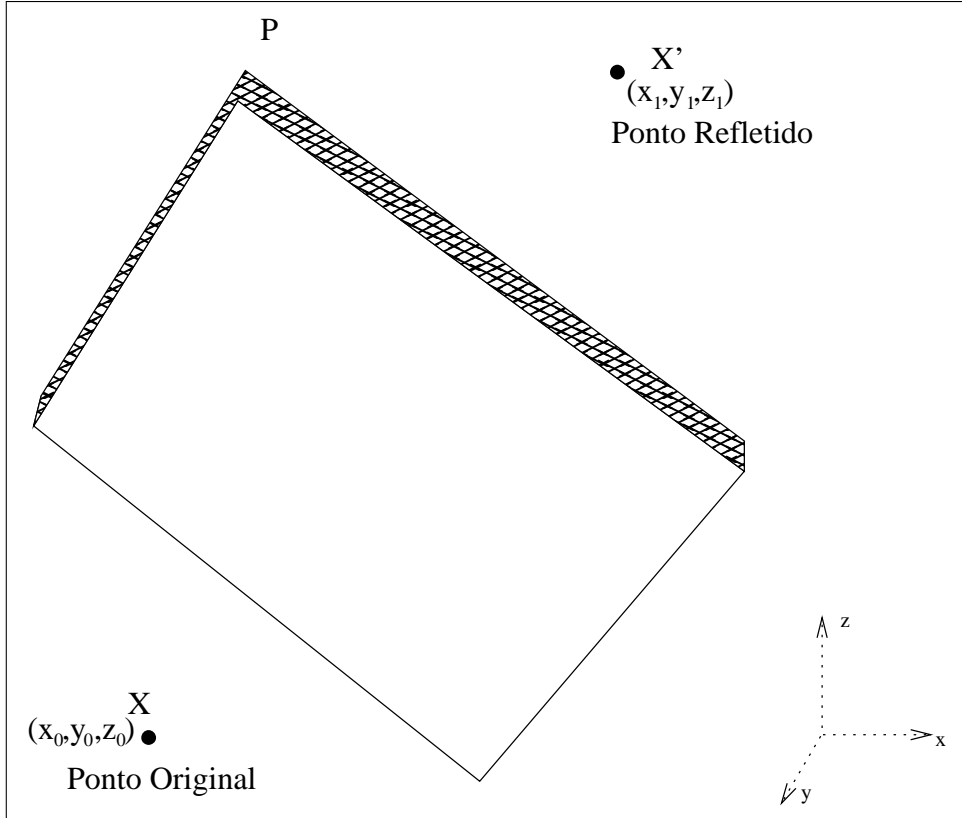


Figura 3.3: Reflexão de um ponto  $X$  em relação a um plano conhecido  $P$ .

$$z = z_0 + tc. \quad (3.12)$$

Vale ressaltar que esse conjunto de equações define uma reta,  $r'$ , no  $\mathbb{R}^3$  (ver Figura 3.5). Substituindo (3.10), (3.11) e (3.12) na equação do plano, obtém-se que:

$$t = \frac{-ax_0 - by_0 - cz_0 - d}{a^2 + b^2 + c^2}. \quad (3.13)$$

Nota-se que com as manipulações feitas até aqui, podemos obter os valores do ponto pertencente ao plano  $P$  interceptado pela reta  $r'$  que liga  $X$  a  $X'$ . Para isto basta substituir o valor encontrado para  $t$  (3.13) em (3.10), (3.11) e (3.12). Chamaremos de  $M$ , com coordenadas  $(m_x, m_y, m_z)$ , o ponto de interseção de  $r'$  com o plano  $P$ :

$$m_x = \frac{(b^2 + c^2)x_0 - aby_0 - acz_0 - ad}{a^2 + b^2 + c^2} \quad (3.14)$$

$$m_y = \frac{(a^2 + c^2)y_0 - abx_0 - bcz_0 - bd}{a^2 + b^2 + c^2} \quad (3.15)$$

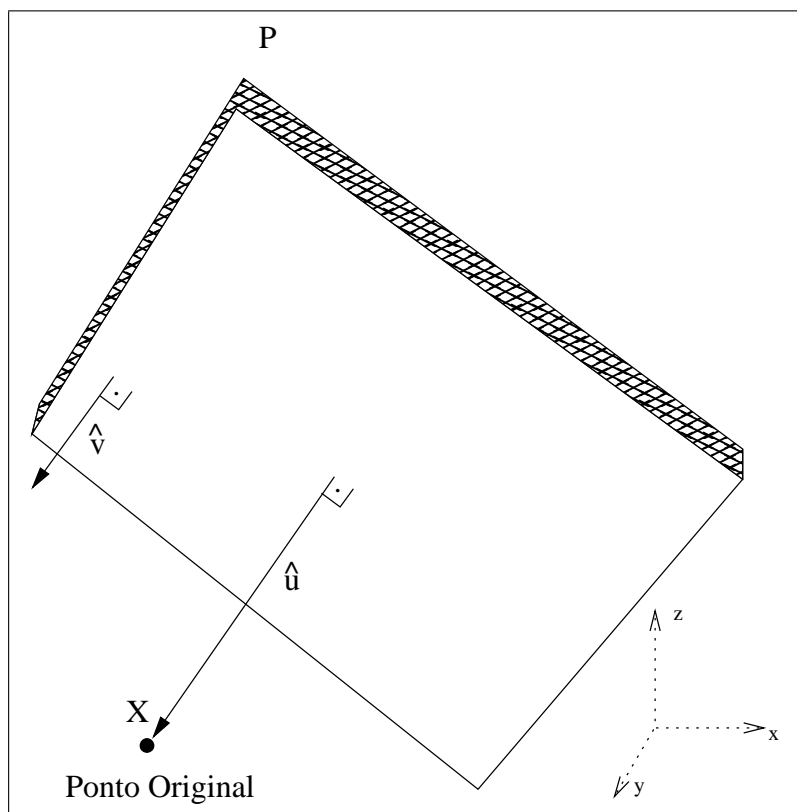


Figura 3.4: Reflexão de um ponto  $X$ : a partir do vetor  $\hat{v}$ , pode-se chegar ao vetor  $\hat{u}$  que aponta para  $X$  perpendicularmente ao plano  $P$ .

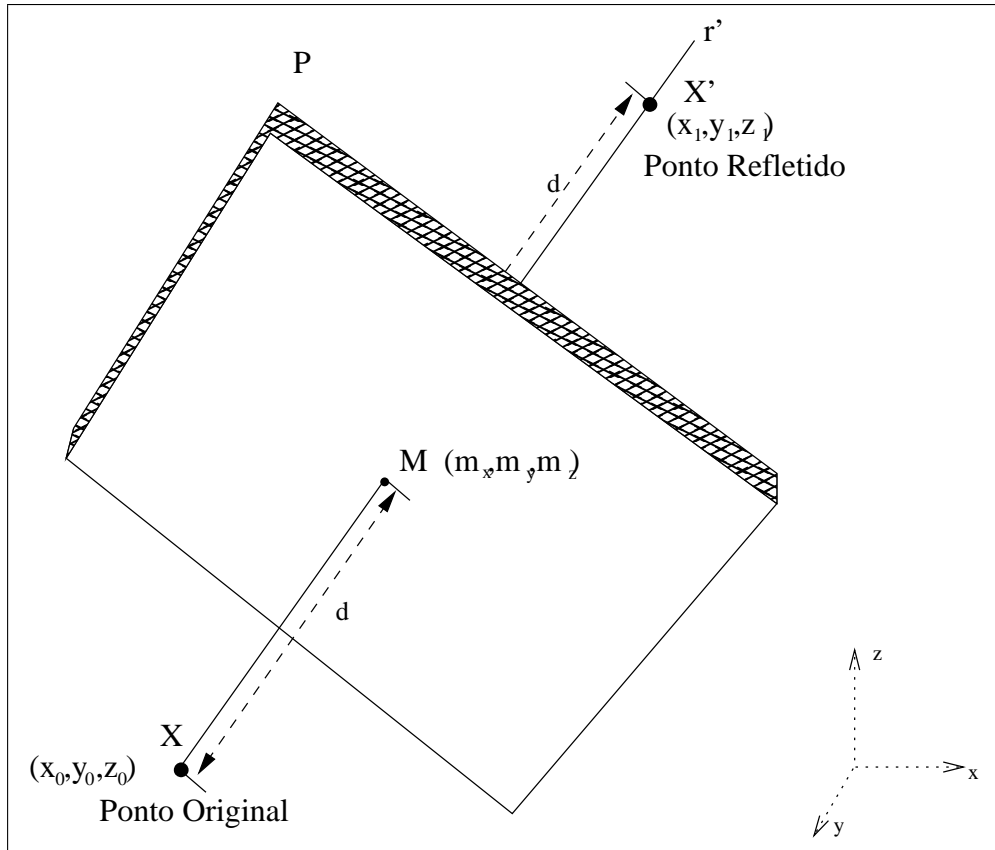


Figura 3.5: Reflexão de um ponto  $X$ : reta  $r'$  perpendicular a  $P$  que liga  $X$  e  $X'$ .

$$m_z = \frac{(a^2 + b^2)z_0 - acx_0 - bcy_0 - cd}{a^2 + b^2 + c^2}. \quad (3.16)$$

Conhecidas as coordenadas do ponto  $M$ , é possível obter as coordenadas do ponto desejado. Basta lembrar que a distância entre  $X$  e  $M$  deve ser igual à distância entre  $M$  e  $X'$ , ou seja:

$$\Delta x = m_x - x_0$$

$$\Delta y = m_y - y_0$$

$$\Delta z = m_z - z_0,$$

de onde se tira:

$$x_1 = m_x + \Delta x = 2m_x - x_0$$

$$y_1 = m_y + \Delta y = 2m_y - y_0$$

$$z_1 = m_z + \Delta z = 2m_z - z_0.$$

Finalmente:

$$x_1 = \frac{(b^2 + c^2 - a^2)x_0 - 2aby_0 - 2acz_0 - 2ad}{a^2 + b^2 + c^2} \quad (3.17)$$

$$y_1 = \frac{(a^2 + c^2 - b^2)y_0 - 2abx_0 - 2bcz_0 - 2bd}{a^2 + b^2 + c^2} \quad (3.18)$$

$$z_1 = \frac{(a^2 + b^2 - c^2)z_0 - 2acx_0 - 2bcy_0 - 2cd}{a^2 + b^2 + c^2}. \quad (3.19)$$

### 3.3 Descrição do algoritmo

Para implementação do algoritmo, em duas dimensões, optou-se inicialmente por não se usar orientação a objetos, tendo em vista uma codificação rápida para verificar os primeiros resultados.

Em seguida, decidiu-se fazer uma implementação orientada a objetos, considerando que a maior escalabilidade permitida por esta solução seria importante para a futura expansão do algoritmo para três dimensões.

A partir do que foi exposto até aqui, já se sabe que o algoritmo implementado necessita da informação das posições do ouvinte e da fonte sonora, além das coordenadas da sala onde ambos estão imersos. Só a partir deste ponto é que se começa a calcular as informações de reverberação, encontrando-se as imagens da fonte sonora original.

Essa característica já é suficiente para impor ao sistema uma restrição quanto à movimentação da fonte sonora ou do ouvinte, pois caso haja uma mudança em uma dessas posições, todo o cálculo tem que ser refeito.

Por se tratar de uma implementação orientada a objetos, foram implementadas classes e métodos para facilitar o entendimento e o desenvolvimento. Mais adiante são detalhados e explicados os códigos destas classes.

Para se chegar às informações de reverberação a partir do método das imagens e encontrar os diversos caminhos percorridos pela frente sonora, é necessário calcular as imagens da fonte sonora. Conforme essas imagens são encontradas, faz-se necessário armazenar suas informações e características e seguir para o cálculo das demais imagens.

A quantidade de imagens pode variar de acordo com o cenário em questão, e por esse motivo utiliza-se no algoritmo uma lista encadeada; à medida que novas imagens são geradas, são adicionadas a essa lista.

O primeiro passo é, portanto, coletar os dados do ambiente onde ouvinte e fonte estão imersos. É criado um novo objeto e as dimensões da sala são guardadas nesse objeto, que é

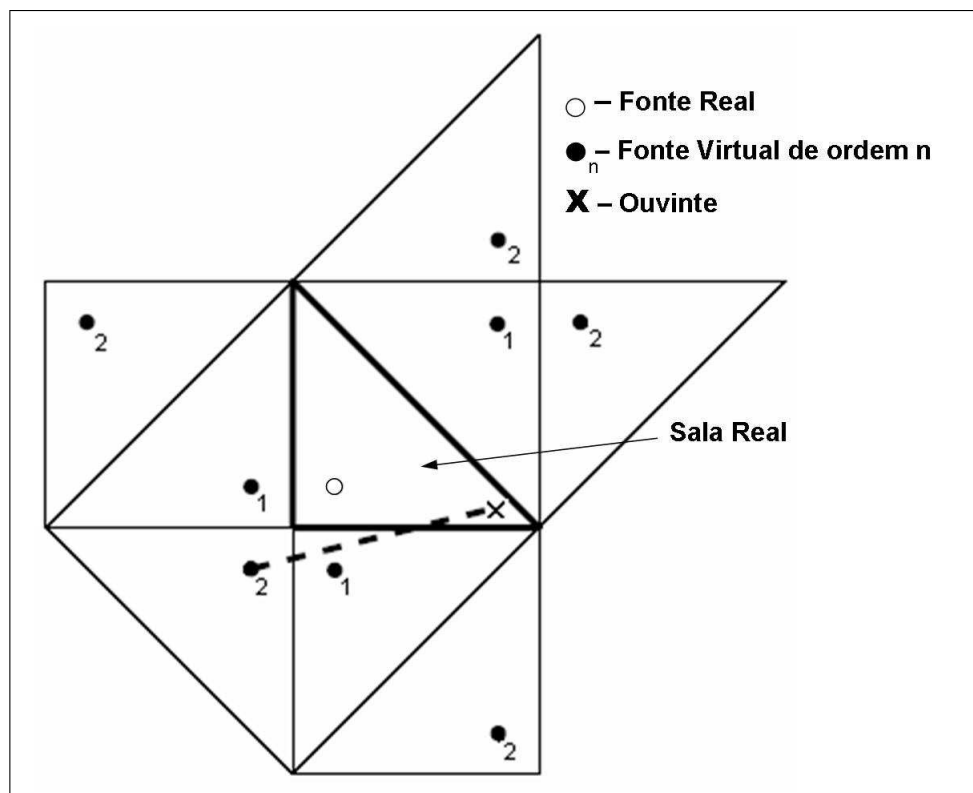


Figura 3.6: Representação das fontes virtuais encontradas até reflexões de segunda ordem. A linha tracejada é utilizada para se saber a direção de chegada do som ao ouvinte.

adicionado à lista encadeada. Para dar prosseguimento aos cálculos, obtém-se a posição da fonte sonora e do ouvinte.

Em seguida, para cada lado desta sala, deve-se calcular a imagem refletida desta fonte. Além da fonte sonora, também é necessário calcular a reflexão da própria sala em relação a estes lados, pois só assim é possível continuar calculando as imagens de ordem superior, conforme exemplificado na Figura 3.6. Nela se podem ver as reflexões de primeira ordem e as fontes de segunda ordem geradas a partir destas de primeira ordem, bem como o traçado que indica a direção de chegada ao ouvinte de uma das frentes de onda.

Cada lado da sala dará origem, portanto, a uma sala virtual contendo uma fonte sonora. Assim que essas informações são calculadas, devemos adicionar esta nova sala à lista encadeada.

Este algoritmo tem natureza recursiva, e a partir desse ponto os passos acima citados se repetem para cada sala virtual até que a fonte encontrada gere um atraso superior ao que ainda se considera *early reverberation*. Vemos no Quadro 3.1 um pseudocódigo que facilita a visualização da natureza recursiva desta solução.

---

**Quadro 3.1** Pseudocódigo para solução do método das imagens.

---

```
gerarImagens(sala)
{
  se (atraso < 80ms)
  {
    para cada lado
    {
      novaSala = criaImagem(sala,lado);
      novaFonte = criaImagem(sala,fonte);
      adicionaNaLista(novaSala,novaFonte);
      gerarImagens(novaSala);
    }
  }
}
```

---

### 3.3.1 Fontes inaudíveis

Durante o cálculo das imagens, é comum ocorrer o que recebe o nome de fonte inaudível ou fonte invisível. Essa denominação de “invisível” para uma fonte sonora resulta do fato de tais algoritmos de reverberação terem a mesma natureza dos utilizados para computação gráfica e seus cálculos de reflexão.

Como exemplificado na Figura 3.7, o caminho que une uma fonte inaudível ao ouvinte é um caminho que não é possível fisicamente, pois não cruza o lado utilizado para fazer a reflexão da fonte sonora. No algoritmo, essa característica é verificada ao se analisar se esta semi-reta intercepta o lado da sala que lhe deu origem.

Em um primeiro momento, poder-se-ia pensar em descartar tais fontes inaudíveis (e suas respectivas salas) assim que fossem encontradas. No entanto, isso não deve ser feito, pois ao se prosseguir calculando as reflexões desta fonte, pode-se chegar a uma fonte de ordem superior que descreva um caminho viável fisicamente, como vemos na Figura 3.8.

Somente ao fim do cálculo deve-se fazer uma varredura na lista das salas em busca daquelas que contenham fontes inaudíveis e, como tais fontes não contribuem para o som final, remover estas salas da lista.

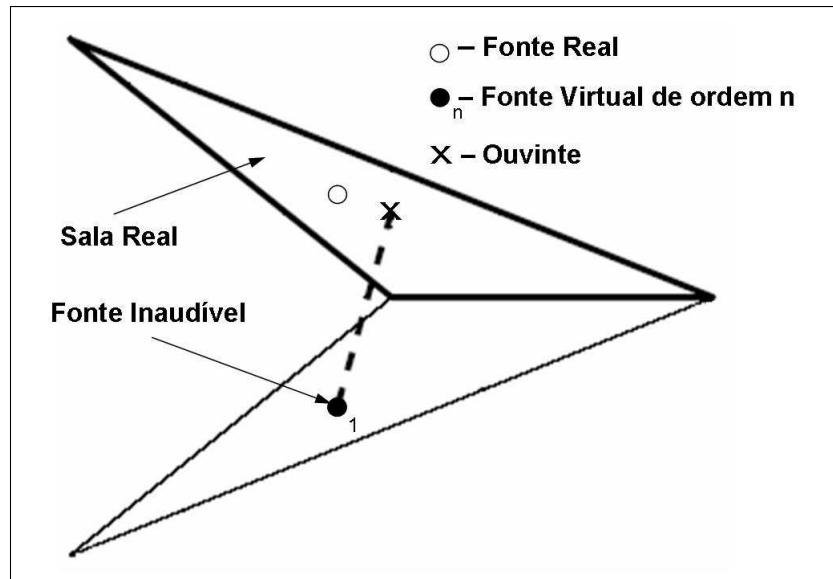


Figura 3.7: Exemplo de caso com fontes inaudíveis: a fonte virtual é considerada inaudível pois a reta que liga a fonte virtual ao ouvinte não passa pelo refletor que deu origem a esta fonte.

### 3.3.2 Organização dos dados de reverberação

Ao fim do processo exposto, já são conhecidas todas as fontes imagem que contribuem para o efeito final de reverberação, e podem-se obter facilmente a direção de chegada de cada frente de onda, seu atraso e a atenuação sofrida pela propagação e absorção nos obstáculos.

Para que seja possível utilizar tais informações em um sistema de geração de som tridimensional, deve-se utilizar uma estrutura preenchida com as informações relevantes, que servirá como interface entre os dois sistemas.

A estrutura escolhida para desempenhar a função de interface é um vetor com uma posição para cada amostra do som utilizado no teste. Cada posição deste vetor representa um instante do tempo de reprodução deste som.

Em cada uma dessas posições temos armazenadas as seguintes informações: número de frentes de onda atingindo o ouvinte, atraso e direção de chegada de cada uma dessas fontes, além da atenuação sofrida por cada uma delas.

### 3.3.3 Exemplificação

Para melhor entendimento, supondo um caso em que tenham sido encontradas 3 fontes que contribuem para o efeito de reverberação, obter-se-iam os seguintes dados:



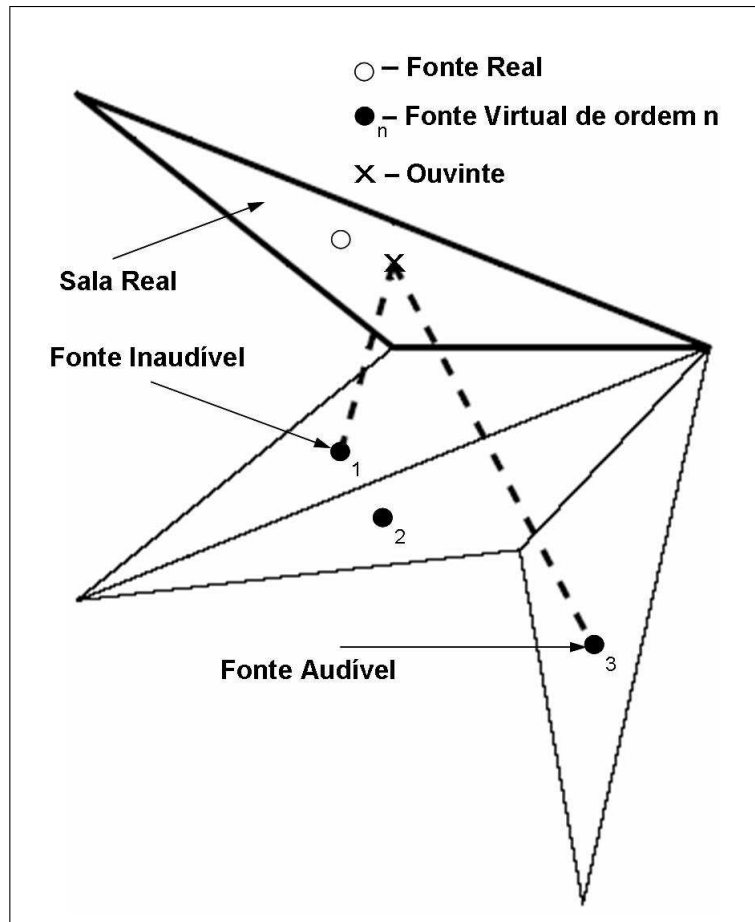


Figura 3.8: Fontes inaudíveis gerando fontes audíveis: não existe um caminho viável entre fonte e ouvinte para a reflexão de primeira ordem indicada; no entanto, ao se atingir uma reflexão de terceira ordem, chega-se a uma fonte audível.

- Fonte 1
  - ◇ Distância = 2 metros;
  - ◇ ângulo de incidência = 45 graus;
  - ◇ número de reflexões = 0.
- Fonte 2
  - ◇ Distância = 4 metros;
  - ◇ ângulo de incidência = 15 graus;
  - ◇ número de reflexões = 1.
- Fonte 3

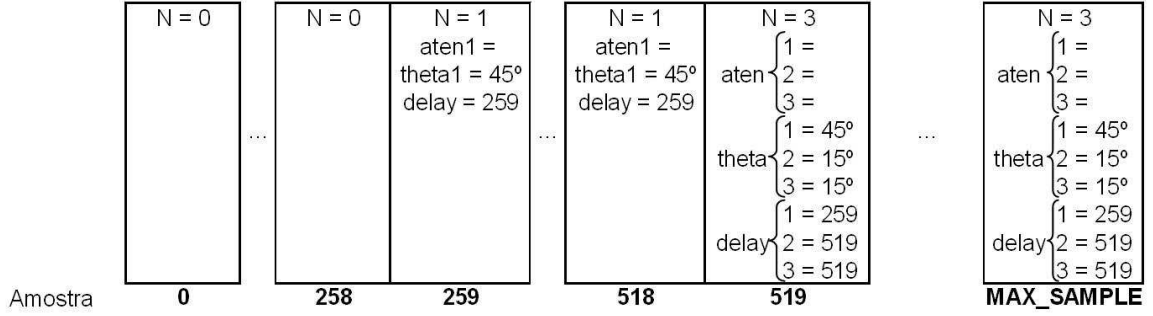


Figura 3.9: Resultado final do algoritmo: estrutura contendo todas as informações de reverberação necessárias para geração do áudio final.  $N$  representa o número de fontes ativas a cada instante.

- ◇ Distância = 4 metros;
- ◇ ângulo de incidência = -15 graus;
- ◇ número de reflexões = 1.

Utilizando-se uma taxa de amostragem de  $f_s = 44,1\text{kHz}$  e considerando-se a velocidade de propagação do som  $c = 340\text{m/s}$ , é possível encontrar o atraso, em número de amostras, entre o evento sonoro e o momento em que cada frente de onda encontra o ouvinte:

$$\Delta_{\text{Samples}} = f_s \cdot (d/c). \quad (3.20)$$

- Atraso 1  $\approx 259$  amostras
- Atraso 2  $\approx 519$  amostras
- Atraso 3  $\approx 519$  amostras

Assim, neste caso, a estrutura utilizada como interface deve possuir o aspecto representado na Figura 3.9.

Essas informações podem ser utilizadas, então, por um sistema de geração de som tridimensional a partir da utilização de HRTFs, técnica que já foi explicada no item 2.1.1.2.

### 3.4 Conclusões

A maior vantagem do método das fontes-imagem é a sua robustez, além da facilidade de sua implementação recursiva. Entretanto, esse método é computacionalmente muito custoso e geralmente sua complexidade cresce exponencialmente:  $O(n^r)$ , para  $r$  reflexões e  $n$

superfícies. Ao encontrar fontes invisíveis, não se pode descartá-las até o fim dos cálculos, já que estas podem gerar fontes-imagem válidas.

Para ambientes com geometria muito simplificada, por exemplo retangulares, essa técnica não se mostra vantajosa se utilizada num algoritmo desenvolvido para salas de geometria genérica. Em ambientes desse tipo, encontram-se diversas fontes virtuais repetidas e, no entanto, apenas uma delas representa uma seqüência fisicamente possível de reflexões da onda. A Figura 3.10 facilita a compreensão. Nela está representado um exemplo de fonte virtual de segunda ordem que pode ser obtida de duas maneiras diferentes. No entanto, deve-se atentar para o fato de que apenas uma das reflexões gerará uma fonte fisicamente viável e isso pode variar de acordo com a posição do ouvinte. Além disso, quando se prosseguir para as reflexões de terceira ordem, pode-se notar que cada uma das fontes indicadas só é viável através de diferentes fontes de primeira ordem.

Por conta disso, devem-se conhecer, durante os cálculos das fontes virtuais, todas as diferentes maneiras de se chegar a uma mesma fonte.

Por causa dessa característica, muitas fontes inaudíveis, idênticas à outra audível, são calculadas e armazenadas na lista, acarretando uma seqüência de operações desnecessárias.

Uma possível evolução do algoritmo seria tratar salas com ângulos retos diferentemente, buscando uma otimização do desempenho. Neste caso, por exemplo, poder-se-ia deixar de lado diversos testes de validação das fontes virtuais encontradas.

Outro ponto fraco de algoritmos que utilizam o princípio das fontes-imagem é que nenhum cálculo pode ser feito sem que antes sejam conhecidas as posições do ouvinte, da fonte e as dimensões da sala onde estão imersos. Sua utilização para recriar eventos com movimento da fonte sonora torna-se inviável, pois todos cálculos teriam que ser refeitos para cada mudança de posição.

O próximo método a ser abordado propõe algumas modificações que facilitam sua utilização nesses casos.

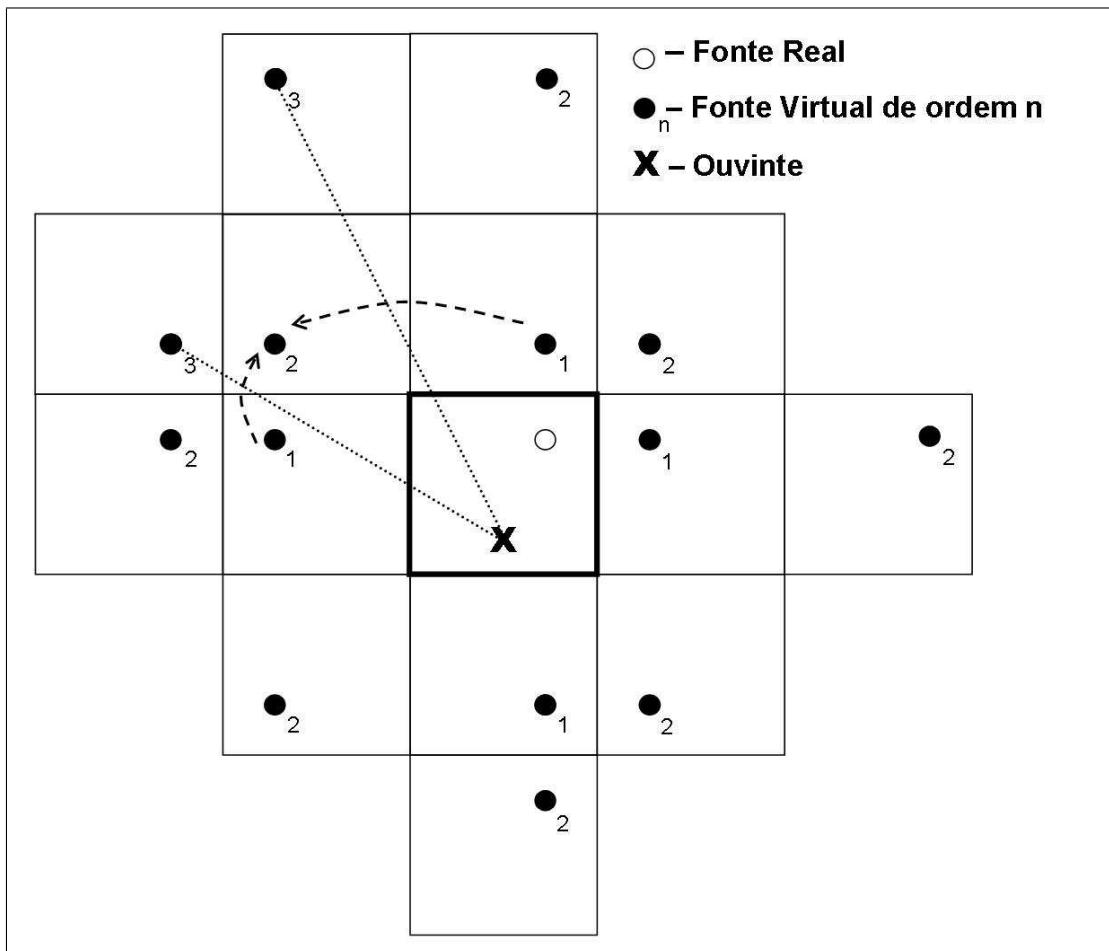


Figura 3.10: Cálculos de reverberação para sala quadrada. As setas pontilhadas mostram duas maneiras distintas de se chegar à mesma fonte virtual de segunda ordem. Também são representadas duas fontes de terceira ordem que são oriundas de diferentes fontes de primeira ordem, apesar de virem da mesma fonte de segunda ordem.

# Capítulo 4

## Método do *Beam Tracing*

### 4.1 Introdução

O método do *beam tracing* [7, 8] utiliza um procedimento diferente daquele utilizado no método das imagens para chegar às informações de reverberação, como será exposto no decorrer do capítulo. Com isso, busca-se uma maneira de eliminar a quantidade excessiva de cálculos desnecessários e repetidos que ocorrem no método das imagens e, conseqüentemente, chegar a uma solução de menor complexidade computacional.

Este método, é uma modificação do algoritmo de *ray tracing*. Portanto, vamos expor rapidamente o princípio do algoritmo de *ray tracing* antes de abordar o método de nosso interesse.

### 4.2 *Ray tracing*

Esta técnica é amplamente usada em aplicações de computação gráfica, para se chegar aos cálculos de iluminação. Por serem fenômenos fisicamente similares, é possível utilizar esta abordagem para obter as informações de reverberação.

Resumidamente, este método traça raios a partir da fonte sonora de maneira aleatória, como se vê na Figura 4.1. Em seguida, conhecido o posicionamento do ouvinte, verifica-se quais raios atingem uma área próxima ao ouvinte, chamada de área de recepção, ou seja, contribuem para o efeito sonoro. Esta área de recepção é necessária porque se o ouvinte fosse considerado como um simples ponto, seria muito difícil chegar a resultados satisfatórios.

Esse método é vantajoso pela sua simplicidade e pelo seu baixo custo computacional.

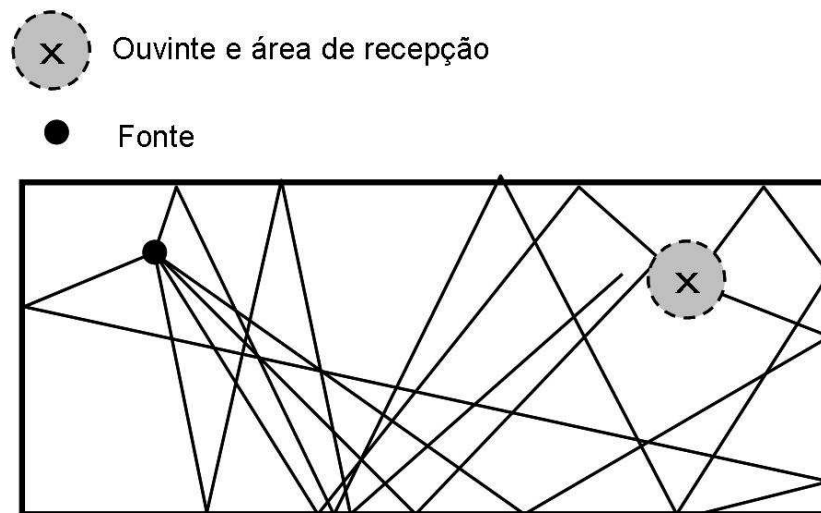


Figura 4.1: Método do *ray tracing*: são traçados raios aleatórios a partir da fonte sonora e verifica-se quais deles atingem uma área determinada ao redor do ouvinte. Baseada em [9].

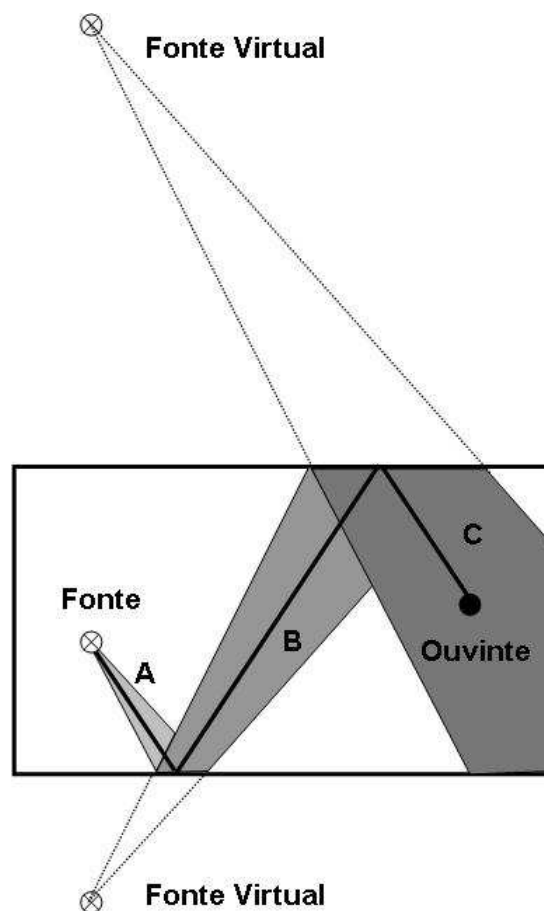


Figura 4.2: Traçado dos caminhos de propagação através de feixes.

Além disso, ele permite que os efeitos da difração sejam modelados, bastando para isso detectar-se toda interseção entre os raios traçados e uma aresta.

Uma desvantagem do método é consequência direta do seu princípio de funcionamento; quanto menor for o número de raios aleatórios gerados no primeiro estágio do algoritmo, maior é a chance de se perder algum caminho importante para o resultado final. Por exemplo, pode existir um obstáculo localizado justamente no espaço entre dois raios adjacentes e, neste caso, sua interferência não será levada em consideração.

Para diminuir a probabilidade desse tipo de erro, é preciso aumentar o número de raios traçados, o que eleva o custo computacional.

### 4.3 *Beam tracing*

O método de *beam tracing* elimina os erros de *aliasing* característicos do método de *ray tracing*. Em vez de traçar raios, ele propõe o traçado de feixes a partir da fonte sonora, de forma a cobrir todo o espaço.

Em linhas gerais, o que se deve fazer é um mapeamento de como os feixes se propagam e se dividem ao atingir os obstáculos, como mostrado na Figura 4.2. A divisão dos feixes é armazenada em uma estrutura de árvore (*beam tree*) que será consultada posteriormente para se obter as informações de reverberação.

#### 4.3.1 Visibilidade dos oclusores

Para que seja possível iniciar a construção da árvore de feixes, deve ser feita uma análise dos oclusores existentes no ambiente. O objetivo é definir que regiões de cada um deles são atingidas por um feixe e quais oclusores não são atingidos, tornando-se invisíveis (ver Figura 4.3). Com esse teste é feita uma redefinição dos oclusores, levando em consideração apenas as regiões iluminadas pelo feixe.

Para realização desta etapa, é necessário conhecer apenas as posições da fonte sonora e dos refletores. Esta etapa é independente da posição do ouvinte e pode ser feita como um pré-processamento. Caso haja um deslocamento do ouvinte, não será necessário refazer o cálculo de visibilidade dos oclusores, o que torna o método mais eficiente para esses casos.

Depois de concluídos os testes de visibilidade, pode-se dar início, efetivamente, ao traçado de feixes. São traçados feixes para cada um dos obstáculos existentes e, para cada

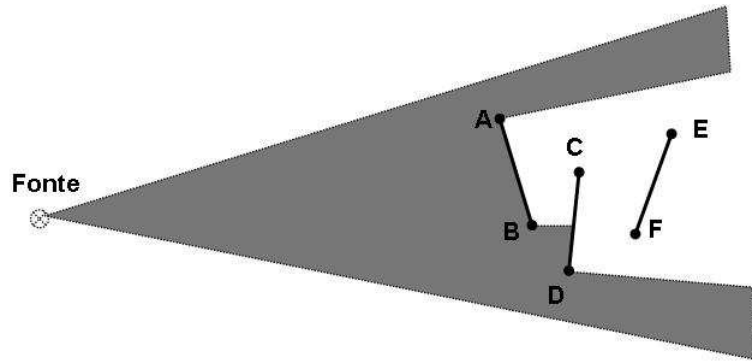


Figura 4.3: Encontrando os segmentos ativos de cada oclisor: o refletor  $AB$  causa uma sombra parcial no refletor  $CD$  e torna o oclisor  $EF$  invisível para esta posição da fonte. Baseada em [9].

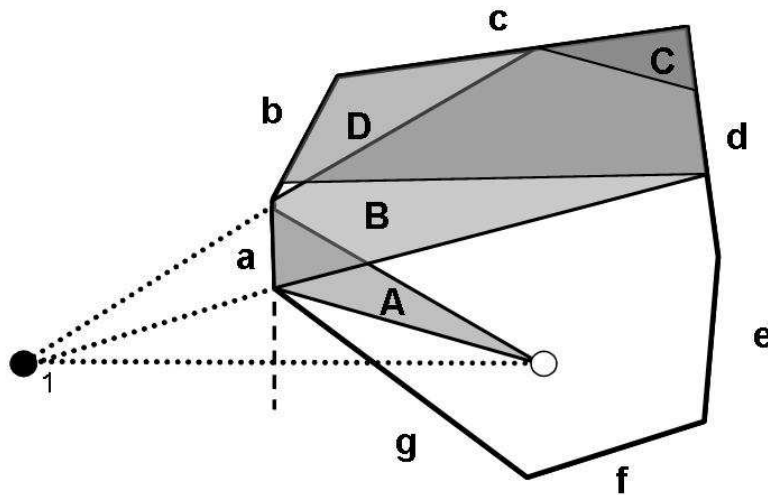


Figura 4.4: Encontrando a propagação de feixes: a fonte sonora projeta o feixe  $A$  sobre o oclisor  $a$ , dando origem ao feixe refletido  $B$ . Baseada em [7].

obstáculo atingido, faz-se a reflexão desse feixe para verificar que outros obstáculos são atingidos (ver Figura 4.4). Uma vez conhecidos os obstáculos atingidos, o ciclo se repete para dar continuidade ao traçado e à divisão dos feixes.

Quando um feixe atinge um obstáculo, deve-se refletir a fonte sonora em relação a este obstáculo para que seja encontrado o feixe de reflexão. As operações necessárias para refletir esta fonte já foram abordadas anteriormente, na Seção 3.2.1.

Conhecido o feixe de reflexão, são feitos testes para verificar quais outros obstáculos são interceptados pelo novo feixe, e dar continuidade ao algoritmo. A fonte é refletida em relação a estes obstáculos, e novos feixes são gerados.



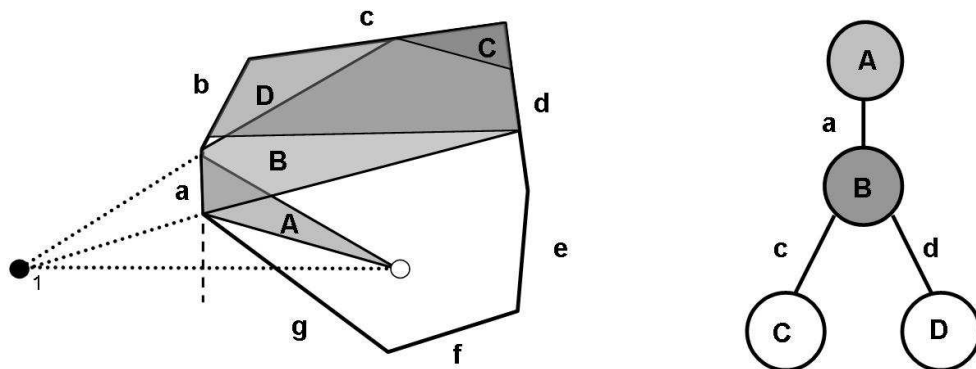


Figura 4.5: Traçando a árvore de feixes: o feixe refletido  $B$  ilumina regiões dos refletores  $c$  e  $d$ , e essas informações são mapeadas na árvore de feixes. Baseada em [7].

### 4.3.2 *Beam tree*

Conforme as divisões dos feixes vão sendo mapeadas, faz-se necessário armazenar todas as informações pertinentes: número de reflexões sofridas, atenuação e posicionamento de cada um dos feixes.

A árvore de mapeamento de feixes (*beam tree*) é uma maneira bem intuitiva de se armazenar as informações adquiridas durante os cálculos de divisão de feixes. A Figura 4.5 ilustra a propagação de um feixe de onda sonora e como mapeá-lo. Cada vez que um feixe atinge um dado obstáculo são gerados um ou mais novos feixes de reflexão.

Vale reforçar que para se fazer a construção da árvore não é preciso saber a posição do ouvinte  $e$ , a menos que a fonte sonora se mova, esses dados podem ser utilizados para qualquer posição do ouvinte. Esta é uma das vantagens que o método de traçado de feixes oferece em relação ao método das imagens.

Além desta vantagem, neste método não é necessário refletir a fonte sonora em relação a todos os obstáculos do ambiente, como na técnica anterior. Tal reflexão só é feita em relação aos obstáculos atingidos pelo feixe gerado. A Figura 4.4 é um bom exemplo disto.

Neste exemplo, ao se utilizar o método das imagens, seria necessário refletir a fonte virtual indicada em relação a todos os obstáculos para se obter as imagens de segunda ordem. O segundo método, no entanto, permite que esta reflexão seja feita somente em relação aos obstáculos  $c$  e  $d$ , que são atingidos pelo feixe  $B$ .

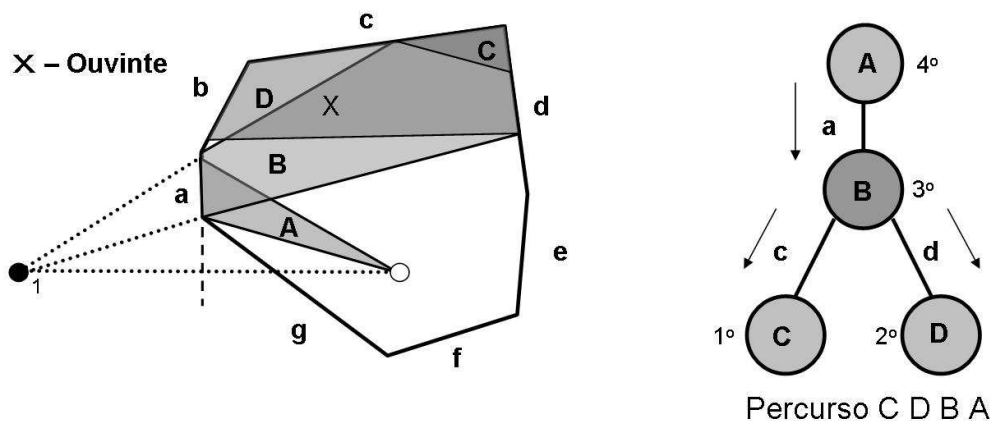


Figura 4.6: Busca em pós-ordem na árvore de feixes: durante a busca verifica-se que os feixes D e B passam por locais que abrangem a posição do ouvinte.

### 4.3.3 O ouvinte

Após os testes de visibilidade e a obtenção da árvore de feixes, é concluída a etapa de pré-processamento e obtém-se a posição do ouvinte. Para se obter os caminhos que a onda sonora pode percorrer até atingi-lo, faz-se uma busca em pós-ordem na árvore de feixes por aqueles que abrangem o ponto onde o ouvinte está localizado. A Figura 4.6 exemplifica o procedimento para uma determinada posição do ouvinte. Neste caso são encontrados dois feixes passando pela posição do ouvinte.

Ao se fazer a construção da árvore de feixes, pode-se armazenar em cada nó a acumulação das atenuações sofridas, bem como a posição da fonte virtual que deu origem a cada um dos feixes. Desta forma, ao se encontrar um feixe que contribua para o som que atinge o ouvinte, pode-se ler imediatamente a atenuação sofrida, bem como a direção de chegada desta frente de onda ao ouvinte, informações necessárias para a síntese de reverberação.

### 4.3.4 Particionamento do ambiente

Para que esta técnica possa ser utilizada com êxito, é necessário que o ambiente seja poliédrico convexo. Em duas dimensões isso significa que se deve trabalhar com ambientes poligonais convexos para utilizar o algoritmo.

Para tornar sua utilização possível em qualquer tipo de ambiente, é necessário incluir na etapa de pré-processamento um algoritmo de particionamento do espaço em células convexas. Esse particionamento pode ser feito a partir da construção de uma árvore BSP

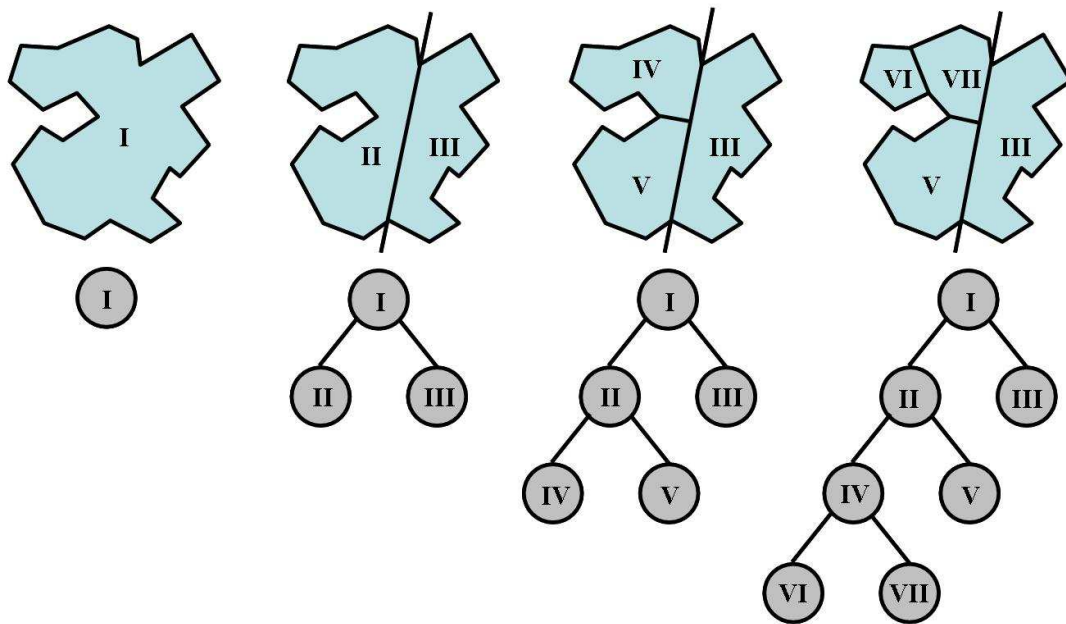


Figura 4.7: Dividindo o ambiente em células convexas: deve-se continuar com a divisão das demais células (III e V) até que só haja células convexas, como VI e VII.

(*Binary Space Partition Tree*) e deve ser feito antes da construção da árvore de feixes.

A construção da árvore BSP para divisão do ambiente é feita de maneira recursiva, dividindo-se o ambiente em duas partes até que cada uma dessas partes seja convexa.

A Figura 4.7 ilustra como a criação da árvore BSP se comporta em um ambiente não convexo. Nela, partindo-se do ambiente A, são feitas sucessivas subdivisões até se obterem células convexas. O exemplo mostra parcialmente esse procedimento até as primeiras duas células convexas (VI e VII) serem encontradas.

Para formação de células convexas, são criados oclusores transparentes entre as células. Dessa forma, cada célula é formada por oclusores reais, chamados de opacos, e por oclusores ilusórios, chamados de transparentes.

Quando um feixe incide sobre um oclusor opaco ele gera um feixe de reflexão; quando incide sobre um oclusor transparente, é gerado um feixe de transmissão. Dessa forma, um feixe, ao mudar de célula, é considerado como sendo outro feixe.

Com isto, quando se desejar descobrir os feixes que atingem o ouvinte, basta saber em que célula o ouvinte se encontra e, então, buscar nos feixes pertencentes a esta célula.

A Figura 4.8 ilustra a divisão de um ambiente simples em duas células convexas e o traçado de feixes através de oclusores opacos e transparentes e a conseqüente criação da árvore de feixes. O feixe 'A' gera o feixe de reflexão 'C' ao incidir sobre um oclusor opaco,

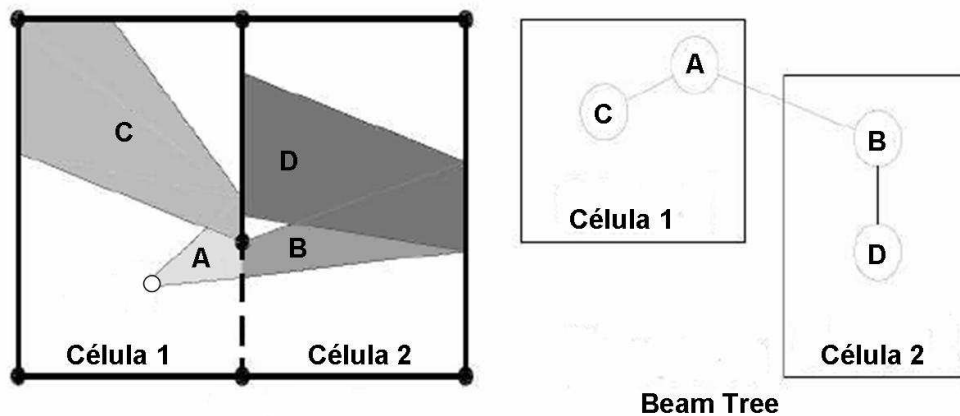


Figura 4.8: Mapeamento da divisão dos feixes para dois ambientes convexos interligados. Os feixes de transmissão e reflexão são armazenados na árvore de feixes, bem como as células onde eles ocorrem. Baseada em [9].

além do feixe de transmissão ‘B’ ao atingir um oclisor transparente. A árvore de feixes mapeia as divisões de feixes e as células às quais os feixes pertencem.

Vale notar que também é possível levar em consideração efeitos de difração. Para tal, basta fazer uma análise à parte quando um feixe incidir sobre uma aresta no ambiente e neste caso, utilizar uma aproximação para criação dos feixes decorrentes desse fenômeno.

## 4.4 *Beam tracing* no espaço dual

### 4.4.1 Motivação

Para se chegar a uma implementação completa da técnica de traçado de feixes, deve-se levar em consideração todos os aspectos anteriormente citados. São eles:

- visibilidade dos oclusores;
- particionamento do ambiente;
- construção da árvore de feixes;
- busca na árvore de feixes.

Além disso, pode-se expandir o método para tratar não somente as reflexões da onda sonora como também a difração. Diversas são as implementações deste algoritmo, com suas

particularidades. Um aspecto crucial associado ao desempenho do método é o tempo de processamento necessário. Utilizar um espaço dual [5] para fazer os cálculos do traçado de feixes é uma proposição que traz algumas vantagens sem afetar a qualidade dos resultados. Como será detalhado mais adiante, o espaço dual é criado tendo como base o coeficiente angular e o coeficiente linear de uma dada reta de equação  $y = mx + q$ .

Como se verá adiante, a grande vantagem de se utilizar este método para se implementar o *beam tracing* está na etapa de definição da visibilidade dos oclusores, pois esta pode ser feita sem se conhecer a posição da fonte sonora, além de ser facilmente representada utilizando-se o que se chama de espaço dual.

#### 4.4.2 Espaço dual x Espaço cartesiano

Essa variação do método de *beam-tracing* original tem como principal diferença o fato de utilizar um outro sistema de coordenadas, em vez do cartesiano, para tornar mais eficientes algumas etapas, principalmente no que diz respeito à visibilidade dos oclusores e construção da árvore de feixes. Utiliza-se o espaço dual ou paramétrico.

O espaço dual possui como coordenadas de referência o par  $(q, m)$ , onde  $q$  representa o eixo de coeficientes angulares e  $m$  o eixo de coeficientes lineares, dada uma reta com equação  $y = mx + q$ . O algoritmo deve ser capaz de sair de uma representação para a outra. Toda interação com o usuário deve ser feita, por praticidade, no sistema cartesiano, enquanto parte dos cálculos é feita no outro sistema.

A seguir, são mostradas as transformações dos principais elementos para que, em seguida, seja possível mostrar as particularidades desta abordagem para o traçado de feixes.

##### 4.4.2.1 Transformação dos principais elementos

A transformação de um ponto  $(x, y)$  para o espaço dual dá origem a uma reta. Esta reta, representa todas as combinações entre coeficientes angulares,  $m$ , e coeficientes lineares,  $q$ , das retas que cruzam o ponto  $(x, y)$  no espaço cartesiano.

A equação da reta que cruza o ponto  $(x, y)$  é dada por:

$$y = mx + q,$$

portanto a equação que relaciona  $m$  e  $q$  para um dado ponto é:

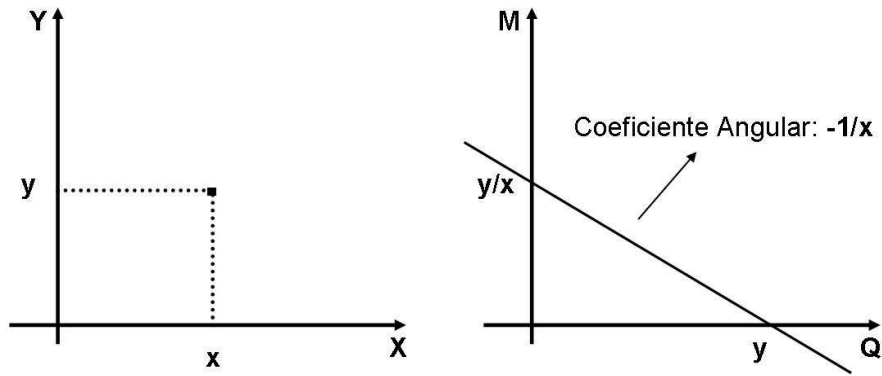


Figura 4.9: A transformação de um ponto para o espaço dual leva a uma reta.

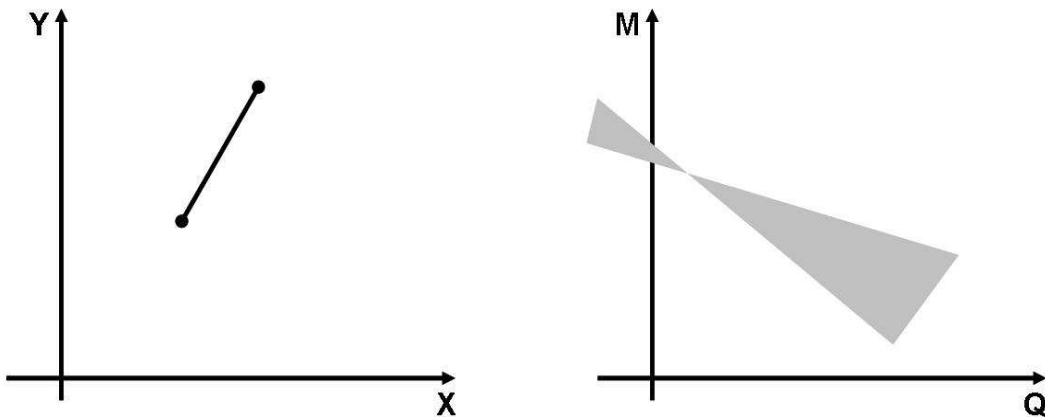


Figura 4.10: A transformação de um segmento de reta para o espaço dual leva a um feixe.

$$m = -\frac{1}{x}q + \frac{y}{x}.$$

A Figura 4.9 mostra essa transformação. Uma interpretação direta desta transformação nos diz que os pontos compreendidos pela reta dual nos dão a informação dos pares de coeficientes  $(m, q)$  de todas as retas que passam pelo ponto  $(x, y)$ .

Um segmento de reta é definido por dois pontos e, conseqüentemente, sua transformação para o espaço dual é representada pelo feixe encerrado pelas duas retas duais aos pontos extremos deste segmento, conforme vemos na Figura 4.10. Este feixe no espaço dual encerra uma região que abrange todos os pares de coeficientes  $(m, q)$  das retas que cruzam o segmento de reta em questão.

Também se verifica que esta transformação é simétrica, ou seja, a transformação de uma reta  $y = mx + q$  nos leva a um ponto  $(m, q)$  no espaço dual. Analogamente, um feixe

no espaço cartesiano é representado por um segmento de reta no espaço dual. A Tabela 4.1 resume estas principais transformações.

| Espaço Cartesiano  | Espaço Dual                |
|--------------------|----------------------------|
| Ponto: $(x, y)$    | Reta: $m = -q/x + y/x$     |
| Reta: $y = mx + q$ | Ponto: $(m, q)$            |
| Segmento de reta   | Feixe entre duas retas     |
| Feixe              | Segmento entre dois pontos |

Tabela 4.1: Transformação do espaço cartesiano para o espaço dual.

A grande vantagem desse método é evitar a necessidade de se fazer a subdivisão espacial. Desta forma, a reconstrução da árvore de feixes se torna mais rápida no caso de movimentação da fonte sonora. O passo principal para o correto funcionamento deste método reside na construção dos diagramas de visibilidade [10], que será abordada a seguir.

### 4.4.3 Diagramas de visibilidade

A realização dos testes de visibilidade faz parte do pré-processamento. Para que seja possível uma reconstrução mais rápida da árvore de feixes, no caso de movimentação da fonte, deve-se buscar uma forma de realizar os testes de visibilidade de forma que independam da posição da fonte sonora. Desta forma, somente quando houver movimento do ouvinte será necessário reconstruir a árvore de feixes.

No método do *beam tracing*, para cada nova posição obtida para uma fonte virtual, deve ser feita a análise de visibilidade dos oclusores. O mesmo ocorre caso haja movimentação da fonte real. Isso ocorre pois os testes de visibilidade teriam sido feitos para uma determinada posição da fonte. O que se propõe, então, é uma maneira de se obter informações de visibilidade dos oclusores utilizando como referência genérica um ponto arbitrário no espaço.

Esta referência genérica é escolhida como sendo um ponto de outro oclisor. As informações encontradas no pré-processamento são facilmente armazenadas através das funções de visibilidade representadas no espaço paramétrico (espaço dual). Essas funções são capazes de dizer se um dado oclisor é visível a partir de um certo ponto de vista com base em dois parâmetros: posição no espaço e ângulo de visada.

No caso 2D, isso se restringe a definir a visibilidade a partir dos pontos de vista que se situam em uma linha de referência. Esta linha pode ser escolhida arbitrariamente, desde

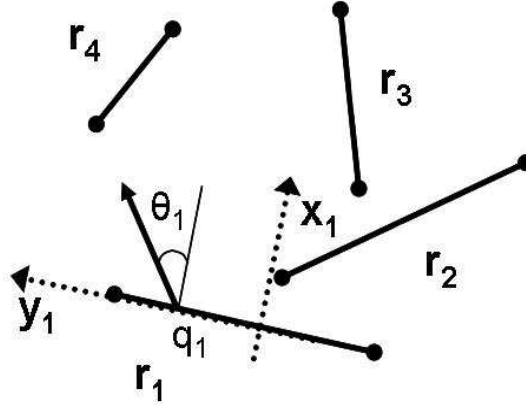


Figura 4.11: Encontrando as funções de visibilidade: as funções de visibilidade indicam todos os obstáculos visíveis para todas as combinações dos parâmetros  $\theta$  e  $q$ . Baseada em [10].

que não haja interseção com o oclisor cuja visibilidade está sendo testada. Uma boa escolha para referência é outro oclisor, pois assim serão conhecidos os dados de visibilidade dos demais oclusores a partir deste oclisor. Desta forma, o processo posterior de propagação e divisão dos feixes é simplificado, pois já são conhecidas as informações de visibilidade entre os oclusores.

A função de visibilidade pode ser descrita como sendo função de dois parâmetros: o primeiro,  $q_n$ , indica de que ponto da referência  $n$  parte o raio e o outro,  $m = \text{tg}(\theta_n)$ , indica em que direção este raio parte, como representado na Figura 4.11. O que se faz é mapear as combinações desses dois parâmetros que permitem que um segundo refletor seja visto a partir dessa referência.

Para conseguir isso, ao escolher um oclisor como referência, faz-se uma normalização de forma que este oclisor tenha  $x = 0$  e  $-1 \leq y \leq 1$ .

É exatamente neste ponto que a representação no espaço dual se torna primordial. A Figura 4.12, ilustra os passos descritos e com ela pode-se concluir que a representação da visibilidade de um oclisor em relação a outro é simplesmente a representação dos objetos em questão no espaço paramétrico, limitada pela faixa definida por  $-1 \leq q \leq 1$  que representa a referência.

Sabendo-se que a representação dual de um segmento-de-reta nos dá os coeficientes de todas as retas que cruzam esse segmento, ao levar a representação dos oclusores para o espaço dual, somos capazes de obter todas as retas que cruzam o refletor de referência e atingem um outro oclisor. Essas retas serão representadas pelas representações duais de cada um



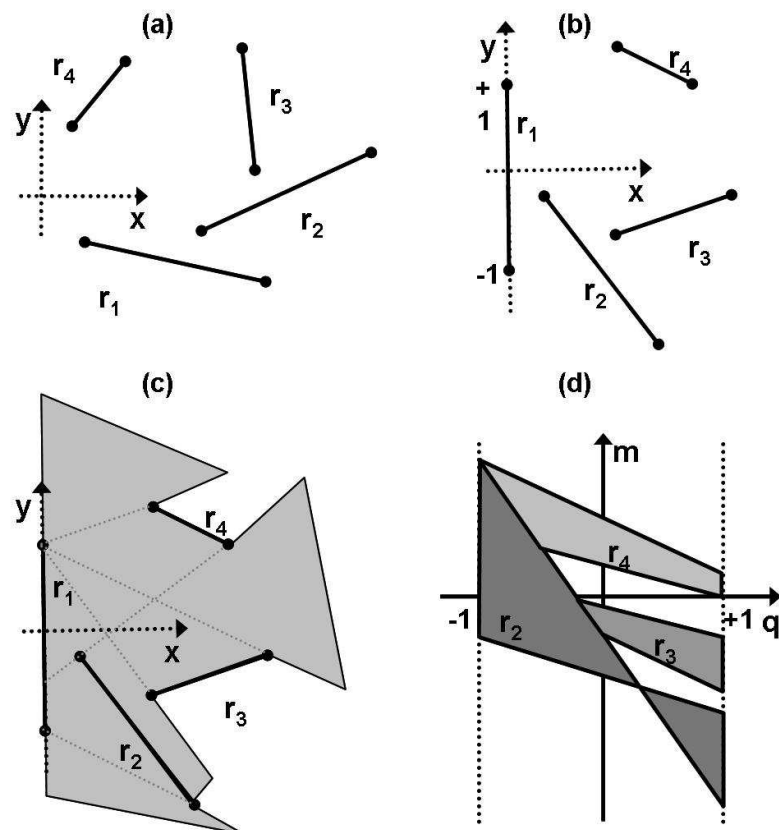


Figura 4.12: Passo-a-passo para encontrar uma função de visibilidade: escolhe-se um refletor para referência ( $r_1$ ) e normaliza-se o ambiente para posicioná-lo entre  $-1 \leq y \leq +1$  (b) e então, poder chegar às funções de visibilidade no espaço dual (d).

dos oclusores, limitadas pela faixa do oclusor de referência, definida por  $-1 \leq q \leq 1$ .

O algoritmo se vale dos conceitos introduzidos até aqui para rastrear a divisão dos feixes, levando em conta fatores como a oclusão de um obstáculo, ou parte dele, por um outro obstáculo, como mostrado na Figura 4.13a.

Uma vez conhecidas as funções de visibilidade tendo como referências cada um dos oclusores, pode-se verificar quais são iluminados para uma dada posição da fonte. Esta fonte pode ser a fonte real ou uma fonte virtual, o procedimento a ser seguido é o mesmo.

Nos casos onde o segmento ativo seja diferente do oclusor inteiro, ao se fazer a normalização do ambiente, utilizando-se os mesmos fatores de escalamento, será encontrado um oclusor de referência menor que aquele original situado entre  $-1 \leq y \leq 1$ . No espaço paramétrico isso corresponde a diminuir a faixa que originalmente ficava entre  $-1 \leq q \leq 1$  para os novos valores. Não é necessário fazer nenhuma outra operação, ou seja, refazer os diagramas de visibilidade. O feixe gerado é, portanto, representado no espaço dual pela

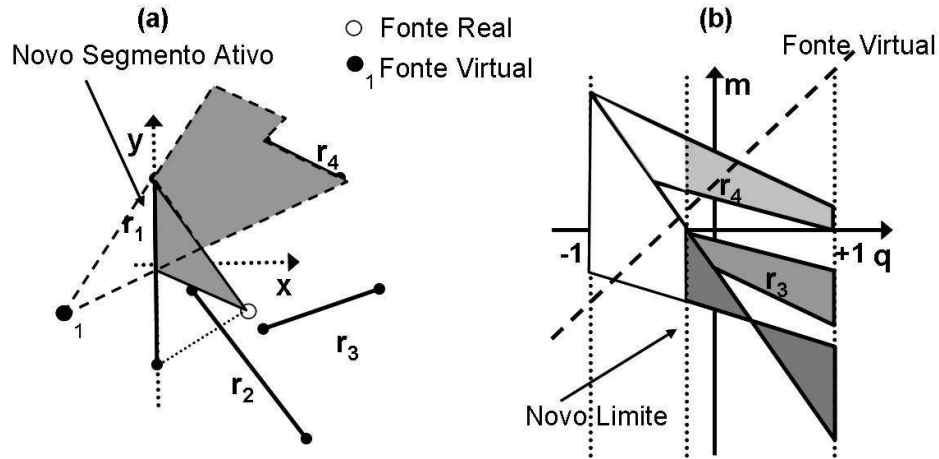


Figura 4.13: Mudança do segmento ativo: (a) Quando ocorre uma oclusão, deve-se determinar o novo segmento ativo do obstáculo utilizado como referência. (b) No espaço paramétrico isso corresponde a um estreitamento da tira de referência.

porção da reta que representa a fonte sonora e a tira que representa o segmento ativo, 4.13b.

Durante o algoritmo de traçado de feixes, esse passo é repetido utilizando sempre uma fonte virtual (que se situa sempre no lado esquerdo após a normalização do espaço), e o oclisor que deu origem a esta fonte virtual é utilizado como referência para se encontrar os feixes gerados e novos oclusores atingidos.

Encontrar os novos oclusores atingidos se resume a verificar quais regiões de visibilidade são cruzadas pela reta que representa a fonte sonora, no espaço dual, como mostrado na Figura 4.14.

#### 4.4.4 O algoritmo

O algoritmo de traçado de feixes é implementado utilizando os conceitos expostos até aqui. A Figura 4.15 mostra a estrutura do algoritmo. A partir dos dados do ambiente, são gerados os diagramas de visibilidade entre os oclusores. Para cada oclisor, deve-se fazer dois diagramas de visibilidade, considerando o caso em que a fonte se situaria voltada para uma de suas faces ou para a outra. Isto é feito para que o algoritmo seja o mais genérico possível, podendo ser ampliado para ser utilizado em ambientes não convexos.

Esta é uma etapa mais custosa computacionalmente, mas não precisa ser refeita, a não ser que haja uma modificação do ambiente. Como faz parte do estágio de pré-processamento, não se trata propriamente de uma desvantagem do método.

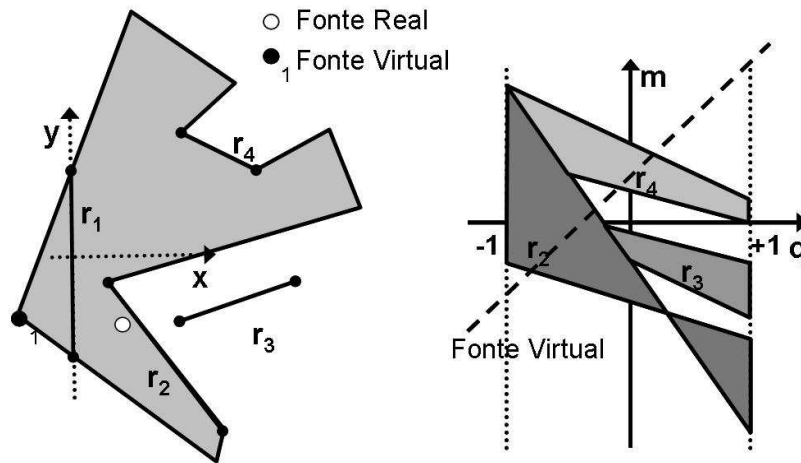


Figura 4.14: Entrada da posição da fonte e sua representação no espaço dual. Os obstáculos  $r_2$  e  $r_4$  são atingidos pelos novos feixes gerados.

Com a entrada da posição da fonte sonora, podem-se utilizar os diagramas de visibilidade e a geometria da sala para encontrar as fontes-imagem e construir a *beam tree* com as informações de reflexão dos feixes. Para cada nova fonte-imagem gerada, deve-se atentar para uma possível alteração do segmento ativo do oclisor que lhe deu origem.

Esta nova fonte-imagem, em conjunto com o segmento ativo, dará origem a um novo feixe. Neste ponto, verificam-se os oclusores iluminados e, para cada um deles, reflete-se a fonte sonora; são feitos os ajustes para esse novo segmento ativo, e assim sucessivamente. No espaço paramétrico isso se resume a verificar que regiões são interceptadas pela reta que representa a fonte virtual. Consultando novamente a Figura 4.13b, conclui-se que somente o obstáculo  $r_4$  é atingido e será, portanto, colocado na árvore de feixes como sendo o próximo a ser utilizado para a propagação dos feixes. Este é o ponto mais importante e suscetível a erros do algoritmo, e deve ser feito com cautela. A Figura 4.13 ilustra um caso onde o segmento ativo não é igual a toda a extensão do oclisor.

Este procedimento deve ser levado adiante até que seja atingida uma ordem máxima de reflexões, ou uma perda de energia pré-determinada. Em cada nó da árvore de traçado de feixes devemos armazenar o nome do refletor de referência e os fatores utilizados para normalização dos refletores, além da posição da fonte refletida em relação a este obstáculo e a ordem desta reflexão. Desta forma, uma vez construída a árvore de subdivisão de feixes, com uma simples pesquisa à árvore conseguem-se os dados necessários para os cálculos de reverberação.

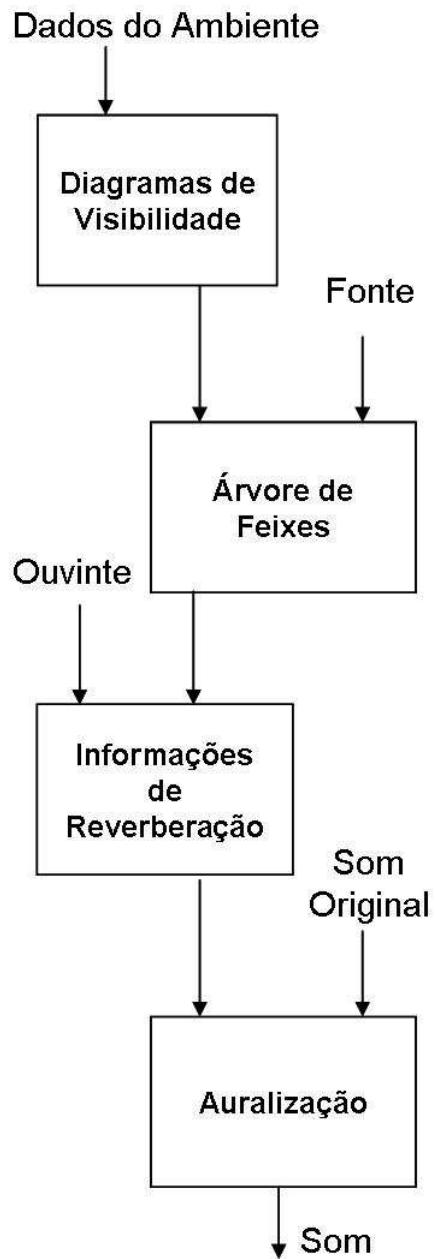


Figura 4.15: Diagrama em blocos das etapas percorridas para se chegar às informações de reverberação.

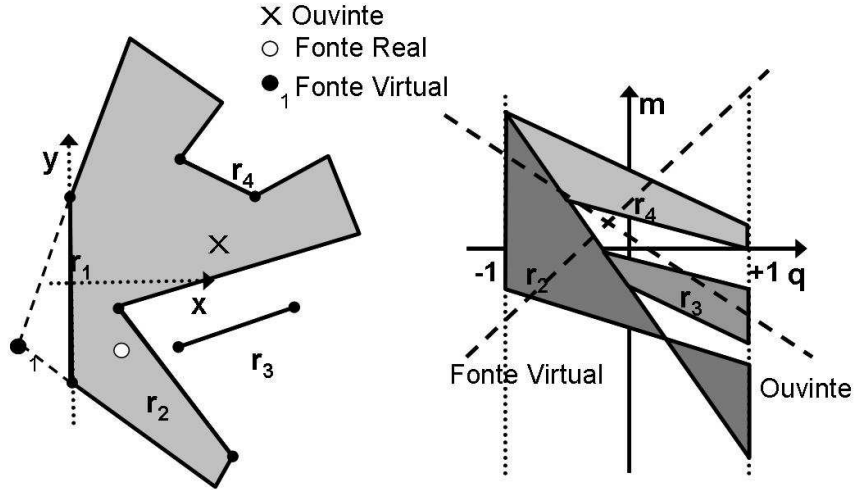


Figura 4.16: Representação completa no espaço paramétrico: obstáculos, fonte e ouvinte.

Esta árvore fica armazenada na memória, e só deve ser reconstruída caso ocorra movimentação da fonte sonora.

Uma vez que a árvore de feixes esteja construída, o sistema recebe a posição do ouvinte e realiza, então, uma busca em pós-ordem nesta árvore. Neste procedimento de pesquisa, todos os nós e folhas da árvore devem ser visitados. Para a análise no espaço cartesiano, o que deve ser feito é a verificação de quais feixes passam pelo ponto onde o ouvinte se encontra. No espaço dual, essa operação consiste em verificar, para cada nó da árvore, se o ponto de interseção entre a reta que representa a fonte virtual e aquela que representa o ouvinte se encontra na tira que representa o oclisor de referência (originalmente entre  $q = -1$  e  $q = 1$ ), conforme mostrado na Figura 4.16. Em caso afirmativo, podemos afirmar que existe um caminho que liga a fonte virtual em questão ao ouvinte. Esse caminho é obtido diretamente tanto a partir da posição da fonte virtual e do ouvinte no espaço cartesiano, quanto a partir dos coeficientes  $m$  e  $q$  no ponto de encontro obtido no espaço dual.

Com isso é possível chegar às informações de reverberação, como direção de chegada e tempo de atraso, pois será conhecida a seqüência de reflexões que levam cada frente de onda sonora da fonte para o ouvinte.

Para se obter a síntese sonora basta utilizar essas informações em um sistema de som tridimensional e o resultado será um som com as características de posicionamento e ambiência. Essa interface pode ser feita utilizando a mesma estrutura mostrada na Seção 3.3.2.

## 4.5 Conclusões

Foram abordadas diferentes técnicas que podem ser utilizadas como alternativa ao método das imagens. Com essas diferentes técnicas se deseja chegar a soluções que sejam capazes de contornar os pontos fracos daquele método. O método do *beam tracing*, baseado no *ray tracing*, provê a possibilidade de modelar os efeitos de difração e é capaz de gerar as informações de reverberação com maior eficiência.

Esse método se mostra ainda mais vantajoso porque nele parte dos cálculos não precisa ser refeita quando há uma modificação na situação que se deseja simular. Quando existe apenas o movimento do ouvinte, só é necessário fazer uma nova busca na *beam tree* existente. Quando a fonte se movimenta, é necessário refazer a *beam tree*, mas não é necessário que os testes de visibilidade sejam refeitos, pois eles são feitos sem levar em consideração a posição da fonte. Se existe a mudança do ambiente em questão, como por exemplo o movimento de um dos oclusores, todo o processo deve ser refeito passando pelos testes de visibilidade, pela construção da *beam tree* e pela busca na árvore. A Tabela 4.2 resume esses casos.

| Tipo de Evento          | Custo computacional               |
|-------------------------|-----------------------------------|
| Modificação do ambiente | Novos diagramas de visibilidade   |
| Movimento da fonte      | Reconstrução da <i>beam tree</i>  |
| Movimento do ouvinte    | Nova pesquisa na <i>beam tree</i> |

Tabela 4.2: Relação entre o tipo de evento e a ação que o algoritmo deve tomar para se chegar a novos resultados.

No entanto, todas essas vantagens computacionais são conseguidas ao custo de maior complexidade na construção do algoritmo e no gerenciamento da memória. A validação dos resultados encontrados pode ser feita de maneira subjetiva, a partir do som gerado, em conjunto com a comparação com os resultados encontrados a partir de outros métodos, ou até mesmo comparando-se o som gerado com um evento sonoro real no ambiente simulado.

# Capítulo 5

## Implementação do *Software*

### 5.1 Considerações gerais

Durante toda a codificação, foram tomadas precauções extras em relação ao gerenciamento da memória. Após os primeiros testes com a solução sem orientação a objetos, verificou-se que para um número muito grande de reflexões, havia um estouro da memória. Por conta disso, o desenvolvimento da solução orientada a objetos foi planejado para otimizar a utilização da memória.

A rotina desenvolvida não será acessada pelo usuário final do sistema. Para se chegar a um sistema completo, é preciso haver um subsistema que forneça os dados do ambiente para as rotinas de reverberação e um outro subsistema que capture as respostas fornecidas pelas rotinas de reverberação e gere como resultado um sinal de áudio para o usuário. Para o teste das rotinas desenvolvidas, foram utilizadas uma interface através da linha de comando e arquivos com os dados do ambiente, fonte e ouvinte.

### 5.2 Método das imagens

Inicialmente, para que fosse possível um primeiro contato com o assunto, optou-se por uma implementação não orientada a objetos do método das imagens. Este método foi escolhido por ser de mais fácil implementação e a opção por uma solução não orientada a objetos foi apenas para a primeira abordagem do problema. Essa solução foi utilizada em conjunto com o *software* Matlab<sup>®</sup> para que os resultados pudessem ser plotados e, então, verificados.

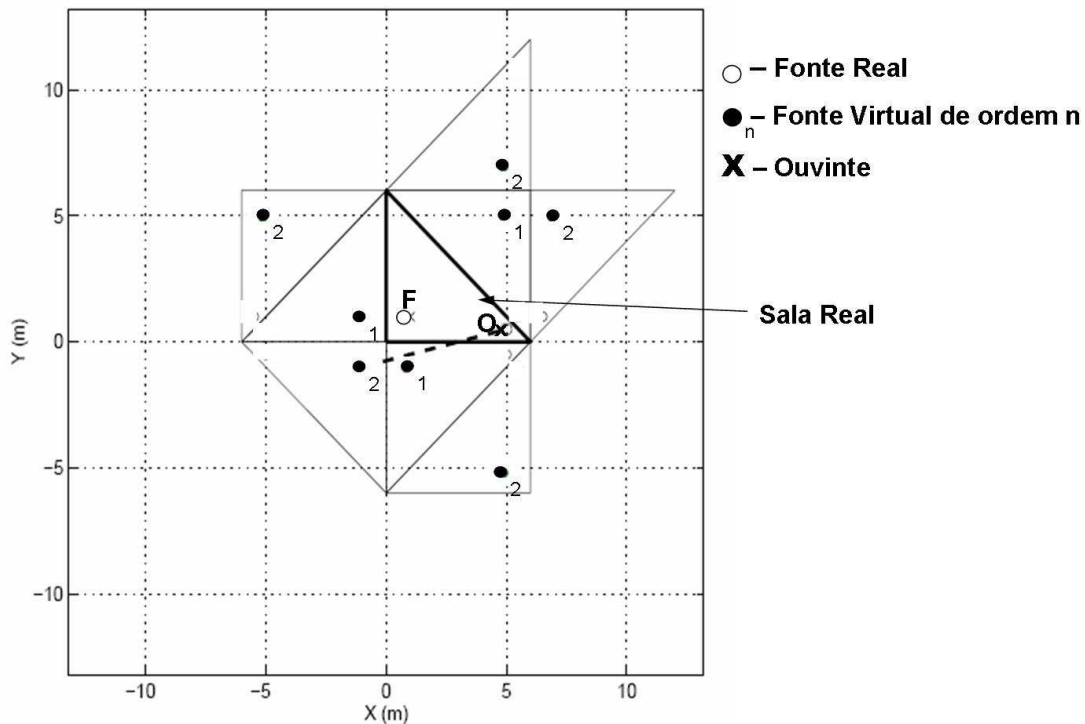


Figura 5.1: Teste do método das imagens para reflexões até a segunda ordem em salas triangulares.

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram os resultados plotados com o auxílio do Matlab para alguns exemplos. Optou-se por plotar todas as imagens válidas encontradas para a fonte sonora até um certo número de reflexões, e então verificou-se a validade dos resultados.

Em seguida, partiu-se para uma implementação orientada a objetos dessa mesma solução. Com isso deseja-se uma solução mais eficiente e organizada, que possibilite uma expansão da solução para 2,5 dimensões ou até mesmo para 3 dimensões.

A chamada solução em 2,5 dimensões é aquela onde os ambientes devem possuir paredes puramente verticais, enquanto que a solução em 3 dimensões permite qualquer tipo de ambiente.

Os resultados obtidos com a solução orientada a objetos foram validados a partir de comparações dos resultados com aqueles obtidos na solução anterior, para diferentes ambientes e posições da fonte e do ouvinte.

Neste método, muita memória é ocupada, pois deve-se refletir e armazenar, sempre, não só a fonte virtual como a própria sala onde ela está imersa. Além disso todos os cálculos só são possíveis a partir do conhecimento de todo o ambiente e devem ser refeitos caso haja alguma mudança. O desenvolvimento do método das imagens foi, de fato, mais simples e



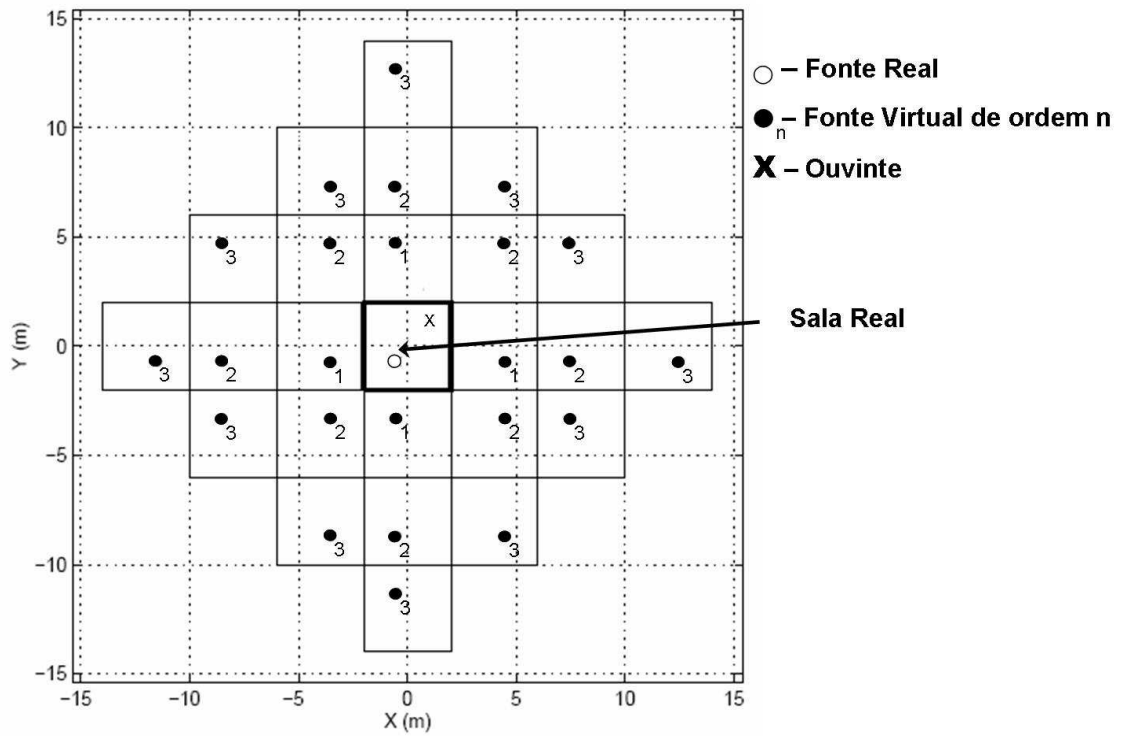


Figura 5.2: Teste do método das imagens para salas quadradas até terceira ordem.

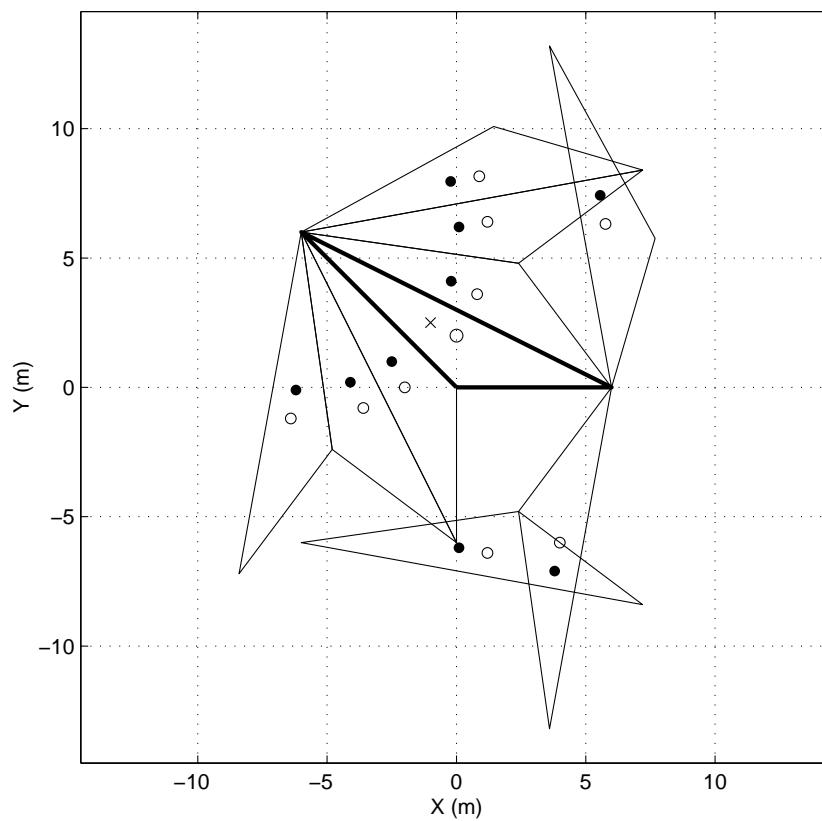


Figura 5.3: Caso onde várias fontes audíveis são geradas a partir de fontes inaudíveis. Estas não foram representadas para simplificação da figura.

menos sujeito a *bugs* e foi possível utilizar esta rotina em conjunto com uma outra ferramenta [11], para gerar o som tridimensional.

As principais classes implementadas e seus métodos principais estão listados no Quadro 5.1.

---

**Quadro 5.1** Principais classes e métodos implementados para o método das imagens.

---

```
class Ponto
{
    float x,y,z;
    Sala *salaDona;
};
class LadoSala
{
    Ponto pontoA,pontoB;
    float gain; //atenuação imposta por este lado às ondas nele refletidas.
    Sala *salaDona; //sala a qual este lado pertence
};
class Sala
{
    int id,maeId;
    ladoList lados; //lista de lados desta sala
    Ponto fonte, ouvinte;
    float sourceGain;
    LadoSala *ladoOrigem; //lado que deu origem a esta sala
    //0 indica sala real, 1 primeira reflexao, assim sucessivamente
    int ordem;
private:
    float distancia;
    float delayInSeconds;
    long delayInSamples;
};
```

---

### 5.3 Método do *beam tracing*

O método do traçado de feixes (*beam tracing*) implementado foi aquele que utiliza o espaço paramétrico para simplificar os cálculos de visibilidade e construção da árvore de feixes. Por causa da escassez de artigos publicados acerca deste método, investiu-se um grande esforço no estudo do método do *beam tracing* original, e, em seguida das diferenças propostas pelo método do espaço paramétrico.

Algumas publicações [5, 7, 10, 9], foram essenciais para esclarecer pontos-chave do método. Foi desenvolvida a rotina na forma de uma solução orientada a objetos, tendo sido dada atenção especial ao gerenciamento de memória. Verificou-se que a dificuldade para o desenvolvimento deste método é muito maior, pois exige manipulações e verificações mais complexas durante os cálculos, já que ele trabalha o tempo todo confrontando informações do espaço cartesiano com informações do espaço paramétrico. Vale lembrar que o espaço paramétrico é gerado após terem sido feitas translações e normalizações do espaço cartesiano.

Durante os cálculos de visibilidade, são feitas as transformações descritas anteriormente de maneira que o oclisor de referência seja posicionado no intervalo  $-1 \leq y \leq +1$ . Essa transformação é feita para cada um dos oclusores no início da rotina, e os parâmetros utilizados para fazê-la são armazenados para que no fim da rotina possamos desfazê-la.

No Quadro 5.2 temos as principais classes, métodos e atributos que foram utilizados para essa implementação.

### 5.4 Interfaces de entrada e saída

Conforme dito anteriormente, o sistema aqui implementado não será utilizado por um usuário final, leigo. Os usuários deste sistema serão outros usuários “intermediários”, que o utilizarão com o intuito de adicionar os efeitos de reverberação a um outro sistema.

Para que este sistema possa ser integrado a um sistema completo de síntese de som tridimensional, devem-se implementar, basicamente, dois outros sistemas.

O primeiro sistema seria responsável por fornecer os dados necessários para se efetuar os cálculos de reverberação: localização dos vértices do ambiente, atenuação de cada um dos lados, posição da fonte sonora e posição do ouvinte. Este sistema pode ser implementado, por exemplo, na forma de uma interface gráfica tridimensional, que é mais intuitiva e amigável para o usuário final.

---

**Quadro 5.2** Principais classes e métodos implementados para o método do *beam tracing*.

---

```
class reta
{
    public:
    double a,b,c; // coeficientes da reta ax+by+c=0
    reta operator=(reta right);
};

class ponto
{
    public:
    double x,y; //ponto de coordenadas (x,y)
    reta dual;
    void gira(long double);
    void escala(double);
    void translada(double , double);
    void cria_dual();
    ponto operator=(ponto right);
};

//Nó da beam tree
class no
{
    public:
    int nome; //recebe o id do ocluser
    int ambiente_num; //testes de visibilidade que está sendo utilizado
    ponto fonte_virtual;
    int ordem; //ordem 0 indica caminho direto
    int numero_filhos;
    no **filhos; //ponteiro para lista com os filhos deste nó
};
```

---

Além disso, deve haver um sistema responsável por captar as informações de reverberação encontradas e utilizá-las para processar um sinal de áudio monoaural e gerar o

som final com as características de espacialidade. O formato escolhido para organizar essas informações já foi mostrado e exemplificado na Figura 3.9.

Para se utilizar as rotinas de reverberação, as coordenadas dos oclusores, os seus coeficientes de absorção do som, a posição da fonte e a posição do ouvinte podem ser informados através de um arquivo-texto ou através da linha de comando, caso não exista um arquivo-texto com as informações necessárias. A opção de entrada das informações através da linha de comando só é possível caso as rotinas de reverberação sejam executadas sem que sejam utilizadas como parte de um sistema de geração do som tridimensional. As rotinas pedirão para que o usuário entre com os parâmetros caso não exista um arquivo *dados.txt* com os mesmos.

Na atual implementação, o arquivo texto contendo as informações necessárias deve possuir a estrutura mostrada no Quadro 5.3.

## 5.5 Resultados

Chegou-se a uma rotina para calcular as informações de reverberação através do método das imagens e outra através do método do traçado de feixes.

### 5.5.1 Método das imagens

Para um determinado teste, utilizando uma sala quadrada, o método das imagens calculou mais de 200 mil fontes virtuais, quando na verdade somente aproximadamente 400 fontes seriam utilizadas como resultado final. O restante das fontes calculadas não foi utilizado por não haver um caminho físico possível entre fonte e ouvinte seguindo essas reflexões, conforme exposto anteriormente.

Este teste reforça dois aspectos negativos do método das imagens. Um deles é a necessidade de calcular e manter as informações de todas as fontes virtuais, e respectivas salas, mesmo que essas não venham a ser utilizadas. O outro é o fato de em geometrias muito simples, como o de uma sala quadrada, onde existem superposições de fontes virtuais nas mesmas posições, muitas fontes inaudíveis serem geradas, fazendo com que o tempo de processamento e a memória utilizada sejam significativamente aumentados.

---

**Quadro 5.3** Estrutura do arquivo de texto para entrada dos dados do ambiente, fonte e ouvinte para os cálculos de reverberação.

---

N (número de lados da sala)

Coordenada x do primeiro ponto do oclisor 1

Coordenada y do primeiro ponto do oclisor 1

Coordenada x do segundo ponto do oclisor 1

Coordenada y do segundo ponto do oclisor 1

Coefficiente de reflexão do oclisor 1

...

...

...

Coordenada x do primeiro ponto do oclisor N

Coordenada y do primeiro ponto do oclisor N

Coordenada x do segundo ponto do oclisor N

Coordenada y do segundo ponto do oclisor N

Coefficiente de reflexão do oclisor N

Coordenada x da fonte sonora

Coordenada y da fonte sonora

Coordenada x do ouvinte

Coordenada y do ouvinte

---

### 5.5.2 Traçado de feixes

Foram feitas simulações com o método do traçado de feixes, para verificação dos tempos de processamento para os casos onde há uma mudança da posição da fonte ou do ouvinte. Para uma determinada sala quadrada, repetiu-se o mesmo cálculo 10 vezes e obtiveram-se as médias de tempo de processamento expostas na Tabela 5.1. Foi utilizado um *laptop* com processador Intel Pentium 2.13GHz, 1GB de RAM, sob sistema operacional Windows XP com SP2.

Esses resultados indicam que caso se desejasse informações para uma nova posição do ouvinte, seria necessário menos de 1 ms, pois não seria necessário refazer as funções de visibilidade nem a árvore de feixes.

| Dados Fornecidos       | Cálculo realizado       | Tempo gasto (ms) | Tempo percentual |
|------------------------|-------------------------|------------------|------------------|
| Posição dos Refletores | Funções de visibilidade | 3,4              | ≈26%             |
| Posição da Fonte       | Árvore de Feixes        | 9,3              | ≈72%             |
| Posição do Ouvinte     | Pesquisa na Árvore      | 0,31             | ≈2%              |

Tabela 5.1: Tempos de processamento necessários para realização de cada etapa do algoritmo do traçado de feixes.

### 5.5.3 Testes subjetivos

As rotinas implementadas foram incorporadas a um sistema de geração de som tridimensional [11] para que fosse possível fazer uma análise subjetiva dos resultados encontrados a partir de alguns exemplos de som, para salas de diferentes características.

Foram gerados os dados de reverberação para diferentes ambientes convexos, posição de fonte e posição de ouvinte. Além disso, utilizaram-se coeficientes de absorção diferentes para que se pudesse analisar os diferentes resultados obtidos. Esses dados de reverberação foram utilizados para se processar um sinal monoaural e gerar o som com as informações de posicionamento e ambientação.

Verificou-se que ambos os métodos produzem respostas semelhantes para uma dada configuração e que, de fato, o método do traçado de feixes é capaz de gerar a resposta mais rapidamente.

# Capítulo 6

## Conclusão

A partir do estudo feito para o desenvolvimento do presente trabalho, foi possível ampliar o conhecimento acerca da geração de som tridimensional. A geração de som tridimensional está ligada à capacidade de recriar características de posicionamento e ambientação, e este projeto teve como foco estudar alternativas para se fazer a síntese de reverberação sonora para se recriar as características de ambientação.

Foi feito um estudo detalhado de duas técnicas: o método das imagens e o método do *beam tracing*; em seguida, buscou-se fazer uma implementação de cada um desses métodos para ambientes em duas dimensões.

Calcular os caminhos de propagação através do método das imagens se mostrou uma alternativa mais fácil de ser implementada, mas as limitações do método levam à conclusão de que este só é viável quando não é exigida uma resposta rápida. Este método se aplica, por exemplo, nos casos em que tanto a fonte sonora quanto o ouvinte são fixos.

O método do *beam tracing*, por outro lado, mostra-se a melhor opção quando há requisitos de desempenho mais rigorosos, pois grande parte dos cálculos não precisa ser refeita, dependendo da modificação que o cenário a ser recriado sofra. Foi feita uma implementação deste método utilizando-se um espaço paramétrico para facilitar os testes de visibilidade dos oclusores presentes no ambiente e a posterior criação da *beam tree*.

Atrelada a todas essas vantagens no desempenho computacional, verificou-se uma dificuldade muito maior para implementação do segundo método. Foi feita uma implementação dele para ambientes em duas dimensões, seguindo os passos e os princípios explicados ao longo do trabalho. A reutilização de grande parte dos cálculos quando o ambiente não se modifica faz com que esse método seja uma escolha mais apropriada quando existem requisitos de



desempenho mais rígidos, sem que haja uma piora nos resultados encontrados.

O maior problema deste método é a complexidade das operações geométricas envolvidas na ampliação para solução em três dimensões, pois os feixes se tornariam cones e as retas seriam planos.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Como o presente trabalho se mostra como um primeiro estudo do assunto, com as primeiras implementações, abre um grande leque de possíveis trabalhos futuros.

No método das imagens, poderia ser feita uma ampliação para três dimensões a título de curiosidade, pois este método já se mostra pouco eficiente para duas dimensões.

Para o segundo método, mais eficiente, o primeiro passo seria buscar melhorias no gerenciamento da memória para se buscar uma solução para processamento *online*.

Em seguida, deve-se aprimorar o algoritmo, tratando casos de ambientes não convexos como, por exemplo, o caso de duas salas interligadas por uma porta.

Para tornar o sistema mais completo, e com resultados mais reais, pode-se também adicionar os efeitos da difração sonora aos resultados obtidos. O método do traçado de feixes permite que tais efeitos sejam incluídos no resultado final.

A partir desse ponto, sim, seria oportuno buscar as modificações que devem ser feitas nas operações geométricas para se utilizar o método para ambientes 2,5D e 3D.

# Bibliografia

- [1] FREELAND, F. P., *Técnicas de geração de Som Tridimensional*. Rio de Janeiro, Brasil, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Junho 2001.
- [2] CREMER, L., MÜLLER, H. A., *Principles and applications of room acoustics*. Applied Science, 1978.
- [3] “Dolby Virtual Speaker - 5.1 Channel Surround Sound from Two Stereo Speakers”, [http://www.dolby.com/consumer/technology/virtual\\_speaker\\_wp.html](http://www.dolby.com/consumer/technology/virtual_speaker_wp.html), acessado em Julho de 2007.
- [4] BORISH, J., “Extension of the image model to arbitrary polyhedra”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 75, pp. 1827–1836, June 1984.
- [5] FOCO, M., POLOTTI, P., SARTI, A., *et al.*, “Sound spatialization based on fast beam tracing in the dual space”. In: *Proceedings of International Conference on Digital Audio Effects*, pp. 8–11, London, UK, September 2003.
- [6] BLAUERT, J., *Spatial Hearing*. MIT, 1983.
- [7] FUNKHOUSER, T., I.CARLBOM, ELKO, G., *et al.*, “A Beam Tracing Approach to Acoustic Modeling for Interactive Virtual Environments”. In: *Computer Graphics 32 (Annual Conference Series)*, pp. 21–32, Orlando, USA, July 1998.
- [8] HECKBERT, P. S., HANRAHAN, P., “Beam Tracing Polygonal Objects”. In: *Proceedings of SICGRAPH*, pp. 119–127, Minneapolis, USA, July 1984.
- [9] MAFFRA, S. A. R. S., *Propagação de Som em Ambientes Acústicos Virtuais Bidimensionais*. Rio de Janeiro, Brasil, Dissertação de Mestrado - PUC-Rio, Março 2003.

- [10] ANTONACCI, F., FOCO, M., SARTI, A., *et al.*, “Real Time Modeling of Acoustic Propagation in Complex Environments”. In: *Proceedings of International Conference on Digital Audio Effects*, pp. 5–8, Naples, Italy, October 2004.
- [11] TYGEL, A. F., *Plug-ins VST para Restauração de Gravações Degradadas, Som Tri-dimensional e Equalização*. Rio de Janeiro, Brasil, Trabalho de Conclusão de Curso - Escola Politécnica, 2007.